Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej
100100212807

ARTUR FÜRST

# DAS WELTREICH DER TECHNIK

B 2/78
m

# Das Weltreich der Technik

# Das Weltreich der Technik

## Entwicklung und Gegenwart

Von

Artur Fürst

Vierter Band

POLITECHNIKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA WROCŁAWSKA

BIBLIOTHEK DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE BRESLAU

Im Verlag Ullstein / Berlin

1927. 1533.

Inv. 18221.

3489107/1

Copyright 1927 by Ullstein A. G., Berlin — Printed in Germany

# Dem Gedenken an Artur Fürst!

Artur Fürst, der Schöpfer dieses Werkes, wurde am 23. Februar 1880 in dem westpreußischen Städtchen Rosenberg geboren. Schon frühzeitig zeigte er Neigung für naturwissenschaftliche und technische Dinge. Nach Absolvierung der Schule bezog er die Technische Hochschule in Charlottenburg, um Maschinenbau und Elektrotechnik zu studieren. Nach einigen Semestern ging er nach Paris und setzte dort seine Studien fort. Hier aber kam er in Berührung mit der Presse, und die weitere Richtung seines Lebensweges war dadurch bestimmt. Die Presse, der Journalismus, das gedruckte Wort ließen ihn nicht wieder los. Er fühlte sich berufen, das technische Wissen, das er sich selbst durch ein oft nicht leichtes Studium errungen, in gefälliger und verständlicher Form weiteren Kreisen zugänglich zu machen.

Dieser Berufung ist er treu geblieben. Eine kurze Zeit freilich sieht es so aus, als wolle er sich ganz dem Journalismus und Zeitungswesen zuwenden. Er arbeitete in Paris in der Redaktion der dort erscheinenden „Deutschen Zeitung" und wirkt, nach Berlin zurückgekehrt, einige Jahre als Feuilletonredakteur an großen Berliner Blättern. Aber er fühlt selbst, daß hier nicht die wahre Stärke seines Wesens und seiner Begabung liegt. Mit Gewalt macht er sich von der journalistischen Berufsarbeit frei, um ganz uneingeschränkt seiner Neigung zu leben, der Mittler naturwissenschaftlicher und technischer Fortschritte und Erkenntnisse für seine Volksgenossen zu werden. Das Ziel, das er sich dabei steckte, sprach er selbst klar aus: durch eine volkstümliche, inhaltsreiche Darstellung auch dem Nichttechniker die Errungenschaften der Technik zum Verständnis zu bringen.

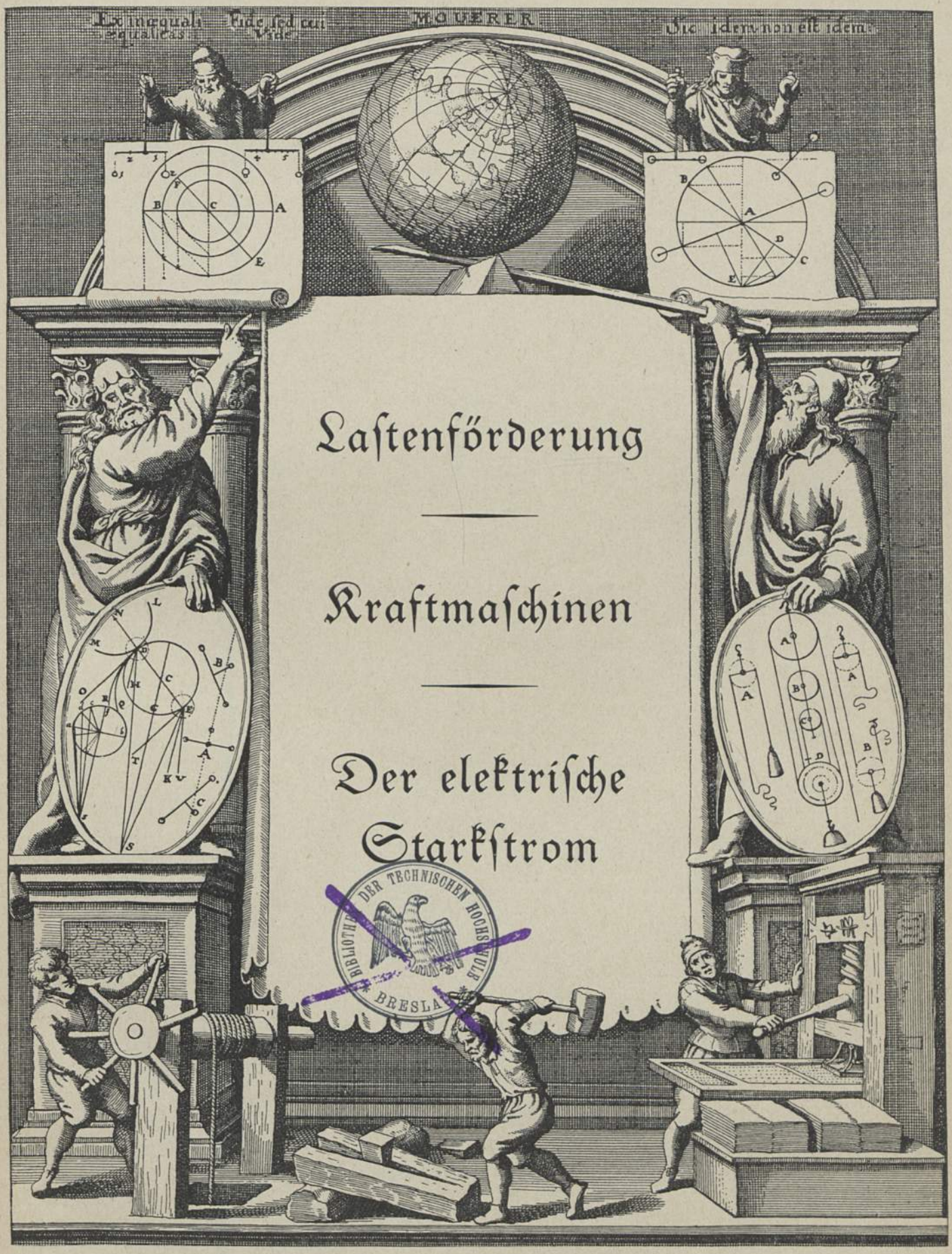
Die Früchte seiner Arbeit liegen vor uns. Eine gewaltige Anzahl von technischen Feuilletons, in Zeitschriften und Tageszeitungen zerstreut, in denen er zwei Jahrzehnte hindurch alle Fortschritte und Neuerscheinungen der Technik verfolgt und seinem Leserkreise nahebringt. Dann aber weiter eine Reihe von populär-technischen Werken, die zum bleibenden Bestand der deutschen Literatur gehören dürften. Er empfand, daß die Technik nicht nüchtern und phantasielos ist, sondern täglich neue Wunder schafft, und in diesem Sinne wurde sein erstes Buch „Die Wunder um uns" geschrieben, ebenso wie das „Buch der tausend Wunder", das er zusammen mit A. Moszkowski verfaßte. Zwei biographische Werke verdanken wir seiner Feder: „Emil Rathenau" und „Werner von Siemens". Die dann folgenden Bücher: „Die Welt auf Schienen", „Das Reich der Kraft", „Im Bannkreis von Nauen" zeigen seine Meisterschaft in der Darstellung technischer Probleme.

Auch auf Artur Fürst trifft das alte Wort zu: in docendo discimus. Er lernte beim Lehren, und während er an den genannten Büchern arbeitete, stieg in ihm der Plan auf, das ganze große Gebiet der Technik, „Das Weltreich der Technik" einheitlich in einem Gusse zu behandeln.

Eine Riesenaufgabe! Seine Freunde warnten ihn, rieten ihm, Mitarbeiter für die einzelnen Gebiete zu nehmen. Er bestand auf seinem Plan. Mit Eifer und Schaffenslust ging er an die Aufgabe, an eine Arbeit, die manchmal das Maß menschlicher Kraft überstieg. Er hätte sie gezwungen, wenn nicht der Tod dazwischengetreten wäre. Bis auf den letzten Abschnitt des vierten Bandes, den Abschnitt von der Starkstromtechnik, war alles fertig. Der glänzende Erfolg der ersten drei Bände, die begeisterte Kritik, die sie überall in der Presse fanden, spornten ihn schon wieder zu neuen, noch umfassenderen Plänen an. Da überfiel ihn im besten Mannesalter eine tückische Krankheit und setzte seinem Lebenswerk ein jähes Ende.

Die Abfassung des letzten noch fehlenden Kapitels übernahm der Ingenieur Hans Dominik, der dem Verstorbenen durch viele Jahre befreundet war, und der allein das Werk in Fürsts Sinn und Art zu Ende führen konnte.

Der Verlag.




Titelblatt zu Daniel Mödling
„Mechanische Kunstkammer". Frankfurt a. Main M D C XXIX

BIBLIOTHEK DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE
* BRESLAU *
POLITECHNIKA
BIBLIOTEKA
GŁÓWNA

# Inhalt

(Ein Stichwörterverzeichnis befindet sich am Ende des Bandes)

*

## Lastenförderung


22. Stetige Förderer . . . . . 3

Die Bedeutung der Massenförderung toter Lasten. Selbstentlade-Wagen. Wagenkipper. Feldbahnen. Kratzer, Schlepper, Schneckenförderer. Schüttelrinnen. Rollenförderer. Förderbandanlagen. Trogförderer. Becherwerke. Hoch- und Tiefbagger. Löffelbagger. Schaufelradbagger. Schaukelbecherwerk. Bunker.

Schwebebahnen. Die Entwicklung der Seilbahnen. Alte japanische Seilbahn. Seilbahn des Faustus Verantius. Die zweigleisige Seilbahn zu Danzig. Die Riese von Hohenstein in Fai. Die Seilbahn von Metz.

Einrichtung der modernen Seilbahn. Das Tragseil. Kuppelungsmuffe. Spannvorrichtungen. Seilstützen. Das Zugseil. Antriebsvorrichtung. Fahrzeuge. Kippmulden. Selbsttätige Wagenkupplung. Winkelstellen. Weichenanlagen. — Seilbahnanlage der Gasanstalt Berlin-Tegel. Seilbahn mit selbsttätiger Entleerung. Seilschrägbrücke. Seilbahn mit Tunnel in Serbien. Seilbahn mit Meeresstrecke in Neu-Kaledonien. Seilbahn zwischen zwei Schiffen. Die größte Seilbahn der Welt.

Elektrische Hängebahnen mit Einzelantrieb. Selbsttätige Kupplung und Bremsvorrichtung. Elektro-Hängebahn mit Führerstand.

23. Hebezeuge . . . . . 32

Die einfachste aller Maschinen: Der Hebel. Das Kräfteverhältnis am Hebel. Einarmiger und zweiarmiger Hebel. Feste und lose Rolle. Rad an der Welle. Zahnradgetriebe. Flaschenzüge.

Der Kran und seine Bedeutung. Transport eines ägyptischen Riesenstandbildes. Aufstellung eines Obelisken im alten Ägypten. Die Picota oder Kupila. Die Entwicklung des Krans. Die Versetzung des altägyptischen Obelisken Julia in Rom. — Pferdegöpel und Tretrad. Wasserkehrrad. Alter Hafendrehkran. Der Drehkran von Andernach. Das Krantor zu Danzig.

Moderne Kranbauten. Wandschwenkkran. Deckenlaufkran. Fahrbarer Handkran. Kraftwagen-Kran. Lokomotiv-Kran. Fahrbare Dampfkrane. Torkran. Halbtorkran. Brückenkrane. Kabelkran. Scherenkran. Hammerkrane. Der Hammerwippkran der Werft Blohm & Voß. Schwimmkran.

Tragvorrichtungen der Krane. Kranhaken. Das Anbinden der Lasten. Selbstgreifer. Hulett-Krane. Lade-Elektromagnet für Eisenschrot. Elektrische Hebezeuge.

24. Rohr- und Seilpost . . . . . 60

Bedeutung und Einrichtung der Rohrpost. Anlage der Rohrnetze. Büchsenformen. Druckluft und Dünnluftbetrieb. Hausrohrpostanlagen.

Die einfache Rohrpostanlage. Anlage für dauernden Wechselverkehr mit mehreren Stationen. Anlage der Versicherungsgesellschaft Nordstern. Zettel-Rohrpostanlagen.

Stadt-Rohrpostanlagen. Entwicklung und Einrichtung des Berliner Rohrpostnetzes. Selbsttätige Luftabschaltung. Rohrweichen. Amerikanische Rohrpostanlagen. Die Münchener Briefbahn.

Seilpostanlagen. Seilpostwagen. Spann- und Schmierwagen. Seilpostanlage des Berliner Haupt-Telegraphenamts.

25. Aufzüge . . . . . 75

Personen- und Lastaufzüge. Handaufzüge. Transmissions-Fahrstühle. Einrichtung der Fahrstühle mit Wasserdruck-Antrieb.

Der erste elektrische Personen-Aufzug. Einrichtung eines modernen elektrischen Fahrstuhls. Türsicherungen. Standortanzeiger. Fangvorrichtungen. Notbremsen. Seilwegzähler. Geschwindigkeitsregler. Seilzug- und Kurbelsteuerung. Druckknopfsteuerung. Paternoster-Aufzüge.


## Die Kraftmaschinen


26. Muskel-, Wind- und Wasserkraftmaschinen. — Talsperren. . . . . 91

Die Arbeit als Kulturfaktor. Der Begriff der Kraftmaschine. Was ist Kraft? J. Robert Meyer: das Gesetz von der Erhaltung der Energie. Energieumwandlung. Das Perpetuum mobile. Formen der Energie. Die Sonne als Kraftspenderin. Atom-Zerspaltung. — Technischer Begriff der Arbeit. Das Maß der Arbeit oder Energie. Die Leistung. Das Maß der Leistung. Der Nutzeffekt. Die Wärmeenergie und ihr Maß.

Die Menschenkraft. Die tierische Kraft. Pferdegöpel. Treträder. Die Sonnenenergie. Versuche ihrer Ausnutzung. Neuzeitliche Sonnenmotoren.

Die Windkraft. Die Windmühle. Windräder. Neuzeitliche Windkraftwerke. Windstärken.

Wasserkraft. Bedingte Anwendbarkeit. Stauanlagen. Wasserfälle als Energiequellen. Die Wasserkraft im Flachland. Wasserkraftvorräte der einzelnen Länder. — Schiffsmühlen. Wasserräder. Das größte Wasserrad der Welt. Gefälle. Wehre. Gerinne. Räderkraftwerk zu Marly. Die Wasserkünste von Sanssouci.

Die Wasserturbinen. Die Vorläufer der neuzeitlichen Wasserturbinen. Arten der Wasserturbinen. Francis-Turbine. Kaplan-Turbine. Pelton-Rad. Regeleinrichtungen der Turbinen.

Wasserkraftanlagen. Das Stauwehr. Das Wasserschloß. Die Druckrohrleitungen. Das Krafthaus. Wassersäulen-Maschinen.

Talsperren. Ihr Zweck. Katastrophen. Staubecken im Altertum. Die Harzer Staubecken. Das Stauwerk von Assuan. Amerikanische Staubecken. Die Talsperre bei Remscheidt. Die Urfttalsperre. Die schlesischen Talsperren. Die Eder-Talsperre. Die bayerischen Wasserkraftanlagen: Das Walchenseewerk, die Isarkraftwerke. Das Murgwerk. Die badische Kraftversorgung. Gezeiten-Kraftwerke. Das projektierte Flutwerk am Severnfluß.

27. Die Kolben-Dampfmaschine . . . . . 155

Der Hunger nach Kraft. Die Dampfmaschine ein Segen für die Menschheit. Ihre Freizügigkeit. Ihr geringer Wirkungsgrad.

Die Geschichte der Dampfmaschine. Aristoteles. Der Heronsball. Aeolipilen. Der Architronito des Leonardo da Vinci. Die Dampfmaschine des Salomon de Caus. Der Püsterich. Branca. Das erste Dampfmaschinenpatent von Ramseye. Die Maschine des Marqueß of Worcester. Torricellis Barometer. Otto Guericke. Die „Kastenkünste" in Schottland. Thomas Saverys Feuermaschine.

Papin, der Erfinder der Dampfmaschine. Seine Versuchsmaschine. Der Gedanke eines Dampfschiffs. Seine zweite Maschine. Sein Dampfschiff. Newcomen, der Erfinder des Balanciers. Seine Pumpmaschine. Ihre Verbesserung durch Potter und Brighton. Die „atmosphärische" Maschine.

James Watt. Der abgetrennte Kondensator. Sein erstes Dampfmaschinenmodell. Zusammenarbeit mit Dr. Roebuck. Watts Dampfmaschinenpatent. Mißerfolge. Boulton und Watt. William Murdock. Die Maschine mit Drehbewegung. Die Expansion des Dampfes. Die doppeltwirkende Dampfmaschine. Das „Parallelogramm".

Weitere Vervollkommnung der Dampfmaschine. Evans schafft höhere Dampfspannung. In Deutschland: Alban. Der Lokomotivbauer Stephenson. Nasmyths Dampfhammer. Krupps „Fritz". Die Hettstedter Maschine. Die erste Dampfmaschine in Berlin. Dampfmaschinenfabriken. Hammermaschinen. Maschinen mit schwingenden Zylindern. Liegende Bauart. Wirkungsweise der Dampfmaschine. Kolbendruck. Berechnung der Leistung. Nutzen des hochgespannten Dampfes. Der „schädliche Raum". Der Indikator.

Störungen der Dampfmaschine. Das Hornblower-Ventil. Schiebersteuerungen. D-Schieber. Muschelschieber. Der Voreilwinkel. Das Exzenter. Der Trick-Schieber. Der Expansionsschieber von Meyer. Corliß-Steuerung. Rider-Steuerung. Kolbenschieber. Ventilsteuerungen. Sulzer-Steuerung. Collmann-Steuerung. Radovanovic-Steuerung. Lentz-Steuerung. Die Gleichstrom-Dampfmaschine von Stumpf.

Der Ungleichmäßigkeitsgrad. Das Schwungrad. Anlassen der Dampfmaschine. Regelung der Dampfzufuhr. Schwungkugel-Regler. Steuerorgane. Stephenson-Steuerung. Heusinger-Steuerung.

Der Kondensator. Seine Wirkungsweise. Einspritzkondensator. Oberflächen-Kondensator. Kondensator-Pumpen. Das Kühlwasser und seine Rückkühlung. Kühltürme.

Die Innenkondensation im Zylinder. Die Dampftrocknung von Hirn. Schwoerers Heißdampfmaschine. Die Dampfüberhitzung nach Wilhelm Schmidt. Die Expansionswirkung. Verbundmaschinen. Heißdampfverbund-Maschinen. Zwischendampfverwertung. Entwicklung der Expansionsmaschinen. Anwendungsgebiete der Expansionsmaschine. Zylinderanordnungen bei Mehrzylindermaschinen.

Hauptbestandteile der Kolbendampfmaschine. Maschinenrahmen. Fundament. Zylinder. Kolben. Kolbenstange. Kreuzkopf. Stopfbüchsen. Schmiermittel. Hauptwelle. Der Maschinenraum. Die Lokomobilen.

28. Die Dampfturbine . . . . . 253

Dampfkolbenmaschine und Dampfturbine. Anwendungsgebiete und Leistungen der Dampfturbine. Unterschiede gegenüber der Kolbenmaschine. Die Dampfüberhitzung bei der Turbine. Umdrehungszahlen. Vorläufer der Dampfturbine. Wasserturbine und Dampfturbine. Dampfausnutzung.

Die Lavalturbine. Die Curtisturbine. Geschwindigkeitsstufen. Druckstufen, Gleichdruck- oder Aktions-Turbinen. Überdruck- oder Reaktions-Turbinen. Die Parsons-Turbine. Mehrgehäuse-Turbinen. Leistungsmessung bei Turbinen. Hochdruck-, Mitteldruck-, Niederdruck-Turbinen. Zahnradvorgelege. Schiffsturbinen. Turbolokomotiven. Gegendruckturbinen. Zwischendampfentnahme. Zwischenüberhitzung.

Kondensationsanlagen. Hilfsmaschinen. Turbinenregler. Das Gehäuse. Leiträder. Die Welle. Laufschaufeln. Wellenlager. Wellendichtungen.

29. Der Dampfkessel . . . . . 277

Der Dampf. Hoch- und Höchstdruck. Das Manometer.

Der Kofferkessel. Eine einfache Kesselanlage. Walzenkessel. Großwasserraumkessel. Mehrfach-Walzenkessel. Batteriekessel. Cornwall- oder Flammrohrkessel. Zweiflammrohrkessel. Heizrohrkessel.

Wasserrohrkessel. Sektionskessel. Dürr-Kessel. Krummrohr-Kessel. Schrägrohr-Kessel. Steilrohr-Kessel. Der Steinmüller-Kessel. Höchstdruck. Der Atmoskessel. Der Benson-Kessel. Polizeivorschriften. Gliederkessel. Der Belleville-Kessel. Der Root-Kessel. Der Wärmespeicher Ruths.

Verbrennungsvorgang. Rauchminderung. Verbrennungs-Luftregelung. Verbrennungsraum. Feuerbrücke. Schlacken. Brennstoffe. Gewinnung von Wertstoffen.

Planrost. Die Schrägrostfeuerung von Tenbrink. Treppenrost. Selbsttätige Feuerungen. Wurffeuerungen. Unterschubfeuerungen. Der Vorschubrost. Der Wanderrost. Kohlenstaubfeuerungen. Der Schornstein. Der Saugzug. Das Blasrohr der Lokomotiven. Unter-Wind- und Saugzug-Einrichtungen.

Kesselspeisung. Speisepumpen. Der Injektor. Der Kesselstein. Speisewasservorwärmer. Heizgasvorwärmer. Abdampfvorwärmer. Verbrennungsluftvorwärmer. Dampfüberhitzer.

Kesselausrüstung. Absperrventil. Sicherheitsventil. Dampfpfeife. Wasserstandsanzeiger. Prüfhähne. Wasserstandsgläser. Manometer. Druckplatten-Manometer. Federrohrmanometer. Kesselprüfeinrichtungen.

Zehn Gebote für den Heizer. Registrierapparate. Kohlenwagen. Schreibthermometer. Kohlensäuregehaltsmesser der Heizgase. Kesselexplosionen. Statistiken. Nutzleistung. Wärmestromdiagramm von Sankey.

30. Die Gas- und Ölmaschine . . . . . 319

Thermischer Wirkungsgrad der Dampfmaschinen und der Gas- und Öl-Maschinen. Nachteile der Dampfmaschine. Verbrennung im Arbeitszylinder. Verlorengehende Wärme. Verbrennende Gase. Anwendungsgebiete der Gas- und Ölmaschinen. Ihr geringes Gewicht in bezug auf die Leistung.

Vorläufer des Gasmotors. Lenoirs Gasmaschine. Explosion und Verbrennung. Mischungsverhältnis der Brenngase mit Luft. Die Verpuffungsmaschine. Otto. Die atmosphärische Gasmaschine. Ihre Arbeitsweise. Langen und Otto. Das Diagramm der Maschine von Otto. Die Gasmotorenfabrik Deutz. Daimler. Maybach. Der „neue Otto". Der Viertakt. Die Gemischverdichtung. Die Zündung im Totpunkt.

Der Kühlmantel. Steuerorgane. Kühlung. Der Gummibeutel. Wirkungsgrad. Elektrische Zündung. Zündung durch eine Gasflamme. Glührohrzündung. Elektrische Zündeinrichtungen. Bosch. Regelung des Gasmotors. Aussetzerregulierung. Gemischveränderung. Drosselung. Verlegung des Zündzeitpunktes. Anlassen des Gasmotors. Leuchtgas. Erdgas. Druckgaserzeugung von Dowson. Die Sauggasgeneratoren.

Die Öle. Der Vergaser. Benzin. Erdöl. Benzol. Spiritus. Naphthalin. Teeröle.

Die Gichtgase. Mehrzylindrige Gasmaschinen. Zweitaktmaschinen. Die Ochelhäuser-Maschine. Der Körting-Motor. Doppel-Viertakt-Maschinen.

Rudolf Diesel. Der Dieselmotor. Thermischer Wirkungsgrad und Arbeitsweise. Nebenapparate. Brennstoffe. Zweitakt-Diesel-Maschinen. Die Junkers-Maschine. Anwendungsgebiete der Diesel-Maschinen. Der kompressorlose Dieselmotor. Der Glühkopfmotor. Dampfmaschine und Dieselmotor.

Gas- und Ölturbine. Die Holzwarth-Gasturbine. Schwindende Kraftstoffe und ihr Ersatz.

## Der elektrische Starkstrom

31. Die Entwicklung der Starkstromtechnik . . . . . 365

Die Entdeckung des Elektromagnetismus durch Oersted. Die Arbeiten von Ampère, Faraday und Maxwell. Magnetelektrische Maschinen. Die Erfindung der Dynamomaschine durch Werner Siemens. Der Trommelanker von Hefner-Alteneck, der Ringanker von Gramme. Die Kohlenfadenglühlampe und das Beleuchtungssystem Edisons. Die Gründung der Deutschen Edison-Gesellschaft durch Emil Rathenau. Von der Blockzentrale zur Stadtzentrale. Der Kampf zwischen Gleichstrom und Wechselstrom.

Die Entwicklung der Drehstromtechnik durch M. v. Dolivo-Dobrowolski. Die erste Fernkraftübertragung Lauffen/Frankfurt a. M.

32. Die technische Beherrschung der elektrischen Energie . . . . . 401

Die Speicherung der Energie in Sammlerbatterien. Die Entwicklung des Elektromaschinenbaues. Großmaschinen bis zu 100 000 Kilo-Volt-Ampere. Die sichere Beherrschung von Hochspannungen bis zu einer Million Volt. Transformatoren und Ölschalter. Isolierstoffe und Leitungen. Die Entwicklung der elektrischen Beleuchtung. Von der Kohlenfadenlampe zur Metallfadenlampe. Tantal- und Wolframfäden. Die Halbwattlampe. Von der Reinkohlenbogenlampe zur Effektenbogenlampe. Das Moor-Licht. Die elektrischen Glimmlampen. Moderne elektrische Beleuchtungen.

Weiterentwicklung der Elektromotoren. Drehstrom-Hauptschluß- und Drehstrom-Nebenschlußmotoren. Motoren für einphasigen Wechselstrom. Elektrische Meßinstrumente. Strommesser, Spannungsmesser und Wattmesser. Registrierende und zählende Instrumente. Lampenstundenzähler, Amperestundenzähler und Wattstundenzähler.

33. Die Anwendungsgebiete des Starkstroms . . . . . 478

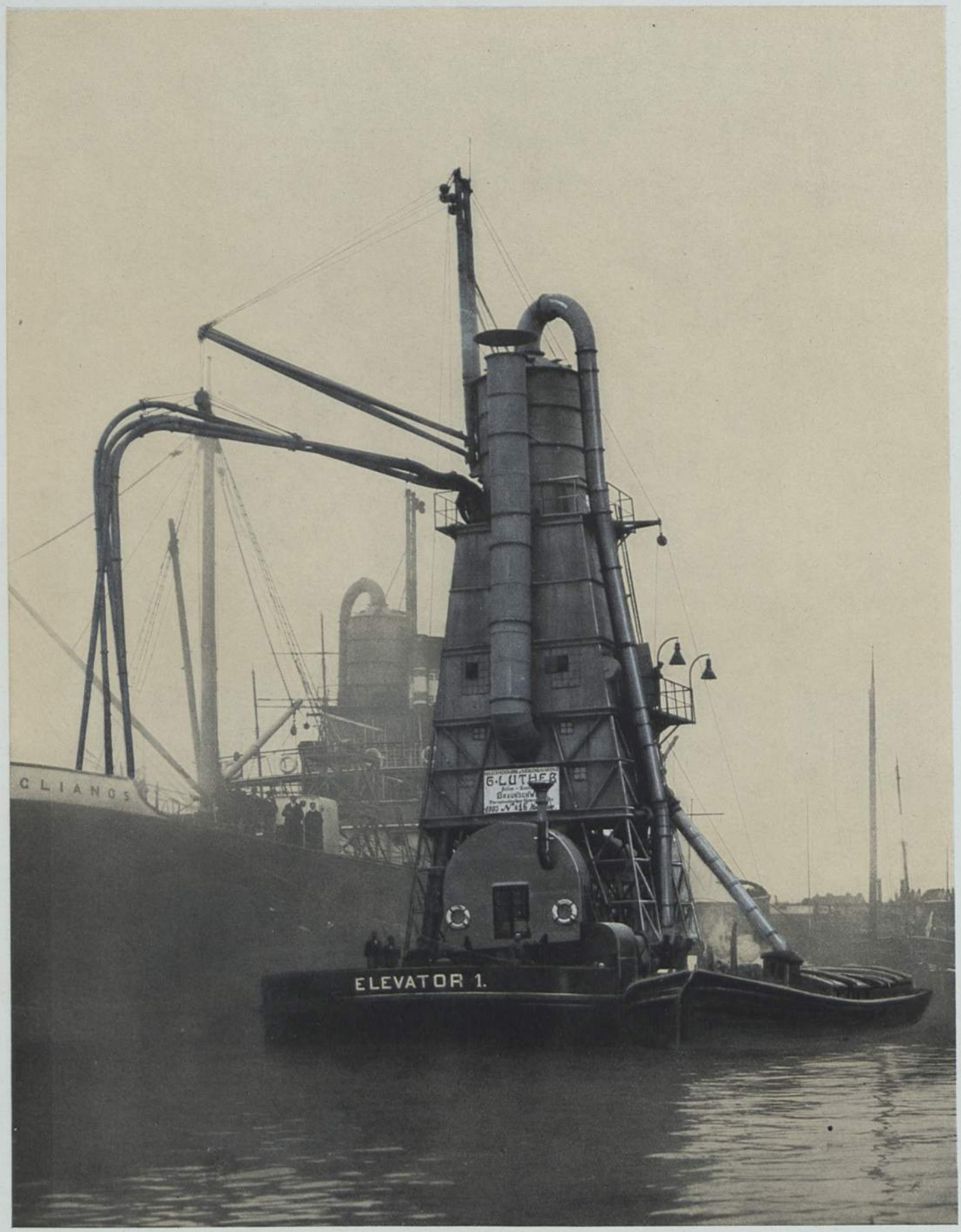
Die Elektrizität in der Schwerindustrie, in Bergwerken, Hütten und Walzwerken. Die elektrischen Einrichtungen in den Werken der mittelschweren Industrie. Elektrische Antriebe in Spinnereien, Webereien und Papierfabriken. In Holz- und Metallbearbeitungswerkstätten. In der graphischen und in der Nahrungsmittel-Industrie.

Die Elektrizität in der Landwirtschaft. Elektrisches Pflügen und Ernten, Säen und Dreschen. Die Elektrizität zur See und in der Wasserwirtschaft.

Die Ausnutzungen der elektrischen Stromwärme. Elektrische Öfen und Elektrostahlöfen. Elektrische Schweißmaschinen.

34. Das Großkraftwerk der Gegenwart . . . . . 514

Die Braunkohlenwerke in Golpa und Trattendorf. Die Steinkohlenwerke von Goldenberg und Essen. Torfkraftwerke in Oldenburg. Wasserkraftwerke. Das neue Werk „Klingenberg" in Rummelsburg. Die Zusammenschaltung aller Fernkraftwerke auf die Reichssammelschiene. Die Verdreifachung der bisherigen Höchstspannung, die Vorbereitung zu einer gemeinsamen Energieversorgung Europas.




Getreideheber mit Saugluftbetrieb

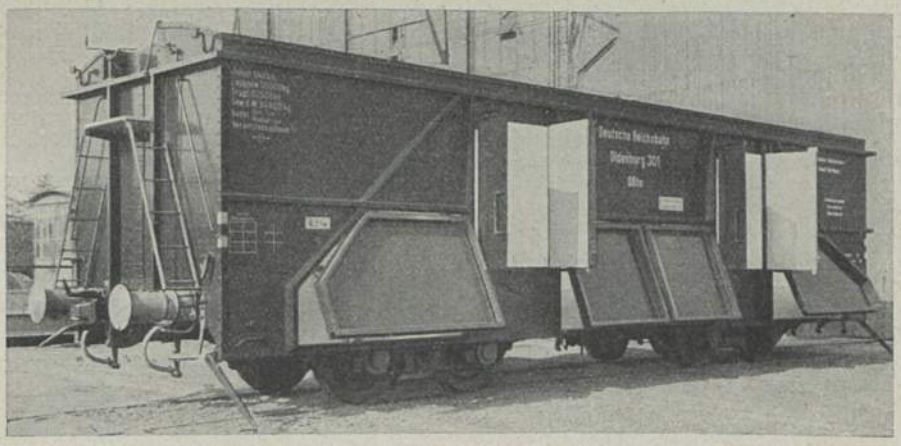
Ausführung der G. Luther A.-G., Braunschweig

# Lastenförderung

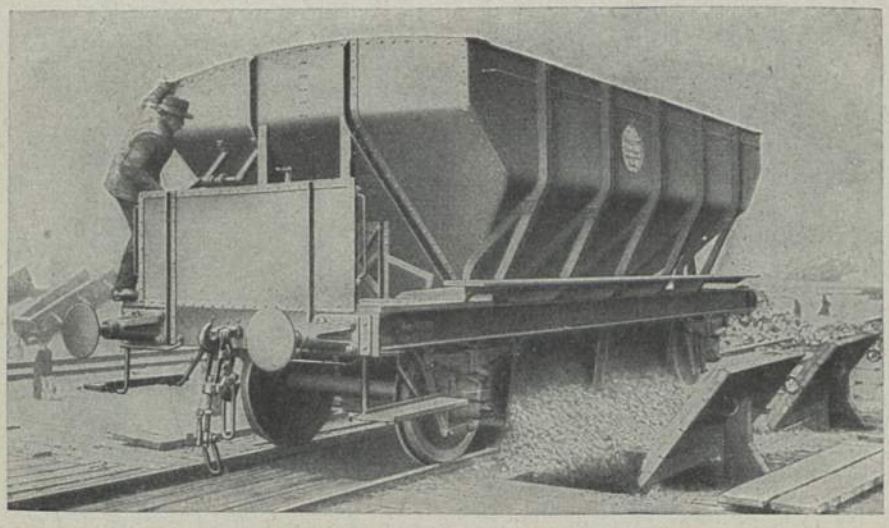
# 22. Stetige Förderer

Im zweiten Band dieses Werks ist nahezu ausschließlich die Rede von Verkehrsmitteln gewesen, die der Fortbewegung von Personen dienen. Die Lastenförderung wurde in etwas größerem Umfang nur bei Besprechung der Güterwagen und Verschiebe-Bahnhöfe erwähnt, die im Betrieb der Eisenbahnen benutzt werden, bei den Straßenfahrzeugen gestreift. Obgleich wir hörten, daß weit mehr als die Hälfte der Eisenbahn-Einnahmen aus dem Güterverkehr stammt, nahmen wir doch wahr, daß die Einrichtungen für den Personenverkehr auf den großen Bahnpfaden das Herrschende sind. Nunmehr werden wir Einrichtungen kennenlernen, die ausschließlich der Lastenförderung dienen, und werden sehen, daß gerade auf diesem Gebiet der Technik Gelegenheit gegeben war, Besonderes und Großartiges zu leisten. Es gelingt ihr, die größten Massen und Lasten so leicht beweglich zu machen, daß man meinen könnte, sie seien ihres Gewichts gänzlich entkleidet.

Die lebende Last legt bei ihrer Beförderung Wert auf große Schnelligkeit, auf Sicherheit und Annehmlichkeit des Aufenthalts in den Beförderungsmitteln. Diese berechtigten Wünsche haben zum Bau schöner, geräumiger Personenwagen, zur Schaffung gewaltiger, schnellfüßiger Zugmittel und zur Ausbildung höchst geistreicher Sicherungen geführt. Die tote Last ist bescheidener. Bei ihrer Fortbewegung braucht keine Rücksicht auf Bequemlichkeit genommen zu werden; es sind im Gegenteil derbes, rasches Zufassen und die Vereinigung von möglichst vielen Stücken auf engstem Raum erwünscht. Schnellzuggeschwindigkeit wird niemals gefordert. Meist kommt es nur darauf an, daß es überhaupt möglich wird, die Gegenstände über ein bestimmtes Gebiet hinweg zu senden. Die Sicherheitsvorkehrungen fehlen nie völlig, dürfen jedoch auf ein Mindestmaß beschränkt werden, da der zu fördernde Gegenstand selbst kein eigenes Leben zu bewahren hat, sondern nur davon zurückzuhalten ist, Menschen Schaden zuzufügen, die seinen Weg kreuzen.



1. Großraum-Selbstentlader mit einer Ladefähigkeit von 50 000 Kilogramm
Die tief liegenden Wandverschlüsse sind für Schüttgut, die höher gelegenen Türen für Stückgüter. Waggon-Fabrik Uerdingen

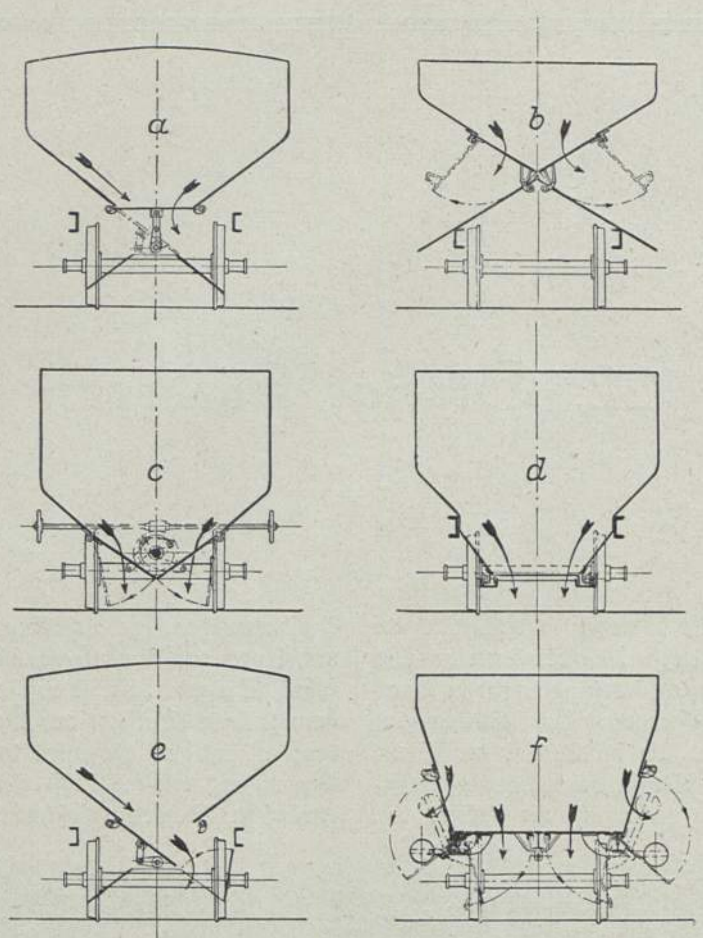


2. Selbstentlader bei der Entleerung

Die Vorkehrungen zum Fortbewegen von Gütern müssen so eingerichtet sein, daß die Förderung möglichst billig vor sich gehen kann. Dieser Gesichtspunkt überwiegt alle anderen. Eine nicht geringe Zahl von Gewerbezweigen konnte zu Leistungen in großem Maßstab nur durch die Ausbildung billiger Massenförderungs-Geräte wieder erstarken. Die

gewaltigen Rodungen in Tropenwäldern, die der Industrie vielbegehrte, kostbare Hölzer liefern, sind ein Beispiel hierfür, ebenso die Ausbeutung von Erzgruben, die in wilden Gegenden, weit ab von der Kohle, sich befinden. Auch die Anlagen der neuzeitlichen Gasanstalten von riesigem Umfang, der großen elektrischen Kraftwerke sind ohne Anwendung der hoch ausgebildeten Förderungsanlagen nicht denkbar. Die Tiefbau-Gewinnung des wichtigsten Industriestoffs, der Kohle, erscheint gänzlich abhängig von leichter, rascher Förderung.

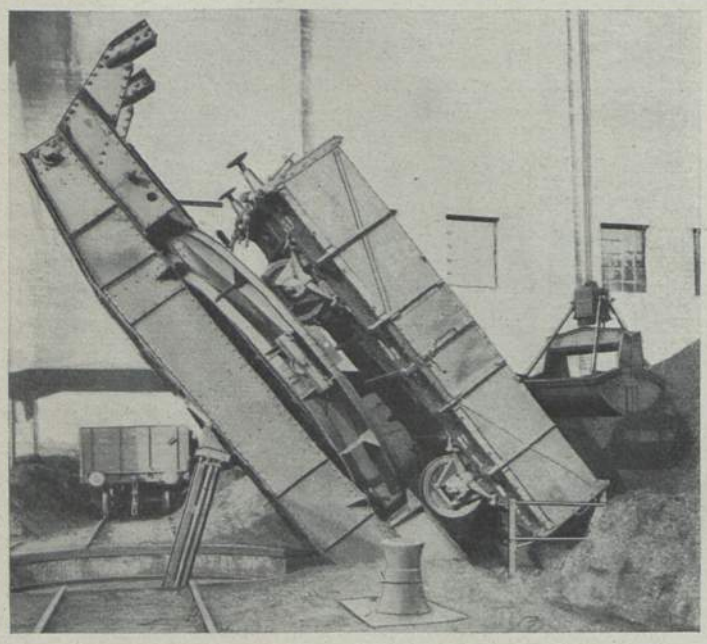
Ein Vorgang, der im gewerblichen Leben der Neuzeit unausgesetzt wiederkehrt, ist der Güterumschlag, das Umladen gewaltiger Lasten von Landfahrzeugen in Schiffe und umgekehrt. Hierbei überwiegt die Lastenförderung in der Senkrechten. Wagerechte Ortsveränderung ist zwar gleichfalls notwendig, sie tritt aber gegen das Heben und Senken der Güter zurück. Die Umschlaghäfen sind daher das große Herrschgebiet der Krane, die aber auch im reinen Landverkehr wichtigste Verwendung finden. Ihrer Art nach gehören die Krane zu den unstetigen Fördermitteln, das heißt zu denen, welche die Lasten nicht in ununterbrochenem Zug von einer Stelle zur andern bringen, sondern absatzweis arbeiten. Auf jede Nutzbewegung muß bei ihnen erst eine Leerbewegung folgen, bis die Maschine von neuem fördernd arbeiten kann. Wir werden uns zunächst mit den stetigen Förderern zu beschäftigen haben, die ohne Unterbrechung Lasten verschieben können.



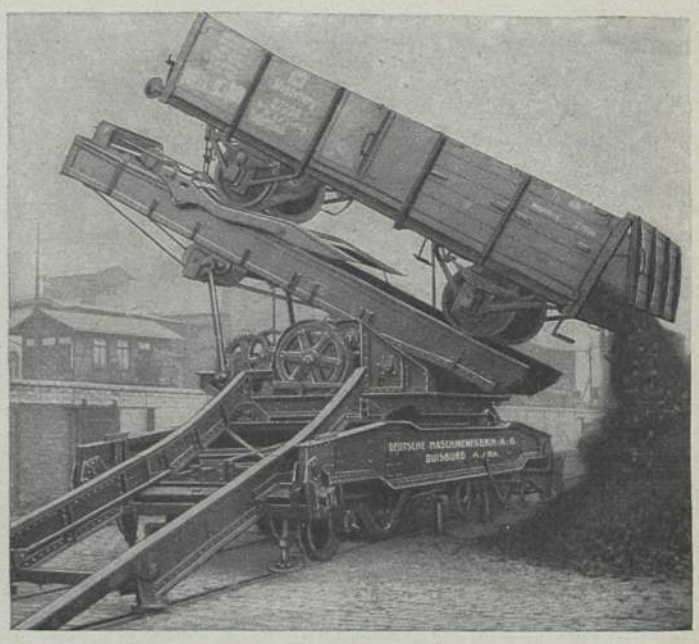

3. Übersichts-Querschnitte von Selbstentlade-Wagen
a) Seiten-Entleerer mit wagrechter Bodenklappe, b) Trichterförmiger Seitenentleerer, c) Bodenentleerer mit Klappe, d) Bodenentleerer mit Schiebern, die in der Längsrichtung des Wagens aufgezogen werden, e) Vereinigter Boden- und Seitenentleerer in Trichterform, f) Vereinigter Boden- und Seitenentleerer mit flachem Boden.
Orenstein & Koppel A.-G., Berlin

Diese Einrichtungen haben eine ungemein mannigfaltige Ausgestaltung insbesondere durch die Ansprüche erfahren, welche die Massenförderung an sie stellt. Überall, wo Rohstoffe gewonnen werden, fallen unausgesetzt große Mengen an, die fortgeschafft werden müssen; aber auch die Zusammenballung der Industrie in den neuzeitlichen Riesenwerken liefert an Halbzeugen und Fertig-Erzeugnissen immer neu sich herandrängendes Fördergut. Die Fortbewegungs-Einrichtungen für diese Massen können erst genügend billig arbeiten, seit mechanische Kräfte für den Antrieb der Fördergefäße zur Verfügung stehen. Menschenkräfte sind hierfür schon längst zu teuer, und wir werden später bei der Geschichte der Krane noch besonders darauf hinweisen, daß eine Hauptaufgabe der Fördermaschinen darin besteht, den Menschen von der niedrigen, geistlosen Tätigkeit des Schleppens zu befreien.

Die Güterwagen der Eisenbahnen, soweit sie in der Hauptsache für die Beförderung von Einzelstücken benutzt werden,



4. Eingebauter Wagenkipper in Entladestellung



5. Fahrbarer Aumund-Kipper in Entladestellung

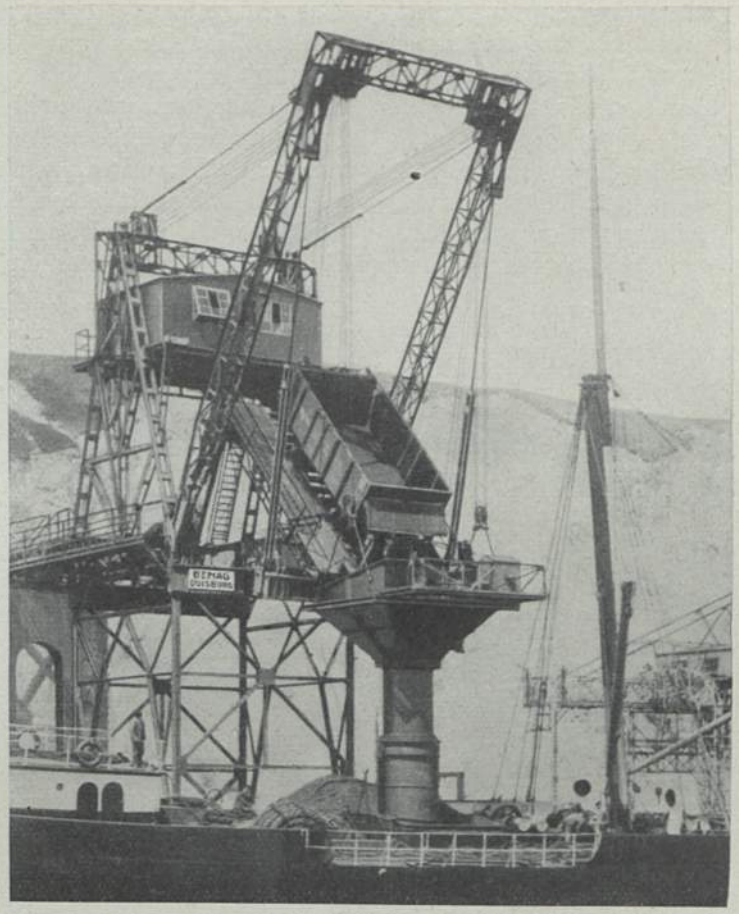
Nach Schwenken des Kipperkopfes können die Wagen ihre Ladung seitlich ausschütten. Demag, Duisburg

die aber im Notfall, zum Beispiel im Krieg, imstande sind, auch Menschen aufzunehmen, wurden bereits besprochen. Es gibt aber eine bestimmte Art von Eisenbahn-Fahrzeugen, die ausschließlich der Massengüter-Förderung dienen und daher besser in diesem Abschnitt behandelt werden. Der Zweck ihrer Sonderbauart wird trefflich durch die Benennung gekennzeichnet: die Fahrzeuge heißen Selbstentlader.

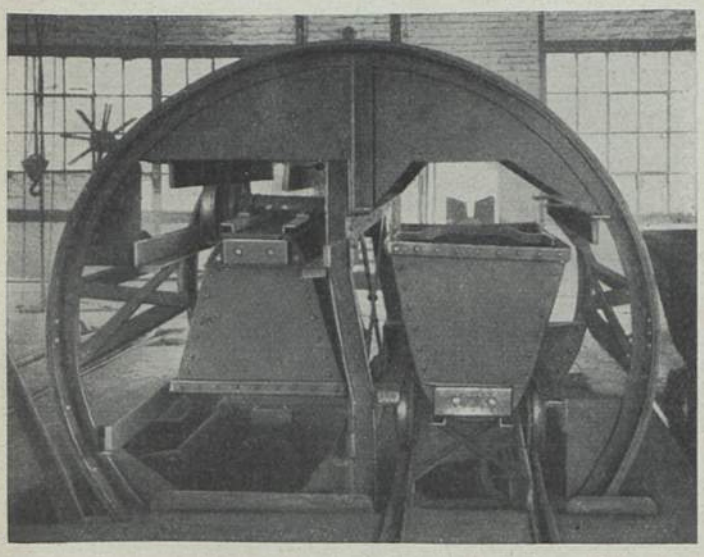
Sie sind so eingerichtet, daß beim Öffnen von Klappen im Unterteil das eingeladene Gut sofort selbsttätig hinausfällt (Bild 2). Zu unterscheiden sind Seiten-Entleerer und Boden-Entleerer sowie Fahrzeuge, die das Gut zugleich nach unten und nach den Seiten auslaufen lassen können. Die Zusammenstellung auf Bild 3 zeigt in deutlichen Schnittzeichnungen einige Bauarten, die hierfür verwendet werden. Seiten-Entleerung, die meist nach beliebiger Seite geschehen kann, hat den beachtenswerten Vorzug, daß die Schienen nicht beschüttet werden.

Solche selbstentladenden Trichterwagen gestatten, die Stillstandszeit der Fahrzeuge sehr stark zu kürzen. In Amerika gibt es Selbstentladerzüge, die schon zwei bis drei Minuten nach der Ankunft am Bestimmungsort wieder abfahrtbereit sind, weil die Entleerungsklappen aller Fahrzeuge von der Lokomotive aus mittels Druckluft gleichzeitig geöffnet und nach der Ausschüttung des Inhalts wieder geschlossen werden. Es ist sogar die Möglichkeit vorhanden, einen Zug solcher Art ohne jeden Aufenthalt an der Entladungsstelle weiterfahren zu lassen, wenn eine besondere Bauart angewendet wird. Die Böden der Wagen sind sattelförmig gebildet, und die Seitenwände können senkrecht emporgehoben werden. An der Stelle, wo das geladene Gut ausgeschüttet werden soll, fährt der Zug an einer Vorrichtung vorbei, auf die Rollenausleger an den Seitenwänden auflaufen, so daß die Planken allmählich in die Höhe gehoben werden. Die Ladung gleitet nun seitlich hinaus. Die hochgehobenen Wände bleiben mit dem Boden durch Lenkerstangen verbunden und senken sich selbsttätig wieder in die Verschlußlage.

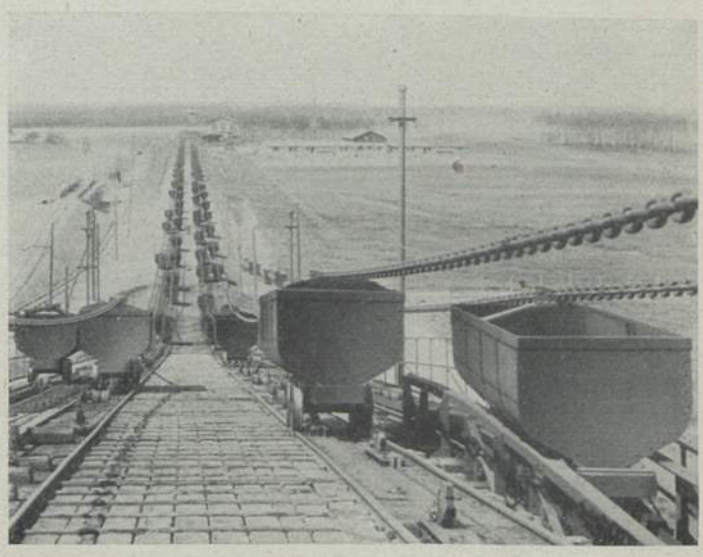
In Deutschland ist man gegenüber der Anwendung solcher Selbstentladewagen lange Zeit sehr zurückhaltend gewesen. Aufhaltend wirkte insbesondere der Umstand, daß Wagen mit trichterförmigem Boden ausschließlich zur Beförderung von schüttbarem Gut verwendet werden können, also nicht wie die anderen Eisenbahnfahrzeuge für Ladungen jeglicher Art brauchbar sind. Die ungeheuren Massen der insbesondere aus dem Ruhrgebiet abzufahrenden Kohle haben aber schließlich doch die Einführung von Selbstentladern in großer Zahl auf den deutschen Strecken erzwungen. Es sind nun Großraum-



6. Umschlag der Kohle von der Eisenbahn auf das Schiff
Der Wagen wird von einer hoch liegenden Kippbühne durch einen zusammenschiebbaren Trichter unmittelbar in das Schiffsinnere entleert
Bauart Demag, Duisburg



7. Kreiselwipper
Der gewippte Wagen hängt an zwei zu den Fahrschienen parallelen Halteleisten



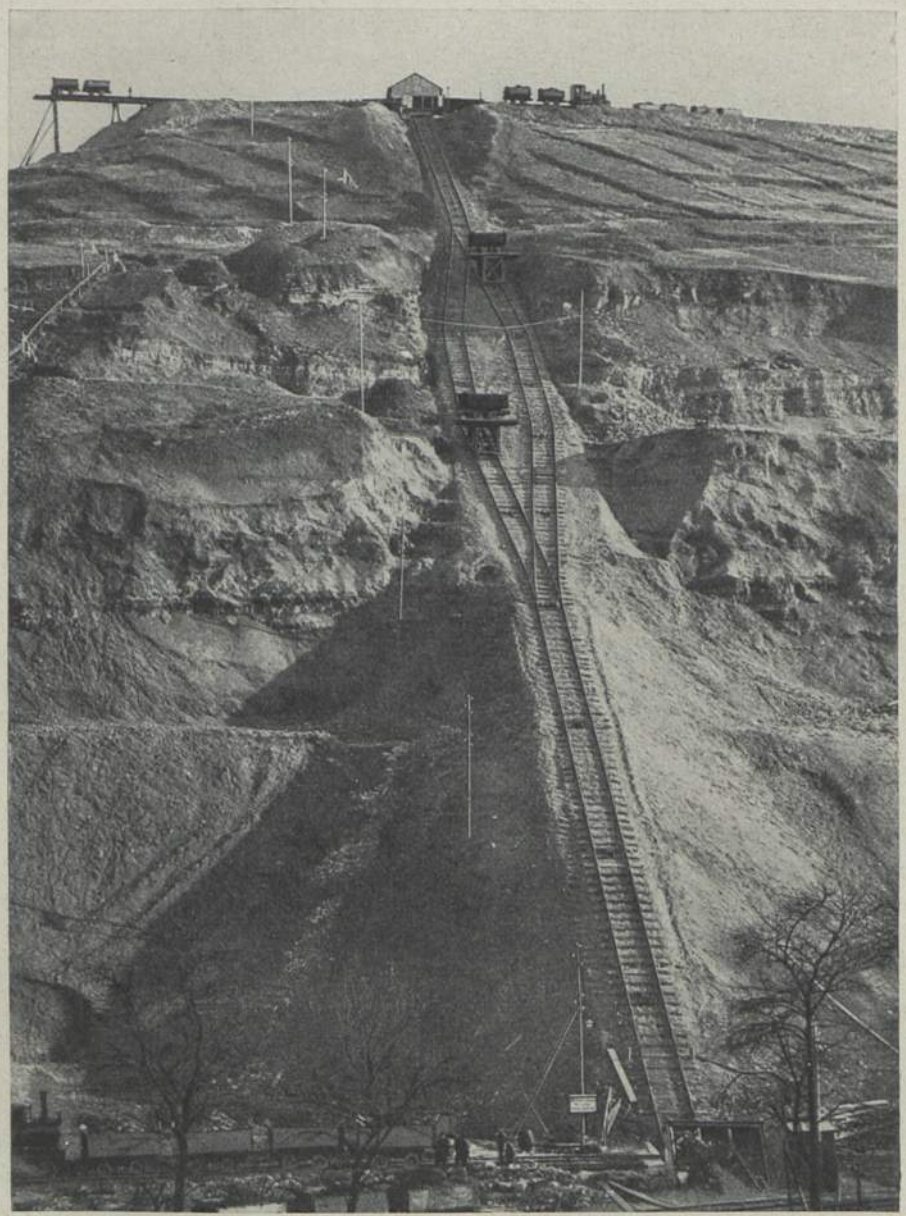
8. Feldbahn mit Oberketten-Antrieb
Wegen der starken Steigung sind die Loren mit Mitnehmerblechen versehen. Erbaut von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

Fahrzeuge von je 50 000 Kilogramm Ladegewicht in Betrieb, die zum Teil in geschlossenen Zügen von der Kohlenzeche zum Lieferort durchfahren und dort in kürzester Zeit entladen werden, so daß sie die Gleise des Ankunftsbahnhofs sofort wieder freimachen.

Ein Teil dieser neuen Groß-Güterwagen ist so ausgebildet, daß der Boden nach Belieben sattelförmig oder eben eingestellt werden kann. Für schüttbares Gut wird durch Anheben von Platten dafür gesorgt, daß nach dem Öffnen von tief liegenden Wandverschlüssen (Bild 1) das geladene Gut sofort selbsttätig hinausrutscht, Stückgüter, die auf dem glatten Boden gelagert sind, können durch höher liegende Türen hinausgeschafft werden.

Die Selbstentladung könnte besonders vorteilhaft ausgenutzt werden, wenn hoch liegende Gleise für die Wagen geschaffen würden. Es hat wenig Zweck, das Gut zunächst auf die flache Erde laufen zu lassen und es dann mühsam auf die Straßenfahrzeuge hinaufzuschaufeln. Die Eisenbahnwagen werden sehr schnell wieder fahrtbereit, aber der ganze Umladevorgang ist teuer. Wie man allmählich auf allen Bahnhöfen Laderampen zum bequemen Einkarren geschaffen hat, wird man nach und nach auch dazu kommen, hoch liegende Absturzgleise für Selbstentlader einzuführen, damit ohne weiteres in die Straßenfuhrwerke eingeschüttet werden kann. Noch besser ist es, unter den Hochgleisen Bunker anzubringen, in die das ankommende Gut zunächst eingefüllt wird und aus denen es alsdann nach Bedarf entnommen werden kann. Oberbaurat Scheibner hat berechnet, daß man bei allgemeiner Verwendung von Selbstentladern für Massengüter auf den deutschen Bahnen 44 000 Arbeiter und 38 Millionen Mark jährlich ersparen könnte. Die Ausnutzung dieser Möglichkeit ist gewiß ein lockendes Ziel.

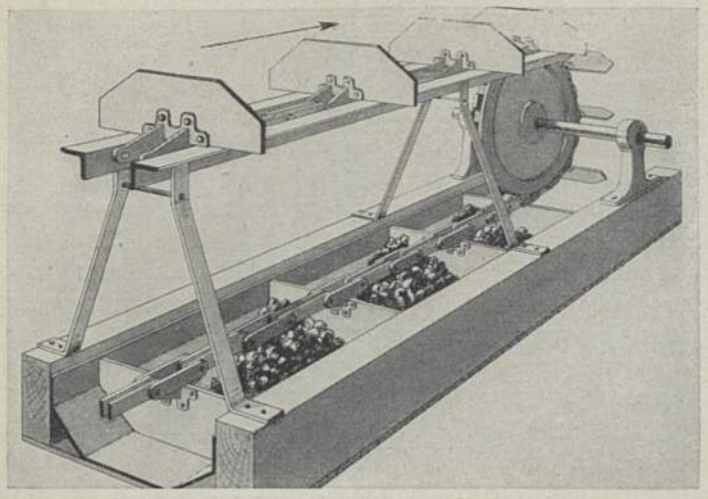
Über den Mangel an einer ausreichenden Zahl von Selbstentladewagen kann man sich durch die Anwendung der Wagenkipper hinweghelfen, die heute ganz vortrefflich durchgebildet sind. Wenn zum Beispiel einer der gewöhnlichen offenen Kohlenwagen auf einem Fabrikhof ankommt, wird er auf eine Plattform gefahren, die um einen wagerechten Zapfen an einem Ende drehbar ist (Bild 4). Sobald kräftige, um eine der Wagenachsen gelegte Haken den Wagen festhalten, wird das andere Ende der Plattform mittels einer Wasserdruck- oder elektrischen Vorrichtung angehoben, bis eine steile Stellung des Wagenbodens erreicht ist. Alsdann öffnet man die klappbare Stirnwand, und die Kohle stürzt hinaus. Da in vielen Fällen eine Zerkleinerung der Kohle durch große Fallhöhe ungünstig ist, findet man Kipp-Einrichtungen, die nicht den ganzen Wagen über die Gleishöhe hinausheben, sondern den Vorderteil unter die Bodenfläche sinken lassen, wodurch er unmittelbar über den Fülltrichter für den Bunker gelangt.



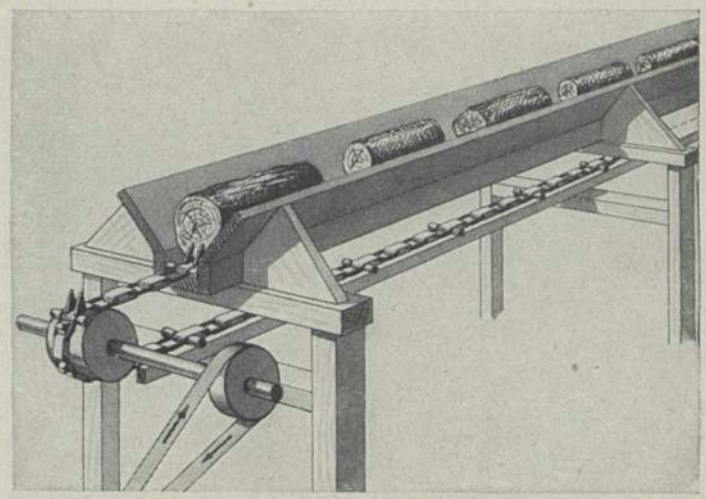
9. Bremsberg-Anlage
Der abwärts laufende beladene Wagen zieht den leeren wieder hinauf
Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

Damit Eisenbahnwagen auch an solchen Stellen gekippt werden können, wo nur vorübergehend entladen wird, sind fahrbare Vorrichtungen erdacht worden. Die von A u m u n d angegebene Bauart besteht aus einem kräftigen, niedrigen Fahrgestell, zu dem ein Gleis von den Fahrschienen schräg emporsteigt (Bild 5). Eine Windevorrichtung zieht den Wagen mittels Drahtseils empor. Das hochgeschobene Fahrzeug kann dann nach Belieben rechts oder links hin geschwenkt werden, damit es seinen Inhalt zur Seite zu entleeren vermag. Der Kipper ist zusammenlegbar, so daß er in Güterzügen befördert werden kann.

Noch großartiger sind die Anlagen ausgebildet, die man zum unmittelbaren Umschlag von Kohle aus Eisenbahnwagen in Schiffe anwendet (Bild 6). Das Schienenfahrzeug gelangt auf hoch liegender Bahn an den Uferrand und steht alsdann auf einer Kippbühne, deren Hinterteil emporgehoben wird. Aus der geöffneten Stirnklappe fällt die Kohle in einen Auffangetrichter, dessen Auslauf zunächst durch eine Klappe



10. Kratzer



11. Schlepper

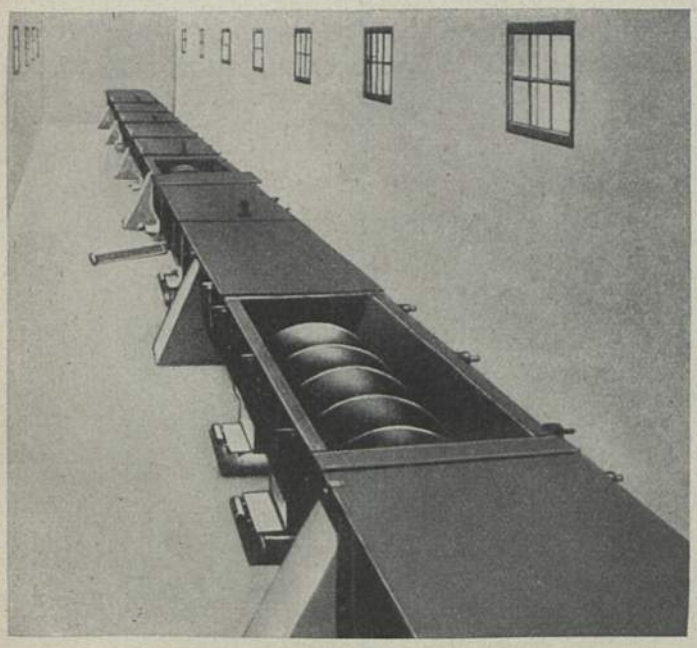
geschlossen ist. Nach Füllung des Trichters wird dieser gesenkt, wobei die untergesetzten Rohre sich fernrohrartig zusammenschieben. Dann erst läßt man die Kohle in den Schiffsbauch laufen, so daß die Fallhöhe nur gering ist.

Zur Entleerung der leichteren Schmalspurwagen, wie sie in Bergwerken angewendet werden, bedient man sich immer häufiger des Kreiselwippers. Eine rasch arbeitende Vorrichtung dieser Art zeigt Bild 7. Der beladene Wagen fährt auf dem rechten Gleis ein, wobei seine Räder unter feste Halteleisten zu stehen kommen. Nun wird der Kipper um seine wagerechte Achse gedreht, so daß der Wagen, auf den Kopf gestellt, seinen Inhalt nach unten ausschütten muß. Ein zweites, früher hineingeschobenes Fahrzeug ist hierbei wieder in die richtige Fahrlage gebracht worden; es wird nach hinten hinausgezogen und durch einen neuen, gefüllten Wagen ersetzt. Mehrwagen-Kreiselwipper gestatten das Entleeren ganzer Züge in Einem Umlauf. Oft sind solche Wipper auf verschiedene Art fahrbar ausgebildet, so daß größere Lager nach Belieben beschüttet werden können.

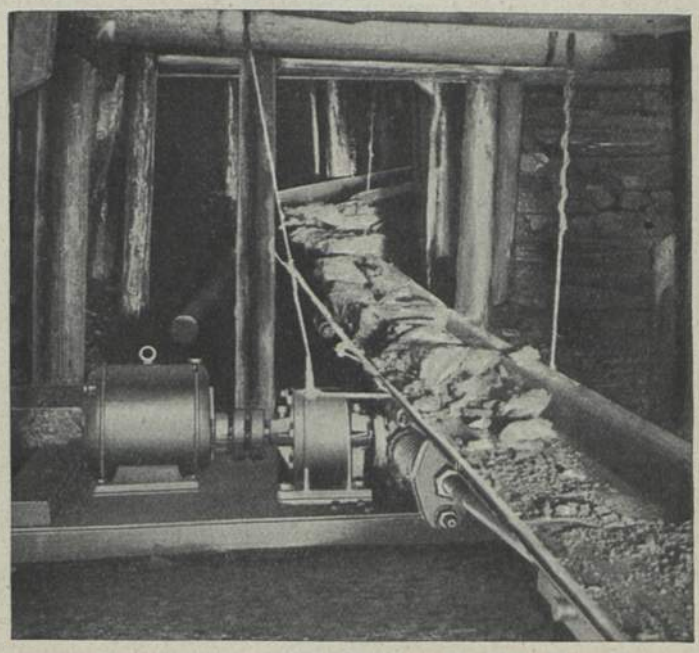
Bis auf die Kreiselwipper haben wir bis jetzt nur solche dem Güterverkehr dienende Vorrichtungen kennengelernt, die im Anschluß an Gleise der öffentlichen Eisenbahnen verwendet werden, also im Bereich von Strecken, die auch der Personenbeförderung dienen. Wir wenden uns nun den Anlagen zu, die ausschließlich der Lastenförderung vorbehalten sind. Von Einrichtungen, die zunächst noch den Eisenbahnen nahestehen und ihrem Vorbild angeglichen sind, werden wir alsbald zu Bauarten gelangen, die ein vollkommen eigenes Gesicht zeigen.

Die einfachste Form des Kunstwegs für Lastenförderung stellt die Feldbahn dar. Sie ist nichts weiter als ein leichtes Gleis, das, durch Querbleche zusammengehalten, auf den flüchtig eingeebneten Boden gelegt wird. Die einzelnen Schienenlängen werden durch Laschen einfachster Art zusammengeschraubt, so daß Verlängerungen und Verlegungen jederzeit schnell möglich sind. Im Krieg haben diese Feldbahnen wichtigste Dienste geleistet, sie wurden zur Überführung von Gütern aller Art bis dicht hinter die Front benutzt.

Im Frieden wird besonders häufig Sand auf ihnen verfahren. Um eine bequeme und rasche Entladung herbeizu-



12. Schneckenförderer für feinkörnige Güter
Bauart Amme, Giesecke & Konegen A.-G., Braunschweig



13. Schüttelrinne mit elektrischem Antrieb
Bauart Siemens-Schuckert-Werke G. m. b. H., Berlin

14. Rollenförderer für Stückgüter
Ausführung der Siegerin-Goldman-Werke, Mannheim

führen, bedient man sich als Fördergefäße der Muldenkipper, die der Volksmund nach dem englischen Wort Lowry gern Loren nennt. Es sind vierrädrige Wägelchen mit muldenförmigen Kasten, die nach jeder der beiden Seiten gekippt werden können. Die Mulden ruhen auf bügelförmigen Böcken. Jeder Bock trägt eine Gleitbahn und eine Feststell-Vorrichtung. Wird diese gelöst, so kann die Mulde nach der andern Seite gekippt werden, ohne daß sie die Möglichkeit hat, vom Fahrgestell abzugleiten.

Die Feldbahnen dienen fast stets nur vorübergehender Verwendung; so findet man sie sehr häufig bei der Aufhöhung von Gelände zwecks baulicher Erschließung tätig. Das Verschieben der Fahrzeuge auf den Gleisen erfolgt von Hand, seltener durch Lokomotiven, die vor langen, zusammengekoppelten Zügen laufen. Wird aber ein Schmalspur-Doppelgleis zur ständigen Förderung von Massengütern in Einer Richtung und für das dazugehörige, laufende Zurückbringen der leeren Fahrzeuge in der anderen Richtung benutzt, dann verwendet man gern einzeln laufende Fahrzeuge und ein ständig bewegtes Zugmittel.

Zum Antrieb der Wagen, die aus einer nahe liegenden Grube Kohle oder Erz ins Werk schaffen, ist häufig Kettenantrieb im Gebrauch. Die Kette, die an geeigneter Stelle über eine Antriebscheibe geschlungen ist, läuft über beiden Gleismitten. Damit sie nicht auf dem Boden schleift, sind Tragrollen vorgesehen. Die Wagen werden an der Beladestelle von Hand auf das von der Kette bestrichene Gleis gestoßen, und das Zugmittel kuppelt sich selbsttätig an.

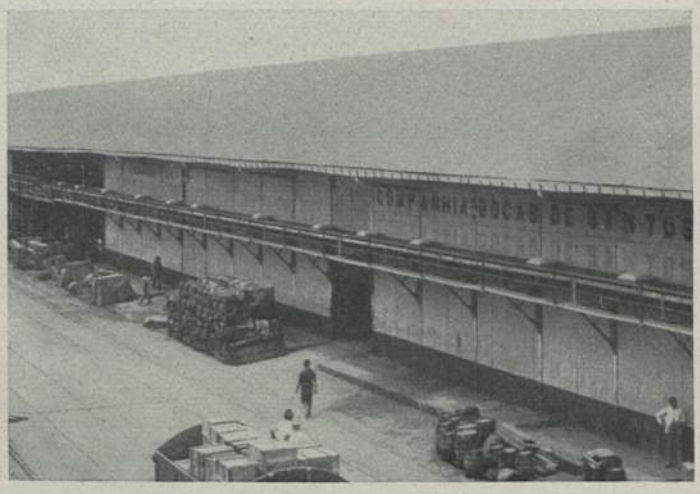
Wenn es sich um eine Strecke handelt, die wagerecht verläuft oder nur ganz geringe Steigung hat, dann genügt es, daß sich die Kette auf die Wagen-Stirnwand auflegt, um die Fahrzeuge bei ihrem ständigen Umlauf mitzunehmen. Bei stärkeren Steigungen bringt man an den Wagen Mitnehmerbleche an, die einen Schlitz besitzen (Bild 8). Ein senkrecht liegendes Kettenglied gleitet dort hinein, das nächste wagerechte Glied legt sich alsdann gegen die Wand des Mitnehmers, so daß der Wagen sicher geschleppt wird.

Dies alles gilt für Betriebe mit Oberkette, die stets das Bestreben hat, auf die Wagen niederzusinken. Wenn Unterkette verwendet wird, müssen an dieser selbst in gewissen Abständen Mitnehmer angebracht sein. Sie legen sich gegen starke Querleisten am Unterteil jedes Wagens.

Ein Gedanke, der auch auf Bergbahnen für Personenbeförderung angewendet wird, kehrt bei den Bremsberg-Anlagen wieder. Diese Betriebsart wird dort benutzt, wo die beladenen Wagen eine Steilstrecke hinab, die leeren Fahrzeuge über diese hinaufgehen. Das ist sehr häufig in Bergwerken der Fall.

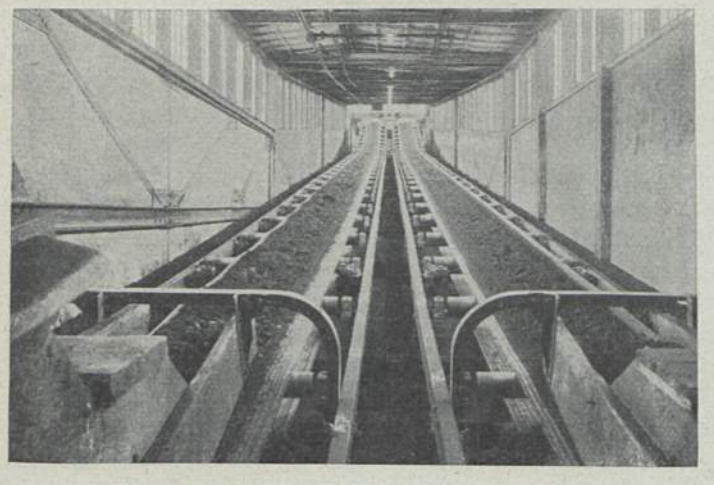
Das Zugseil ist mit seinen Enden an je einen beladenen und einen leeren Wagen geschlagen; oben wird es über eine

15. Verladen von Kaffeesäcken durch Träger

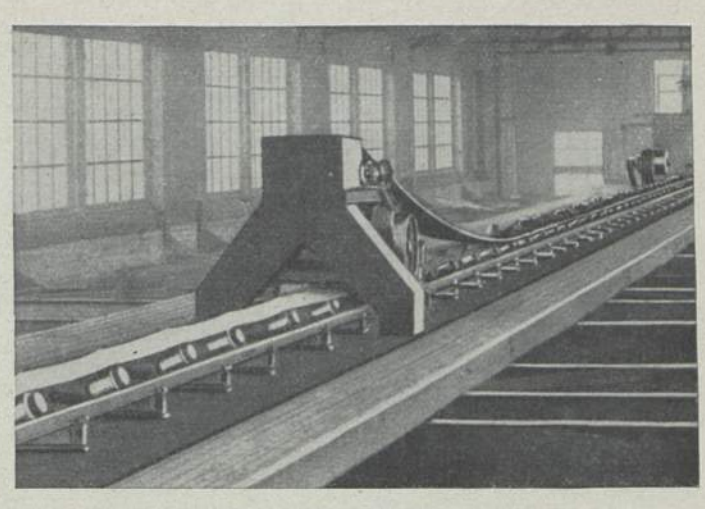


16. Beförderung der Säcke durch das Förderband

Das Förderband ersetzt eine große Zahl von Arbeitskräften und befreit die Menschen von der schweren Schlepparbeit
Ausführung der Amme, Giesecke & Konegen A.-G., Braunschweig



17. Förderband-Anlage für Schüttgut
Der Fördergurt läuft ziemlich rasch über zahlreiche Rollen und kann Steigungen bis zu 25 Grad überwinden
Bauart der AEG, Berlin



18. Förderband mit Abwurfwagen
Mit Hilfe dieses fahrbaren Abwurfwagens kann das Schüttgut an jeder Stelle des Förderbandes abgeladen werden. Bauart von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

Scheibe geführt. Diese kann bis zu völligem Stillstand abgebremst werden. Der hinuntergehende beladene Wagen ist das Treibmittel für die gesamte Anlage, so daß keine besondere Antriebkraft gebraucht wird. Sobald der beladene Wagen unten angekommen ist, wird er abgekuppelt und durch einen leeren ersetzt, während oben ein gefülltes Fahrzeug an Stelle des eingetroffenen leeren tritt. Auf Bild 9 ist in der Mitte des Wegs, wo die beiden Wagen einander treffen, eine Ausweiche vorgesehen.

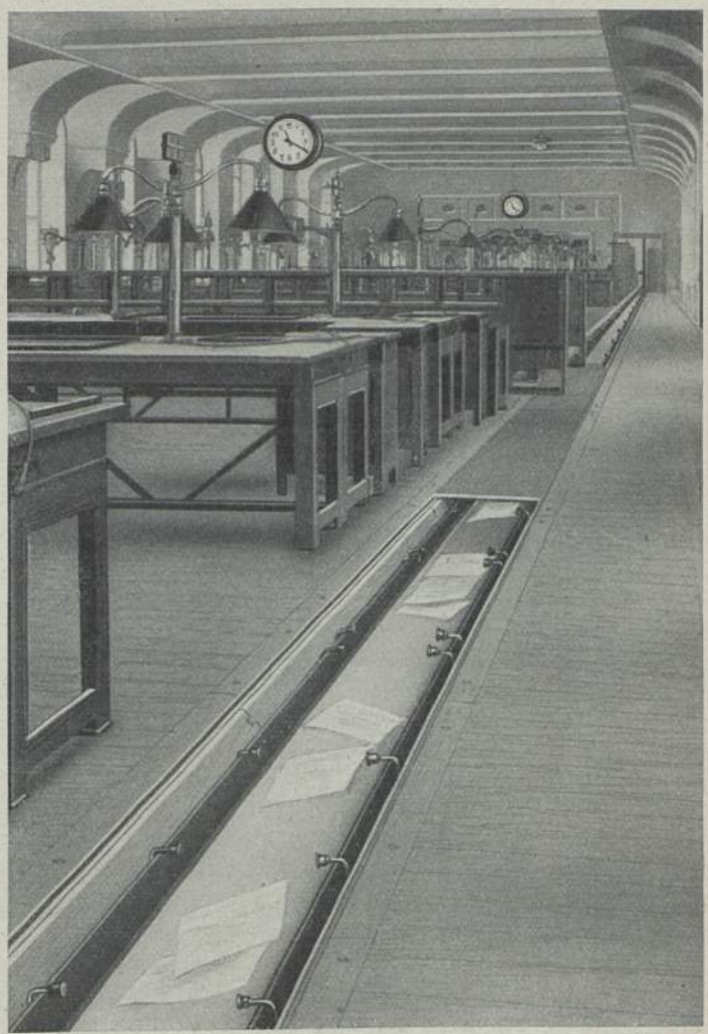
In Gasanstalten bedient man sich zur Fortschaffung des aus den Entgasungsöfen (Retorten) gestoßenen Kokses häufig der Kratzer (Bild 10). Eine solche Vorrichtung besteht aus Schaufeln, die an endloser Kette befestigt sind und von dieser ständig über eine schleifenförmige Bahn gezogen werden. Bei ihrem Lauf über die untere Strecke kratzen die Schaufeln alles Gut fort, das in den zugehörigen Trog geschüttet worden ist. Dieses Fördermittel gestattet, die fortzuschaffenden Massen dem Trog an jeder beliebigen Stelle zuzuführen und sie allerorten abzuziehen. Wo eine Klappe im Trogboden geöffnet wird, fällt die Masse hinaus. Man kann auf diese Weise verschiedene Bunker nacheinander durch einen Kratzer füllen lassen.

Wenn die Kette auf der eigentlichen Förderstrecke unten liegt und nur in längeren Abständen mit Querstäben oder Mitnehmernasen besetzt ist, dann spricht man von Schleppern (Bild 11). Diese eignen sich auch zum Fortschaffen von sperrigen Gütern, wie Holzklötze oder Ballen.

Sollen feinkörnige Güter, wie Mehl, Zement, Sägespäne oder chemische Erzeugnisse, über kurze Strecken gefördert werden, dann bedient man sich gern einer Vorrichtung, deren Betrieb äußerst einfach ist. Durch die Mitte eines Blechgefäßes ist eine drehbare Achse gelegt, an der ein schneckenförmiger Blechstreifen sitzt (Bild 12). Das eingeschüttete Gut wird durch die Gangwände der Schnecke vorwärtsgeschoben, gleich einer Schraubenmutter, die man an der Drehung hindert, während der Gewindebolzen gedreht wird.

Der Wirkungsgrad dieser Vorrichtung ist allerdings nicht sehr gut, da zwischen den Rändern der Schnecke und der Trogwand ein Spielraum von 3 bis 5 Millimeter vorgesehen sein muß, in dem ein Teil der zu fördernden Masse immer wieder zurückbleibt. Nicht selten finden Klemmungen statt, zu deren Beseitigung der Trog mit leicht abnehmbaren Deckeln versehen sein muß.

Fördermaschinen mit eigentümlicher Arbeitsart sind die Schüttelrinnen oder Schüttelrutschen, die besonders häufig in Bergwerken unter Tag zum Fortschaffen der gewonnenen Kohle verwendet werden (Bild 13). Ihr Hauptteil ist eine



19. Untergrundband im Haupt-Telegraphenamt in Berlin
Die erledigten Telegrammblätter werden durch unter dem Boden laufende Gurte in Sammelmulden getragen. Ausgeführt von Ferdinand Schuchhardt A.-G., Berlin

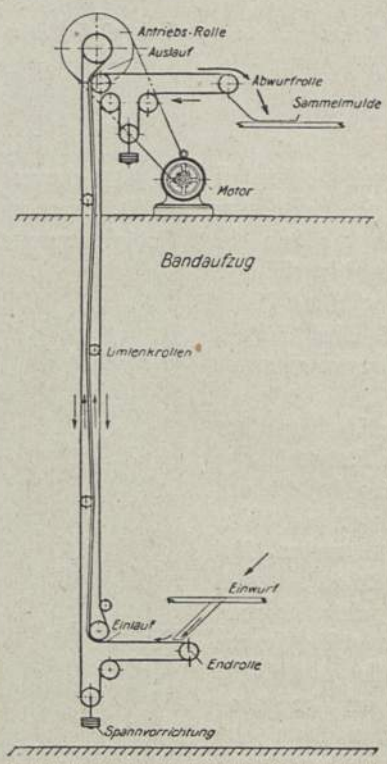
lange Mulde aus Eisenblech, die entweder an der Decke des Stollens aufgehängt oder auf den Boden gestellt wird, wo sie auf schwenkbaren Streben oder auf Rollen gelagert ist. Die Mulde wird durch einen Kurbeltrieb ziemlich rasch hin und zurück bewegt. Man sieht zunächst nicht ein, wie auf diese Weise ein Vorwärtstreiben des aufgeschütteten Guts stattfinden kann. Der Vorgang ist aber sogleich verständlich, wenn man wahrnimmt, daß die Bewegungen nach vorwärts rascher sind als die rückwärts gewendeten.

Die Arbeit der Schüttelrinne hat große Ähnlichkeit mit dem Schaufelwurf. Hierbei nimmt der Arbeiter das Gut gleichfalls auf einer eisernen Platte auf, führt diese langsam nach hinten und darauf rasch nach vorn. Während er alsdann die Schwingung der Schaufel verzögert und schließlich ganz aufhören läßt, bewegt sich das aufgenommene Gut infolge der Trägheit weiter. Dasselbe geht auf der rasch vorwärtsgestoßenen Schüttelrinne vor sich, die zurückkehrt, während das Gut noch ein Stück vorwärts schießt. Dies geschieht besonders lebhaft dann, wenn dafür gesorgt wird, daß die Mulde sich im letzten Augenblick des Vorwärtsgehens ein wenig emporhebt und sofort wieder niedergeht. Alsdann wird das Gut von der Unterstützungsfläche abgehoben, die Reibung mit dieser verringert sich. Die rückwärtsgehende Rinne gleitet unter dem Gut davon, dieses nimmt an der Rückbewegung nur in ganz geringem Maß teil, die gesamte Masse marschiert also ständig nach vorn.

Der Antrieb der Schüttelrinnen erfolgt besonders häufig durch Druckluft, aber auch der Elektromotor wird hierzu verwendet. Es genügen 75 bis 100 Bewegungen in der Minute, um trotz der geringen Straffheit des Fördervorgangs doch eine recht beträchtliche Gesamtleistung zu erzielen. Der Betrieb ist einfach und sicher, was gerade in Bergwerken sehr erwünscht ist, wo immer mit den rauhen Fäusten der Bedienungsmannschaft gerechnet werden muß.

Die Zuführungsstraßen für große Eisenwalzen sind stets mit Rollenförderung ausgerüstet. Diese bestehen aus einzelnen für sich angetriebenen Rollen, die, sich nur um sich selbst drehend, im Raum stillstehen, aber die daraufgelegten Blöcke geschwind vorwärtsbringen, indem eine Rolle sie der andern zuwirft. Die Rollenförderer sind jedoch nicht bloß für die Fortschaffung von Walzblöcken geeignet, sie werden an vielen Orten auch zum Bewegen anderer Gegenstände mit glatten, steifen Böden benutzt (Bild 14). So dienen sie der Förderung von Paketen, Kisten oder Flaschenkasten. Sie sind in der Lage, die aufgelegte Last im Winkel aufwärts zu führen und vermögen auch Krümmungen in der wagerechten Ebene zu überwinden.

Diese letzte Möglichkeit ist einer andern Fördereinrichtung versagt, die aber trotzdem sehr viel häufiger angewendet wird. Die großen neuzeitlichen Getreidespeicher insbesondere vermöchten ohne Gurtförderer nicht auszukommen. Diese breiten Bänder bewegen die Körnermassen ohne Unterbrechung von einem Ort zum andern in bequemster Weise, da das Aufbringen wie das Abnehmen des Gurts sehr leicht vorgenommen werden können. Die bewegten Gurte eignen sich auch zur Fortschaffung rauherer und gewichtigerer Güter, wie Kohle und Erzbrocken, und ebenso zur Förderung großstückiger Lasten.




20. Schema einer senkrechten Band-Förderanlage im Haupt-Telegraphenamt in Berlin

Zwei eng aneinander liegende, in gleicher Richtung laufende Bänder nehmen die Telegrammblätter mit

Wie viele Menschenkräfte durch eine einzige mechanische Anlage ersetzt werden können, zeigen in anschaulichster Weise die Bilder 15 und 16. Die Rücken der zahlreichen Lastträger, die früher die Getreidesäcke aus dem Lager zum Schiff bringen mußten, sind durch die Rücken der Rollen abgelöst, auf denen das Förderband ruht. Jeder, der die beiden Bilder betrachtet, wird wohl aufatmend zugestehen, daß die Technik hier adelnd gewirkt hat, indem sie den Menschen von der ganz groben Schlepparbeit befreite.

Die Fördergurte werden zum größten Teil aus Baumwoll- oder Hanfgeweben gefertigt, die mit Gummiauflage versehen oder mit ähnlichen Stoffen getränkt sind. Da die Bänder selbst nur eine ganz geringe Steifigkeit besitzen, müssen sie sehr häufig durch Rollen unterstützt werden (Bild 17). Am Ende seines Laufs wendet sich jeder Gurt über eine Umkehrrolle nach unten und liegt nun rückkehrend mit seiner Oberfläche auf einer unteren Rollenreihe. Wenn ein Gut gefördert wird, das klebende Reste zurückläßt, bringt man an der Umkehrstelle eine sich drehende, dicht anliegende Reinigungsbürste an, die den Gurt wieder sauber putzt. Je nach der Anhaftungsfähigkeit des Guts können Steigungen bis zu 25 Grad überwunden werden. Das Durchfahren selbst der kleinsten wagerechten Krümmung aber ist, wie schon angedeutet, ausgeschlossen, da der Gurt sich im Winkel in unzulässiger Weise verbiegen würde.

Es ist günstig, das Gut nicht unmittelbar, etwa aus einer Schaufel, auf den Gurt zu geben, sondern es durch einen Trichter zufließen zu lassen. Die Neigung der Trichterwand kann dann so berechnet werden, daß das zuströmende Gut beim Auftreffen auf den Gurt bereits dessen Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit hat, so daß keine Beschleunigungsarbeit mehr zu leisten ist. Da sich die Bänder ziemlich rasch bewegen, trachtet die geförderte Masse an der Umkehrstelle infolge des Beharrungsvermögens danach, weiter zu laufen, so daß der abgeschleuderte Strom leicht aufgefangen werden kann.

Das Entladen braucht nicht immer am Gurtende stattzufinden, es kann an jeder beliebigen Stelle vorgenommen werden. Das Band wird alsdann durch einen Abwurfwagen geführt, dessen Bau aus Bild 18 zu erkennen ist. Er bewirkt ein Anheben des von hinten herankommenden Bands, das alsbald wieder in die ursprüngliche Laufhöhe zurückgebracht wird. Das Abfüllgefäß hat Ausläufe zu beiden Seiten des Bands, und durch Umlegen einer Klappe kann nach Belieben bald in der einen, bald in der anderen Richtung, durch Herausnehmen der Klappe natürlich auch gleichzeitig nach beiden, entleert werden. Wo ein Lager von größerer Ausdehnung in gleichmäßiger Schicht beschüttet werden soll, wird der Abwurfwagen so eingerichtet, daß er mit Hilfe

eines Triebwerks langsam und stetig bald nach vorwärts, bald zurück fährt.

Leichte Massen, wie Getreidekörner, werden auf glatten Bändern befördert. Für die Bewegung von Koks und Erz, von schwereren Gütern überhaupt, eignet sich mehr das muldenförmig gekrümmte Band, dessen Kanten durch schräg gelegte Rollen aufgebogen werden. Beim Rückgang liegt auch hier das Band wieder gerade. Langsam laufende Gurtbänder sind vorzüglich geeignet, Sonderungsarbeiten zu verbilligen. Dort, wo zum Beispiel größere Erzstücke von kleineren und kleinsten getrennt werden sollen, läßt man die gesamte Grubenausbeute auf einem Gurtförderer langsam unter den Händen stillstehender Arbeiter vorübergehen. In deren Greifbereich kommen dann immer wieder neue Erzmassen, ohne daß sie einen Schritt zu tun brauchen.

21. Sammelmulde des Untergrundbandes im Haupt-Telegraphenamt in Berlin
Ferdinand Schuchhardt A.-G., Berlin

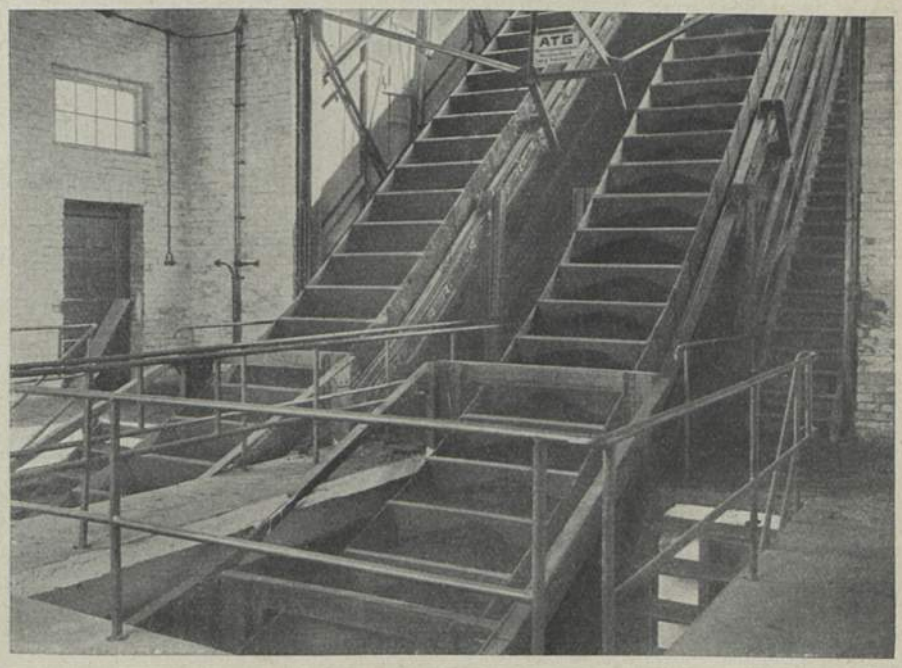
Daß raschlaufende Gurtbänder in vortrefflicher Weise auch zum Bewegen ganz leichter Gegenstände benutzt werden können, zeigt ihr ausgedehnter Gebrauch im neuen Haupt-Telegraphenamt zu Berlin. Die Gurte werden hier zum Fortschaffen von Telegrammblättern über kurze Strecken benutzt. So läuft zum Beispiel in der Mitte des Tischs, an dessen breiten Kanten die sogenannten Leitbeamten sitzen, ein Gurtförderer. Aufgabe der Beamten ist es, auf jedes der ihnen zugestellten Telegramme die Nummer der Leitung zu schreiben, auf der es abtelegraphiert werden soll. Sobald der Leitvermerk gemacht ist, wirft der Beamte das Telegramm auf das Gurtband, und alle so aufgegebenen Blätter zusammen gelangen zu einer Mulde am Ende des Tischs. Von dort kann sie ein einziger Bote weiter zur Seilpost schaffen, durch welche die größeren Entfernungen im Amt überbrückt werden.

Die abtelegraphierten Depeschen-Blätter werden vom Apparat-Beamten in einen Schlitz an seinem Tisch geworfen, von wo aus sie durch einen Quergurt auf ein Förderband gelangen, das im Boden jedes der großen Säle dahinläuft (Bild 19). Am Ende seines Laufs steigt jedes dieser Bänder wiederum zu einer Sammelmulde auf (Bild 21).

Im Haupt-Telegraphenamt ist es auch gelungen, die Gurte für senkrechte Förderung nutzbar zu machen (Bild 20). Es besteht die Notwendigkeit, sehr zahlreiche Telegramme von einer Arbeitsstelle zur anderen gelangen zu lassen, die im höheren Stockwerk darüber liegt. Ein Einzelband vermag diese Arbeit natürlich nicht zu verrichten, da das Papier an dem Gewebe längst nicht so stark haftet, daß es noch in steilster Steigung mitgenommen würde. Man läßt darum die Oberfläche zweier Bänder in gleicher Richtung aneinander laufen. Dadurch, daß beide Bänder im Zickzack geführt sind, legen sie sich so eng aneinander, daß das eingeklemmte Papier von ihnen unbedingt mitgenommen wird.

Dort, wo sehr schwere, scharfkantige Stücke zu befördern sind, die ein weiches Band nach kurzer Zeit unbrauchbar machen würden, ersetzt man das Gurtband durch ein Gliederband. Es besteht aus einzelnen Platten von Holz oder Eisen, die mit schmalen Lücken hintereinandergesetzt sind, im Bedarfsfall aber auch so gelegt werden können, daß keine Ritzen entstehen; die Platten müssen dann einander überlappen. Ein Gliederband-Förderer von größerer Ausdehnung wird im Hamburger Hauptbahnhof dazu benutzt, das Gepäck der Fahrgäste von den vertieft liegenden Bahnsteigen zum Gepäckraum zu bringen.

Wenn man jedes Glied des Bands allseitig mit einem hohen Rand versieht, dann entsteht der Trogförderer (Bild 22). Er setzt sich aus schmalen, ganz dicht aneinander stehenden Gefäßen zusammen und bietet den Vorteil, daß das Gut in weit höherer Schicht aufgegeben werden kann als auf das randlose Band. Solche Trogförderer vermögen, wie unser Bild zeigt, über sehr steile Steigungen zu arbeiten.

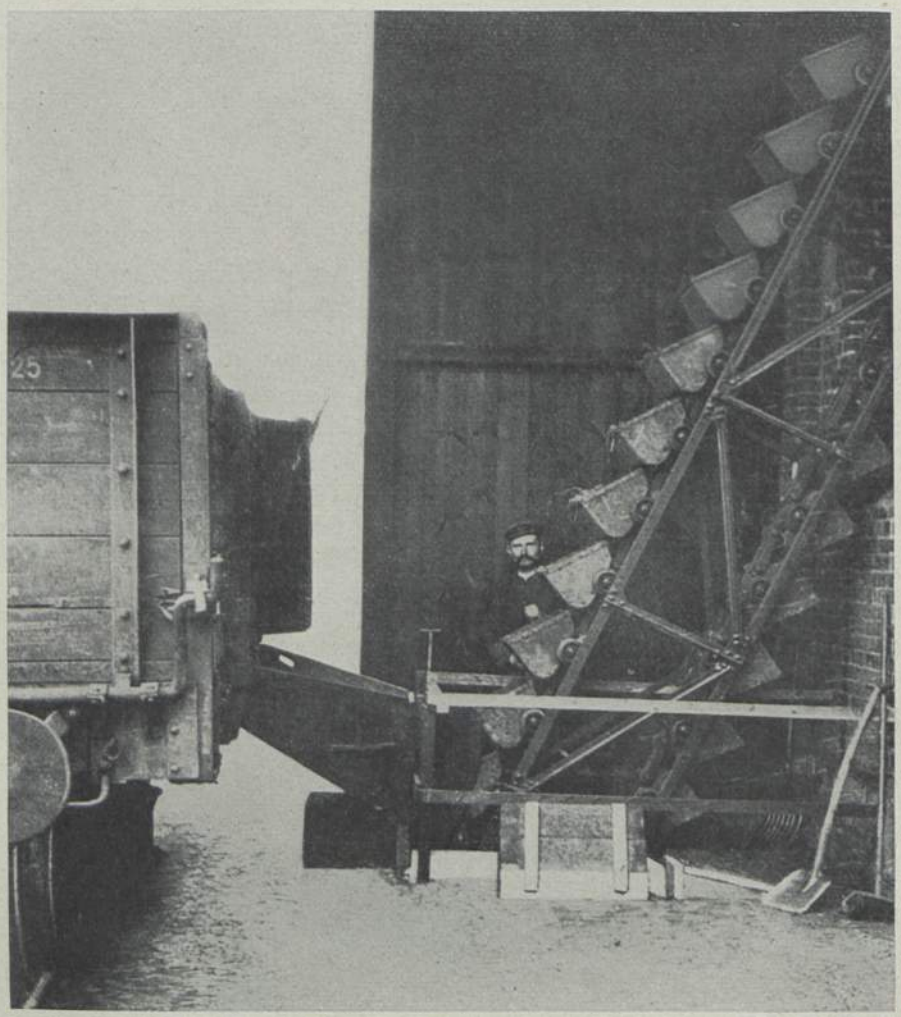


22. Trogförderer
Wird jedes Glied eines Gliederbandförderers allseitig mit Wänden versehen, so kann dieser Trogförderer Schüttgut über sehr steile Steigungen führen. Allgemeine Transportanlagen-Gesellschaft, Leipzig

Sind die Tröge nicht mehr auf eine gemeinschaftliche Unterlage gesetzt, sondern als Einzelgefäße an zwei gleichgerichtet laufende Ketten gehängt, dann ist das Becherwerk entstanden, das zu den meist angewendeten Fördermitteln gehört. Ihre einfachste Form haben diese Vorrichtungen, wenn die Becher fest an den Ketten liegen, so daß also ihre Stellung im Raum von der Kettenlage bestimmt wird (Bild 23).

Solche Becherheber (Bild 25) werden oft zur Getreideförderung benutzt, aber gerade in diesem Arbeitsbereich immer mehr von den Lufthebern (Tafel I) verdrängt. Die hohen Gerüste dieser Maschinen bilden geradezu ein Wahrzeichen aller großen Häfen. Sie scheinen sehr verwickelt gebaut, doch ist ihre Inneneinrichtung grundsätzlich einfach (Bild 24).

Von einer hochliegenden, allseitig geschlossenen Kammer geht ein Schlauch in den Schiffsladeraum hinunter. Kräftige Pumpen saugen ständig die Luft aus der Kammer ab, so daß von unten her ein mit Getreidekörnern stark durchsetzter Luftstrom in den Raum eindringt. Sobald dieser Strom den schmalen Rohrquerschnitt verlassen hat, wird seine Geschwindigkeit geringer, und das Getreide fällt auf den Boden der Kammer nieder. Dieser hat eine Öffnung mit schleusenartigem Verschluß, durch die das Getreide ständig hinausbefördert werden kann, ohne daß die Luftverdünnung im Kammerraum durch Verbindung mit der Außenluft aufgehoben wird. Es wird hier derselbe Grundgedanke verwendet wie bei den bekannten Drehtüren, die gleichfalls den zugehörigen Raum ständig zugänglich und ständig geschlossen halten.



23. Becherförderer mit festen Eimern
Bauart der Amme, Giesecke & Konegen A.-G., Braunschweig

Unter der Kammeröffnung dreht sich ein breites Rad, dessen Speichen keilförmige Tröge umschließen. Der Radkranz läuft zur Hälfte luftdicht in seinem Gehäuse. Wenn einer der Tröge die Drehung in der oberen Hälfte des Radkreises begonnen hat, geht er unter einer Rohrmündung hindurch, die Druckausgleich zwischen der Luft im Trog und der Luft in der Getreidekammer bewirkt. Beim Durchdrehen unter der Kammeröffnung fällt Getreide in den Radtrog, das bei weiterer Drehung ins Freie kommt und nun ins Abfallrohr strömen kann.

Die Düse, mit der das lange Saugrohr in das Getreide eingesetzt wird, trägt einen Aufsatz, durch den immer neue Luft aus der Atmosphäre zuströmt. Mit Hilfe eines Regelschiebers kann hier die Menge der zuströmenden Luft und damit die Fördergeschwindigkeit geregelt werden. Die Bauform der Düse gestattet, das Getreide mit den Lufthebern noch aus den letzten Winkeln des Schiffraums ohne Schaufelarbeit fortzuschaffen. Die Vorrichtungen ermöglichen einen sehr raschen und vorteilhaften Betrieb.

Zu den Becherförderern mit festen Bechern sind auch die Bagger zu rechnen (Bild 26 und 27). Unter ihnen gibt es zwei Geschlechter: die Hochbagger und die Tiefbagger. Die gesamte Vorrichtung, deren Kettenarme in der Senkrechten beweglich sind, so daß die Eimer jeden gewünschten Böschungswinkel bestreichen können, pflegt beim Baggern selbsttätig auf einem Gleis zu fahren, so daß ein langer Abhang ganz allmählich glatt abgetragen werden kann.

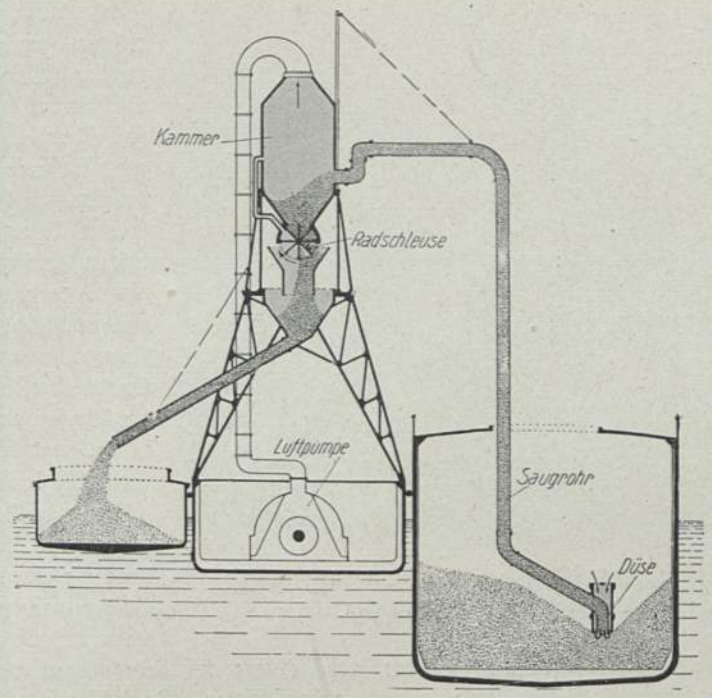
Nach amerikanischem Vorbild werden auch bei uns für sehr umfangreiche Boden-Bewegungen immer häufiger Maschinen einer gänzlich anderen Bauart verwendet. Man nennt die Ungetüme dieser Art Schaufelbagger, Löffelbagger oder Dampfschaufeln (Bild 28). Sie sind nach ihrer Arbeitsweise eigentlich zu den unstetigen Förderern zu rechnen, mögen aber des Zusammenhangs wegen an dieser Stelle kurz erörtert werden.

Der Schaufelbagger besteht aus einem drehbaren Dampfkran, an dessen Ausleger ein Löffel angebracht ist, der vor und zurück geschoben und auch geschwenkt werden kann. Er macht annähernd die Bewegung einer Schaufel. Während die Kranwinde den Löffel hebt, drückt ein Preßzylinder ihn vorwärts, so daß große Schollen in seine Öffnung hineinfallen. Wenn der Löffel gefüllt ist, wird er geschwenkt, es öffnet sich alsdann die Bodenklappe, und der Inhalt stürzt in den Abfuhrwagen.

Buhle macht in seinem Buch „Massentransport" sehr beachtenswerte Mitteilungen über die Tätigkeit der Dampfschaufeln beim Bau des Panama-Kanals. „Sieben solcher Maschinen bewegten während eines Monats 24 500 Kubikmeter Boden, wobei die Hilfstätigkeit von nur 28 weißen und 42 farbigen Arbeitern erforderlich war. Hätte die gleiche

Erdbewegung von Hand ausgeführt werden müssen, so wären dafür 2700 Arbeiter notwendig gewesen. Als die Franzosen den nicht zu Ende geführten Bau des Panama-Kanals betrieben, schafften sie monatlich mit rund 17 000 Arbeitern 216 000 Kubikmeter Boden fort. Mit Hilfe sämtlicher Dampfschaufeln wurden in einem Monat 623 700 Kubikmeter Boden bewegt, und das unter Mitwirkung von nur 7000 Beamten, Aufsehern und Arbeitern.

Wenn die großen Dampfschaufeln beim Bau des Suez-Kanals hätten verwendet werden können, so wäre der Bau statt in 10 bereits in 8 Jahren und statt für 475 Millionen für 380 Millionen Francs herzustellen gewesen."



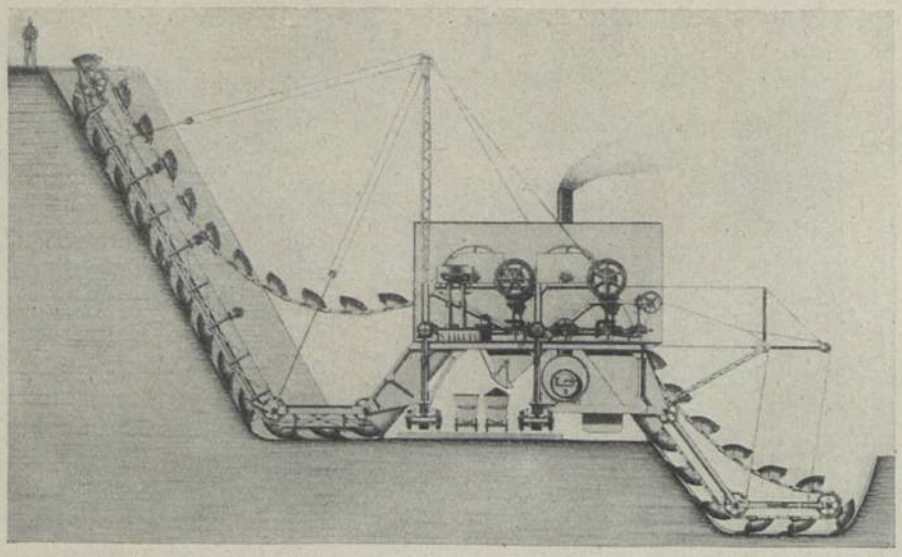

24. Schema eines Getreidehebers mit Saugluftbetrieb

Die Angriffskraft der Dampfschaufel und die stetige Wirkung des Eimerbaggers vereinigt der Schaufelrad-Bagger, den Bild 29 zeigt. Zwar nimmt die einzelne Schaufel längst nicht so viel Fördergut auf wie der große Löffel der eben geschilderten Maschine, dafür wird aber der Betrieb nicht immer wieder durch Schwenken unterbrochen. Denn an jede der Schaufeln ist in dem sich drehenden Radkörper eine Schurre angebaut, durch die das aufgenommene Gut ständig abströmt. Es kann auch in ein Becherwerk geschüttet werden, so daß der in der Tiefe arbeitende Bagger in höher stehende Wagen zu fördern vermag.

Bibl.

25. Getreideheber mit Becherwerk bei der Entleerung von Schleppkähnen
Ausführung der G. Luther A.-G., Braunschweig

Biblioteka Pol. Wrocł.



26. Einrichtung des Trockenbaggers für Hoch- und Tiefbaggerung
Nach einer Darstellung im Deutschen Museum, München

Wenn man die Verteilung schüttbaren Guts, insbesondere von Kohle, nach allen Punkten eines Werks von nicht zu großer Ausdehnung ermöglichen will, dann kann man keine zweckdienlichere Einrichtung wählen als das Schaukel-Becherwerk (Bild 30 und 31). Die Förderer mit festen Eimern heben wohl bequem schräg nach oben oder in der Senkrechten. Sie sind aber nicht imstande, auch wagerechte Strecken fördernd zu durchfahren, da die Becher dann mit ihren Öffnungen zu weit nach unten liegen würden. Erst wenn durch eine teurere und verwickeltere Ausführungsart die Becher so an den Zugketten befestigt sind, daß sie frei pendeln können, ihre Öffnungen also bei sämtlichen Richtungen des Kettenlaufs nach oben kehren, tritt die allgemeine Brauchbarkeit einer solchen Förderanlage ein. Zugleich ist sie imstande, nicht nur Krümmungen in der Senkrechten, sondern auch Richtungsänderungen in der Wagerechten zu durchfahren. Das Becherwerk, an dem die einzelnen Gefäße frei schaukeln können, ist trotz seines anscheinend so starren Baus schmiegsam beinahe wie ein Drahtseil.

Die Anordnung besteht aus muldenförmigen Gefäßen, die breit, aber nicht tief gebaut werden, damit sie beim Kippen ihren ganzen Inhalt sicher ausschütten. Die Becher sind lose auf Achsen gesteckt, an deren Enden Rollen sitzen. Diese laufen beiderseits der Becher auf einem Gleis. Zwischen Tragrollen und Becherwänden liegt auf jeder Seite die leicht biegsame Zugkette.

Aufgabe der Anlage ist meist das Überführen von Kohle aus einem unteren Stockwerk zu einem höher liegenden Bunker. Die Becher werden dann auf dem unteren, wagerechten Lauf gefüllt, steigen senkrecht in die Höhe, um auf dem oberen wagerechten Strang ihren Inhalt auszuschütten. Das Kippen wird durch ein Röllchen bewirkt, das seitlich an jedem Becher sitzt und an gewünschter Stelle einen Anschlag trifft; dieser hält den unteren Teil des Bechers zurück, bis die Auslauföffnung über die Senkrechte hinausgekippt ist, worauf der Becher lebhaft schaukelnd in die ursprüngliche Lage zurückkehrt (Bild 32). Der Anschlag kann auf einem fahrbaren Gestell verschoben werden, so daß die Becher an jeder Stelle zum Ausladen veranlaßt werden können. Der Antrieb der Gesamtanlage erfolgt durch eine Greiferscheibe, deren verlängerte Speichen die Tragrollen jedes vorübergehenden Bechers fassen und um die Krümmung herumziehen.

Damit das freie Schwingen der Becher stattfinden kann, müssen zwischen ihnen Lücken vorhanden sein. Deshalb ist es

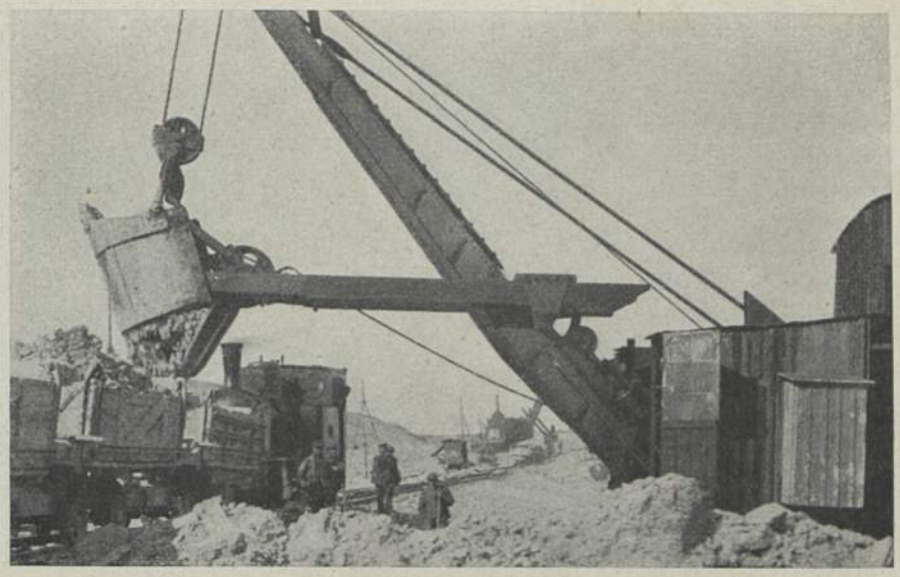
27. Trockentiefbagger

nicht möglich, ein Schaukelbecherwerk durch ständigen Zustrom des Guts zu füllen; es würde hierbei zu viel danebenfallen. Man verschließt daher die Auslaufrinne des Trichters oder Bunkers (Bild 33), aus dem das Becherwerk ladet, mit einer verschiebbaren Klappe. Jeder herannahende Becher öffnet die Verschlußklappe in dem Augenblick, da er sich unter der Auslauföffnung befindet. Es fällt gerade so viel Kohle heraus, daß das Gefäß gefüllt wird, dann schließt sich die Klappe unter Federdruck von selbst und bleibt in dieser Lage, bis der nächste Becher sie aufschlägt.

Wie schmiegsam und gefällig eine Schaukelbecherwerk-Anlage zu arbeiten vermag, möge die kurze Schilderung der Kohlenbewegung im Elektrizitätswerk Südwest zu Berlin-Wilmersdorf zeigen.

Der Brennstoff kommt auf Eisenbahnwagen an und wird von dem zu ebener Erde liegenden Zufuhrgleis aus in Trichter geworfen. Unter deren im Keller gelegenen Mündungen geht das Becherwerk vorbei und füllt seine Gefäße durch absatzweises Öffnen der Trichterverschlußklappen. Darauf steigen die gefüllten Becher senkrecht um mehrere Stockwerkhöhen auf und biegen dann in den wagerechten Lauf ein, der sie über den großen Lagerbunker hinwegführt. Je nach der Stellung des Kippanschlags wird bald die eine, bald die andere Bunkertasche gefüllt.

Wenn der unmittelbar über den Kesseln liegende Kohlenvorrat erschöpft ist, dann werden Auslauföffnungen am Lagerbunker geöffnet und die vorher erwähnten, in den Boden hineingebauten Trichter aus ihnen noch einmal gefüllt. Jetzt schöpft das Becherwerk im Keller von neuem auf, steigt wiederum in die Höhe, kippt aber nunmehr seine Gefäße bereits vor dem Erreichen des Lagerbunkers aus, und zwar unmittelbar in die Becher eines andern Strangs hinein, der rechtwinklig zu dem ursprünglichen dahinstreicht. Dieser zweite Strang führt die Kohle um mehrere Winkel und Ecken des Gebäudes von neuem in die Höhe, bis unter dem Dachfirst der Kesselbunker erreicht ist. Hier entladet der zweite Strang. Aus dem Kesselbunker rutscht die Kohle über eine selbsttätige Wägevorrichtung hinweg durch schräge Rohre auf die Kesselroste, die, selbstbeweglich, den Brennstoff in gleichmäßiger Verteilung durch den Feuerungsraum hindurchtragen.

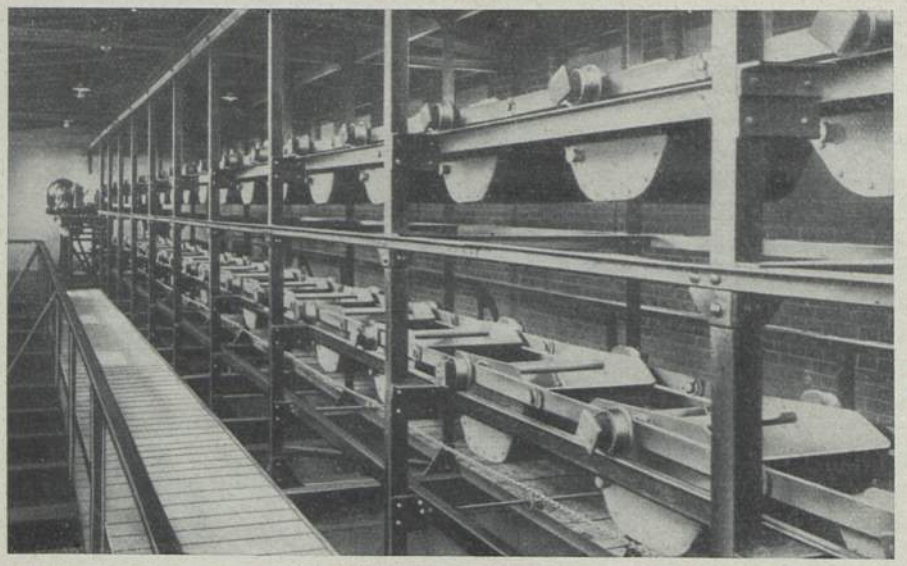


28. Löffelbagger
Bauart der Hanomag, Hannover-Linden

29. Schaufelradbagger
Bauart Humboldt, Köln-Kalk

Es ist selbstverständlich auch möglich, frisch angekommene Kohle sogleich dem Kesselbunker zuzuführen, sie also nicht erst den Umweg über den Lagerbunker nehmen zu lassen. Die Kohlenschaufel ist in einem derart versorgten Werk ein unbekanntes Gerät.

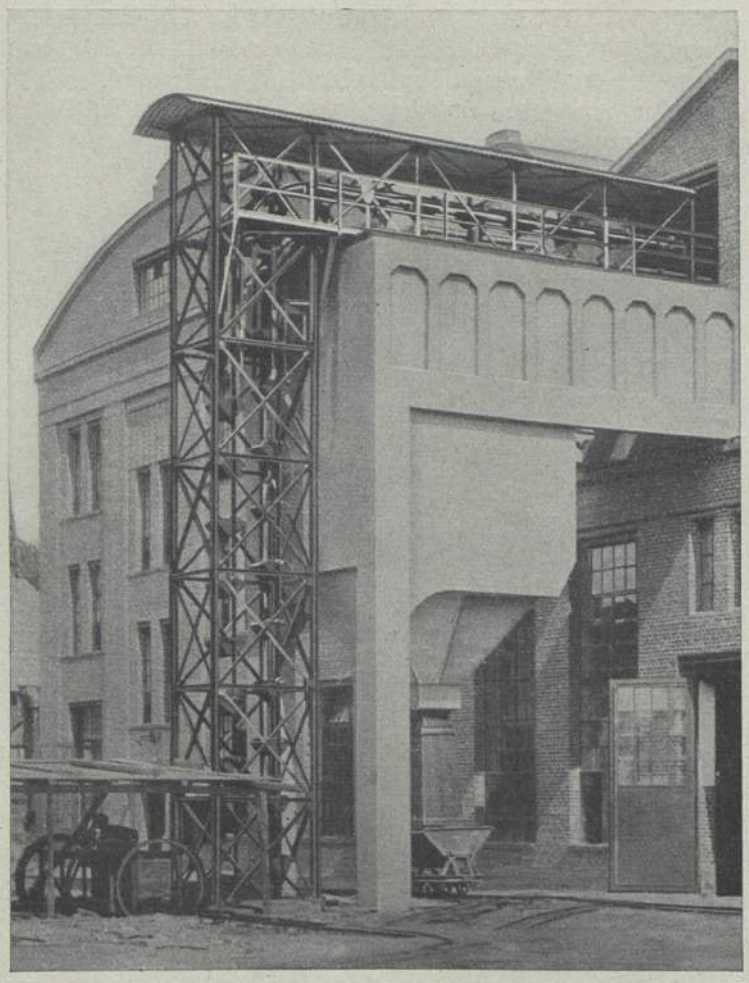
*



30. Wagrechter Strang eines Schaukel-Becherwerks
Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

Die große Zahl der zuletzt besprochenen Fördereinrichtungen ist durchgängig nur zum Bewegen von Gütern über kurze Strecken geeignet. Im allgemeinen bleibt ihr Wirkungsbereich auf einzelne Gebäude oder eng zusammenhängende Häusergruppen beschränkt. Allenfalls kann einmal ein querender Verkehrsweg überschritten werden. Wo Verfrachtung über weite Strecken nötig ist, da muß man sich der Bahnen bedienen. Wir haben die auf der Erde ruhenden Gleisanlagen für Güterförderung schon im Anfang dieses Abschnitts kurz betrachtet. Sie werden in vorteilhaftester Weise durch Schwebebahnen ersetzt, wenn es sich um die dauernde Bewegung großer Gütermassen stets gleichbleibender Art handelt. Für die Fortbewegung von Gegenständen wechselnder Gestalt, also insbesondere zur Bedienung öffentlicher Anlagen, sind die Güter-Schwebebahnen nicht geeignet. Fast ausschließlich steht jede von ihnen im Dienst eines bestimmten Unternehmens, und ihre Aufgabe ist Tag für Tag die gleiche.

Das Hinauflegen der Fördereinrichtung vom Boden in die Luft bietet schon an sich stets eine Reihe von Vorteilen. Der meist kostbare Grundstückraum wird in geringerem Maß in Anspruch genommen, denn es ist ein anderes, ob ein zusammenhängendes Gleis über den Boden geführt ist, oder ob nur hier und da die Füße von Stützen in diesen gesenkt sind. Selbst diese Pfosten können manchmal fortfallen, da die Häuserwände und ohnedies vorhandene Hallenpfeiler Gelegenheit zur Auflagerung des Gleises geben.



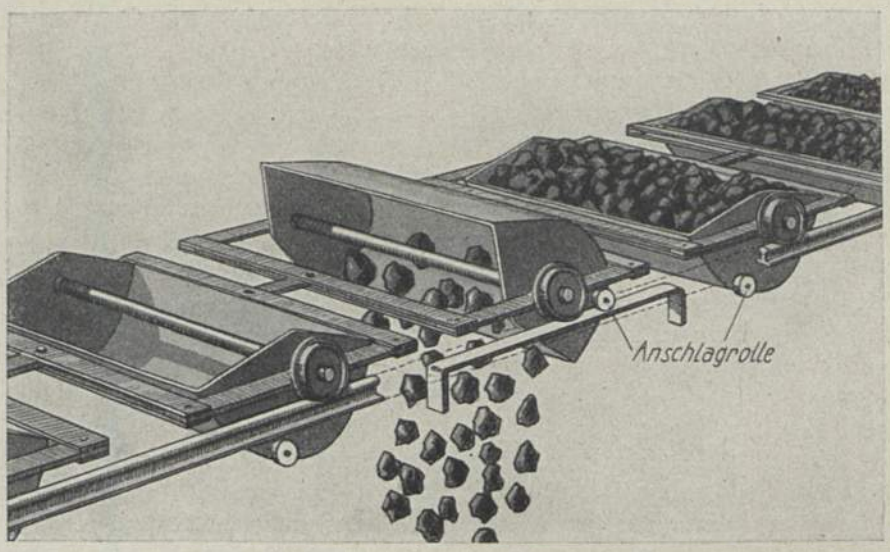
31. Senkrechter Strang eines Schaukel-Becherwerks
Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

Die Güter-Schwebebahnen brauchen keine doppelschienige Streckenausrüstung; sie begnügen sich mit einer einzigen Schiene für jede Fahrtrichtung, wodurch ihr Raumbedarf sehr gering, ihre Schmiegsamkeit bedeutend erhöht wird. Die Wagen sind so am Gleis angebracht, daß der Schwerpunkt unter diesem liegt. Die Fahrzeuge befinden sich daher im stabilen Gleichgewicht, so daß seitliche Pendelbewegungen unschädlich sind. Die Antriebkraft für die Wagen kann wegen der geringeren Reibung zwischen Rädern und Gleis schwächer sein als auf Standbahnen.

Bei Anwendung eines unstarren Gleises wird die Schwebebahn fähig, jedes beliebige Gelände zu überschreiten, Orte miteinander zu verbinden, zwischen denen eine Standbahn gar nicht oder doch nur mit ganz ungeheuren Kosten angelegt werden könnte. Zwischenliegende Eisenbahnstrecken, Flußläufe und sonstige Hindernisse werden ohne jede Mühsal überschritten. Die Fahrzeuge der Schwebebahnen überklettern die steilsten Steigungen, selbst solche von 1 : 1, das heißt unter 45 Grad aufsteigende Strecken, mit Leichtigkeit, und ohne daß die Gefahr einer Verschiebung der Last innerhalb der einzelnen Fahrzeuge auftritt. Denn die hängenden und frei pendelnden Fördergefäße nehmen stets selbsttätig senkrechte Lage ein. Standbahnwagen, wenn sie hier und da einmal über derartige Steilstrecken fahren, müssen auf Untergestelle gesetzt werden, damit ihre Böden keine übermäßige Schräglage erhalten.

Wir haben in der Elberfelder Schnellbahn bereits eine Schwebebahn kennengelernt (Band II, S. 351 ff.). Diese dient ausschließlich der Personen-Beförderung und hat mit den hier

zu erörternden Anlagen nichts als die einschienige Bauform und die Aufhängungsart der Wagen am Gleis gemein. Zur Bewegung von Gütern wird man auf so langer Strecke kaum jemals ein starres Gleis anwenden, sondern sich als Tragkörper für die Fahrzeuge des Drahtseils bedienen. Die Seil-Schwebebahn ist die wichtigste Einrichtung für Lastenförderung über weite Strecken. Wir werden uns zunächst ausschließlich mit dieser Bahngattung beschäftigen.



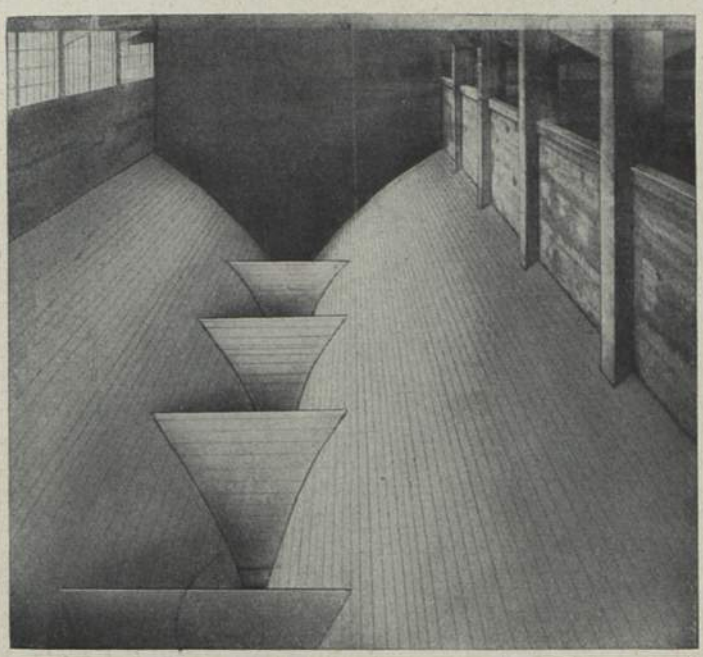

32. Kippvorgang beim Schaukel-Becherwerk

Die Gefäße des Becherwerks werden durch Auftreffen eines kleinen Röllchens auf einen Anschlag gekippt und entleert. Der Anschlag kann an jeder gewünschten Stelle des wagrechten Strangs angebracht werden.

Erwähnt sei, daß uns in der Abteilung „Die Ferneisenbahn" bereits einmal Seilbahnen begegnet sind. Fast alle diese Anlagen waren Standbahnen, auf denen Wagen durch Seilzug bewegt wurden. Nun handelt es sich ausschließlich um Anlagen, die an einschienigem Gleis hängen, also, genauer ausgedrückt, um Seilschwebebahnen, die wir nur des kürzeren Ausdrucks halber und dem technischen Sprachgebrauch folgend gleichfalls als Seilbahnen bezeichnen wollen.

Die Förderanlagen dieser Art bieten den nicht hoch genug einzuschätzenden Vorteil, daß die Abstände zwischen den Unterstützungspunkten des Gleises ganz außerordentlich weit gehalten werden können, während eine Standbahn nahezu ständig, eine Hängebahn mit starrem Gleis immer wieder nach wenigen Metern unterstützt sein muß. Man ist deshalb imstande, mit einer Seilbahn wild zerrissenes Gelände auf sehr stark gekürztem Weg, annähernd in der Luftlinie, zu überschreiten, indem man sich um die zackigen Schroffen und Täler streckenweis überhaupt nicht kümmert, sondern geradeaus darüber hinwegschreitet. In der Ebene ist die geringe Zahl der Stützen für das schon erwähnte Überschreiten von Eisenbahnlinien, Flüssen usw. ebenso wichtig.

Der Gedanke, der den Seilbahnen zugrunde liegt, ist so gut und einfach, daß er den Menschen schon in längst vergangenen Zeiten aufdämmerte. Die Geschichte der Seilbahnen reicht bis ins Altertum zurück. Dieterich hat in seinem Buch „Die Erfindung der Drahtseilbahnen" eine zusammenfassende Darstellung hierüber gegeben, der wir uns im folgenden mit wenigen Abweichungen anschließen.



33. Blick in das Innere eines Bunkers

Bauart Bamag-Meguin A.-G., Berlin

Treffliche Vorbilder finden sich in der Natur. In den Urwäldern bilden die starken Stengel der Schlingpflanzen schwebende Verbindungen zwischen den Stämmen. Die Affen, als kluge Tiere, haben ihre Hände zu Greif- und Hängevorrichtungen ausgebildet und bewegen sich auf ihren langen Wegen an den pflanzlichen Gleisen entlang, ohne je auf den unbequemeren Boden hinunterzusteigen. Der Mensch hat die erste Seilbahn dort geschaffen, wo tiefe Einschnitte in gebirgigem Land ihm das bequeme Vorwärtskommen erschwerten. Vorher mußte man freilich imstande sein, Seile aus Faserstoff herzustellen; diese Erfindung reicht in graue Vorzeiten zurück.

Schon vor mehr als tausend Jahren benutzten die Japaner zur Glättung der Wege in ihrem unebenen Land Seilbahnen. Der Antrieb war, wie wir auf Bild 34 sehen, einfachster Art, und er greift nicht gerade vorbildlich an dem Fördergefäß an; durch die Krafteinwirkung wird es nämlich schief gestellt, was die heutige Technik als durchaus unzulässig erklärt.

Uralt ist auch die Anwendung der Shula oder Chinka bei den Völkern im Himalaja. Sie besteht aus einem an das Seil gehängten Holzklotz, auf dem ein Mensch sitzen kann; mit Hilfe eines zweiten Seils wird der Klotz hin und her gezogen. Wir werden später erkennen, wie weit diese Teilung in Tragseil und Zugseil schon mit der neuzeitlichen Hauptbauart für Seilbahnen übereinstimmt.

Ähnlich wie die Shula werden heute noch Seilbahnen in Kaschmir gebaut, deren sich die Einwohner in der Zeit der Schneeschmelze zur Überschreitung der dann sehr breiten und reißenden Flüsse bedienen. Die Herrichtung einer solchen Anlage ist ja einfacher als der Bau einer Brücke, weil die angehängte lebende Last mit einer ganz schmalen schwanken Aufhängung, dem Tragseil, auskommt, während der aufrecht schreitende Mensch eine breite Plattform unter seinen Füßen oder zum mindesten Gelegenheit haben muß, sich an ein starres Geländer zu klammern.

Nachrichten über Seilbahnen, die in Europa angewendet sind, stammen erst aus dem Mittelalter. Das „Feuerwerksbuch" des Johann Hartlieb, das etwa um 1411 entstanden ist und in der Wiener Stadtbibliothek aufbewahrt wird, enthält die Darstellung einer solchen Fördereinrichtung, die einen Burggraben überschreitet (Bild 35). Ein Mann bewegt mit einem Haspel ein in sich zurücklaufendes, also endloses Seil, durch das der Förderkorb bewegt wird, indem er gleichzeitig daran hängt.

Aus der lebhaft bewegten Zeit der Hussitenkriege in der Mitte des fünfzehnten Jahrhunderts stammen zahlreiche Mitteilungen über Vorläufer noch heute benutzter technischer Einrichtungen. Marianus Jacobus, genannt Taccola, aus Siena, dessen Aufzeichnungen auch für die später darzustellende Geschichte der Krane wichtig sind, teilt mit, daß er im Jahre 1438 eine Seilbahn von der Art gesehen habe, wie sie Bild 36 darstellt. Es handelt sich hier um die Beförderung eines Geschützrohrs der damaligen unbeholfenen Art, einer Bombarde, über eine Schlucht. Das Tragseil ist zwischen einem eingerammten Pflock und einem Baum gespannt. Das Tier zieht die Last an einem zweiten Seil hinüber, indem es landeinwärts schreitet; eine Umkehrung der Förderrichtung ist nicht möglich.

Diese in ihrer Einfachheit ein wenig erheiternd wirkende Anlage wird weit übertroffen durch die Darstellung einer Seilbahn in dem 1617 gedruckten Werk des Faustus Verantius, Bischofs in dem ungarischen Bezirk Zsnad (Bild 37). Diese Anlage zeigt in allen Teilen eine vortreffliche und höchst sachgemäße Durchbildung. Der Förderkorb hängt an Rollen auf dem Tragseil, während wir bisher nur einfache, gleitende Aufhängung gesehen haben, und das Zugseil greift richtig am Laufwerk an, so daß ein Schiefziehen des Wagens vermieden wird. Die Führung des Tragseils über zwei Rollen an jedem Pfosten läßt vermuten, daß es entweder bereits eine selbsttätige Spannvorrichtung besaß, wie wir sie heute anwenden, oder daß wenigstens die Möglichkeit zur Nachspannung von Hand gegeben war.

Trotz ihrer vorgeschrittenen Form gehört aber auch die Seilbahn des Faustus Verantius wie sämtliche bisher erwähnten Bauarten zu den Vorläufern, da sie alle nur eine unstetige Förderung zulassen. Es ist immer nur ein einziges Gleis vorhanden, auf dem also auch nur Ein Wagen verkehren kann, der abwechselnd hin und her gezogen wird. Die erste Seilbahn mit zwei Gleisen, einem hin- und rückführenden also, ist wahrscheinlich im Jahre 1644 von Adam Wybe in Danzig erbaut worden (Bild 38). Sie diente zur Abtragung des Bischofbergs, eines Hügels, dessen Sandmasse zur Anschüttung von Wällen in nicht unbeträchtlicher Entfernung verwendet wurde. Zum ersten Male begegnen wir hier einem Bauteil, der für weitgespannte Seilbahnen unentbehrlich ist: den über die Strecke verteilten Zwischenstützen. Das schematische Bild 38 zeigt ihrer nur zwei, sie waren aber in großer Zahl vorhanden.

34. Alte Seilbahn in Japan

Die Danziger Bahn hatte kein gesondertes Zugseil. Die Eimer wurden mit dem bewegten Tragseil fortgezogen, das hüben und drüben um wagerecht stehende Scheiben geführt war. Ganz unzureichend erscheint die Durchbildung der Auflager auf den Zwischenstützen. Die Fördergefäße konnten nicht in glattem Zug darüber hinweggehen, sie mußten vielmehr jedesmal über die Rollen hinweggehoben werden. Das ist selbstverständlich eine Beeinträchtigung des Betriebs, die heute als gänzlich unstatthaft angesehen werden würde. Die selbsttätig überschreitbaren Seilauflager sind aber erst sehr viel später erfunden worden.

Die Geschichte der Seilbahnen zeigt von hier ab keine bemerkenswerte Fortentwicklung bis über die Mitte des neunzehnten Jahrhunderts hinaus. Denn die kurz vor diesem wichtigen Zeitabschnitt in Benutzung genommenen Fördereinrichtungen bedeuten keinen Fortschritt, sie sind noch ursprünglicher als die älteren Anlagen. Es entstanden damals die auch heute noch bei sehr einfachen Anforderungen verwendeten Riesen. Ihr Name stammt von dem Zeitwort „abriesen", womit man in Berggegenden das gleitende Niedersenden von Lasten, meistens Holzstämmen, über Abhänge bezeichnet. Die Riesen sind kaum als Bahnen anzusprechen; sie besitzen nur einen einzigen Förderstrang, der noch dazu bloß in Einer Richtung benutzt wird. Den Antrieb für die von oben nach unten gleitenden Lasten liefert die Schwerkraft.

Eine größere Riese wurde in jener Zeit von dem Forstmann Hohenstein in der Gemeinde Fai in der Lombardei erbaut; man verwendete sie, um die auf dem Berg Tauccio geschlagenen Baumstämme ins Tal hinabzulassen (Bild 39). Hohenstein spannte kein Seil aus, sondern begnügte sich mit einem Draht. Als Gehänge dienten statt der Rollen einfache Haken. Die sehr geschwind unten ankommende Last wurde durch einen Puffer aus Reisig oder Erde aufgefangen.

Im Jahre 1861 errichtete der Bergassessor Freiherr von Dücker Seilbahnen im Park zu Oeynhausen und bei Bochum, die geringe Länge hatten und von ihm selbst nur als Probebetriebe zur Prüfung der zahlreichen daran verwendeten neuen Bauteile gedacht waren. Die Anlagen besaßen getrennte Trag- und Zugseile und ermöglichten zum ersten Male die selbsttätige Überwindung der Zwischenstütz-Auflager durch die angehängten Wagen. Damit war ein höchst wichtiger Fortschritt erreicht, und Dücker gebührt zweifellos ein Ehrenplatz in der Geschichte der Seilbahnen, wenn seine Bauart auch noch nicht alle neuzeitlichen Ausrüstungsstücke aufwies. Jahre währte es aber, bis dem Erfinder Gelegenheit gegeben wurde, eine Seilbahn der von ihm erdachten Art für den praktischen Betrieb auszuführen. Im Jahre 1872 legte die Ver-

waltung der Festung Metz eine Seilförderanlage von zwei Kilometern Länge zur Verbindung des Bahnhofs mit dem im Bau befindlichen Fort Queuleu an. Sie diente zum Hinüberschaffen von Bruchsteinen und sonstigen Baustoffen. Es fand stetiger Betrieb auf doppeltem Seil statt; über den einen Strang gingen die beladenen Wagen zur Baustelle, auf dem anderen kehrten die leeren zum Bahnhof zurück. Nach Dückers Angaben waren die Stützen, an denen beide Tragseile eng benachbart hingen, so ausgeführt, wie Bild 40 es zeigt. Das Tragseil lag in hakenförmigen Stützen, deren Gestalt den Wagen gestattete, glatt darüber hinwegzufahren.

Jedes Fahrzeug hing an zwei Rollen; die Gehänge-Eisen waren gekröpft, so daß sie den Gesamtschwerpunkt des Fördergeräts senkrecht unter das Tragseil verlegten. Die kippbar eingehängten Wagenkasten wurden während der Fahrt durch einfache Verriegelungen in aufrechter Stellung festgehalten. Das Zugseil griff ziemlich tief am Gehänge an, wodurch eine ungünstige Einwirkung auf die Stellung der Wagen während der Fahrt eintrat. Sie hatten die Neigung, sich schief zu stellen, und verloren den größten Teil der für einen glatten Lauf notwendigen Pendelfähigkeit. Die beiden Rollen, die auf dem unteren Querholz jeder Stütze angebracht waren, dienten dem Zugseil zum Auflager, falls dieses einmal wegen allzu großen Abstands der Fahrzeuge stark durchhing.

35. Seilbahn über einen Burggraben
Aus dem „Feuerwerksbuch" des Johann Hartlieb
Wiener Stadtbibliothek

Die Anlage hat ihren Zweck erfüllt, zur unmittelbaren Nachfolge aber nicht angeregt, da es sich gezeigt hatte, daß viele Teile allzu schnell abgenutzt wurden. Der Grund hierfür lag in den zahlreichen Mängeln, die Dückers Bauart noch aufwies. Die Tragseile waren an beiden Seiten fest verankert und mußten daher straffer gehalten werden, als es für ihre Dauerhaftigkeit günstig war. Die Befestigung des Zugseils am Gehänge wurde durch eine schraubstockartige Klemmvorrichtung bewirkt, die beim Schließen und Lösen auf dem Zugseil rutschte und dieses hierdurch rasch verschliß. Wenn auch der freie Übergang der Wagen über die Zwischenstützen erreicht war, so mangelte doch noch vollständig die glatte Durchführung an den Streckenenden von dem einen Tragseil auf das andere. Die Wagen mußten dort stets mit der Hand vom Zugseil gelöst, über die Krümmung geschoben und drüben wieder von Hand angekuppelt werden. Ein Betrieb von der Art, wie er heute von einer vollkommenen Seilbahn verlangt wird, konnte also auf der Metzer Anlage nicht stattfinden.

In der Zeit, die zwischen der Errichtung von Dückers Probeanlagen und der größeren Ausführung in Metz lag, hatte auch der Engländer Hodgson eine Seilbahn-Bauart ersonnen und zu Leicester in einer Betriebsstrecke ausgeführt, die drei englische Meilen lang war. Die Anlage unterschied sich von der Dückerschen Bauart grundsätzlich dadurch, daß bei ihr nicht zwei Seile auf jeder der beiden Fahrstraßen, sondern nur eines angewendet wurde. Das Tragseil war zugleich Zugseil, da es sich ständig fortbewegte; die daran aufgehängten Wagen wurden einfach durch Reibung mitgenommen. Diese Einseil-Bauart ist in England häufiger angewendet worden und auch heute noch dort zu finden; sie heißt daher die englische. Einzelausführungen fanden auch in Frankreich statt. Die Welt erobert aber hat allein die Zweiseil-Bauart, die als die deutsche bezeichnet wird.

Sie wurde zu technisch wirklich brauchbarer Form von Adolf Bleichert ausgebildet. Seine Arbeiten, die zum größten Teil völlig selbständig sind, haben der Industrie erst das überaus nützliche Werkzeug der Seilbahnen geschenkt. Die von dem Erfinder begründete und noch heute geleitete Firma Adolf Bleichert & Co. in Leipzig-Gohlis hat Förderanlagen in allen Teilen der Erde gebaut und sehr viel dazu beigetragen, die Leistungsfähigkeit der deutschen Technik auch in den entferntesten Ländern bekanntzumachen.

Bleichert war der erste, der alle Einzelteile sorgsam und auf Grund von Rechnungen durchbildete. Er führte die selbsttätige Tragseilspannung ein und ermöglichte die Erbauung von Strecken beliebiger Länge dadurch, daß er auch Spannvorrichtungen ersann, die in die laufende Strecke eingefügt werden können. Er erfand die selbsttätige Kupplung für Wagen, die durchlaufenden Betrieb unter allen Umständen gestattet, er schuf Vorrichtungen zum Spannen der Zugseile, arbeitete Winkel-Überführungsanlagen und Weichen in vollendeter Weise aus.

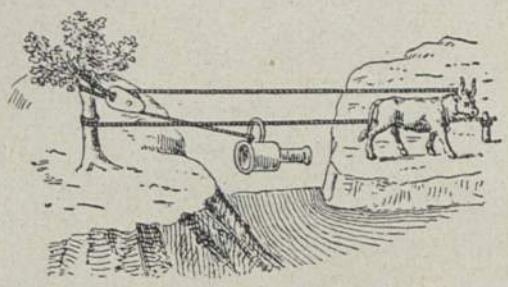
Die grundsätzliche Ausbildung einer Bleichertschen Drahtseilbahn zeigt Bild 41. Wir sehen, daß die beiden Gleise, die für Hin- und Rückfahrt dienen, zu einer geschlossenen Schleife vereinigt sind. Dort wo die Endkrümmungen beginnen, gehen die Wagen vom Tragseil auf feste Schienen über. Grundsätzlich muß bei Seilbahnen ein starres Gleis überall da verlegt werden, wo die Strecke von der geraden Richtung abweicht. Fast stets wird hierfür die Doppelkopfschiene angewendet, deren Querschnitt oben und unten verdickt ist und dem Verbiegen durch die Hängelast den größten Widerstand leistet.

Die Benutzung des Starrgleises in Krümmungen ist notwendig, weil ein biegsames Seil ja niemals in glattem Bogen verlegt werden kann; es wird sich zwischen zwei Stützen immer gerade strecken, so daß statt der stetigen Krümmung eine gebrochene Linie entstehen würde.

Die Tragseile werden am Beginn der festen Schiene scharf abwärts gebogen und auf der einen Seite zu einer festen Verankerung hinabgeführt. Drüben aber wird ihr freies Ende mit Gewichten belastet, die meist aus eisernen, mit Betonklötzen gefüllten Kasten bestehen. Diese Gewichte, die ein Stück über dem Erdboden schweben, halten das Tragseil immer straff. Gleichzeitig aber wird eine Beanspruchung des Seils über die Schwere der Spanngewichte hinaus

unmöglich. Ein Tragseil, das beiderseits fest verankert ist, kann durch Aufbürden einer zu hohen Last zerrissen werden; hier werden in solchem Fall einfach die Gewichte angehoben.

Die auf Bild 41 dargestellten Endschleifen werden nicht mehr von dem Zugseil bestrichen, da dieses vorher zu seiner Führungsrolle abbiegt. Wo das der Fall ist, müssen, wie einst, die Wagen von Hand über die Schleifen geschoben werden. Wir werden aber später sehen, daß heute auch das Zugseil leicht jeder Gleiskrümmung angepaßt werden kann, so daß die Wagen, wo das erforderlich und nützlich ist, über die gesamte Streckenausdehnung mit mechanischem Antrieb zu fahren vermögen. Bleichert hat seine erste nach Bild 41 gestaltete Seilbahn im Jahre 1874 in Teutschental bei Halle für die Solaröl- und Paraffin-Fabrik gebaut.

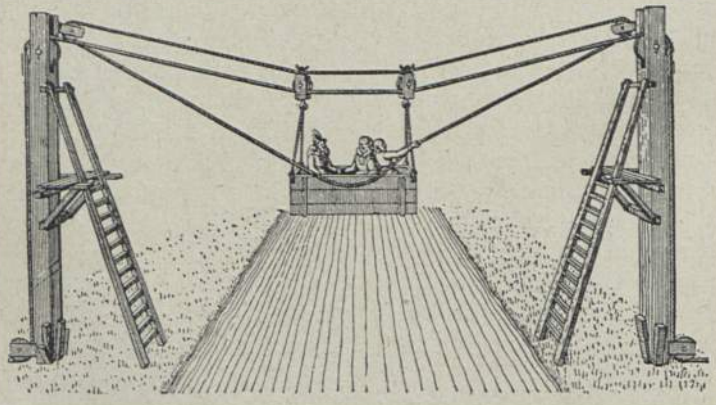


36. Seilbahn zur Beförderung eines Geschützrohrs
Nach Marianus Jacobus

*

Wenn wir nunmehr die wichtigsten Einzelteile einer neuzeitlichen Seilbahn-Anlage näher betrachten, haben wir unsere Aufmerksamkeit zunächst dem schwankenden und doch so widerstandsfähigen Gleis zuzuwenden. Es besteht aus Drähten von bestem Tiegelgußstahl, die jedoch nicht einfach nebeneinandergelegt, sondern schraubenförmig verwunden sind. Hierdurch wird bewirkt, daß alle Teildrähte gleichmäßig beansprucht werden, während bei nicht ganz genauer Anspannung gleichgerichteter Drähte einzelne leicht überlastet werden können. Die Einsicht, daß schraubenförmig verwundene Fasern eine höhere Tragfähigkeit haben, ist uralt. Die Seile aus Faserstoff, die in der Vorzeit angewendet worden sind, zeigen schon diese Bauart. In Pompeji hat man ein Seil gefunden, das aus Bronzedrähten gefertigt ist, und es wird angenommen, daß bereits die Ägypter Metallseile benutzt haben.

Die neuzeitliche Form, die Herstellung im Großbetrieb möglich macht, ist jedoch erst im Jahre 1831 von Bergrat Albert in Clausthal erfunden worden. Die Fabrik von Felten & Guilleaume war die erste, die Alberts Gedanken verwertete, und das von ihr begründete Carlswerk bei Köln ist noch heute eine der größten Drahtseilfabriken der Erde.



37. Seilbahn des Faustus Verantius

Die gewöhnlichen Drahtseile, die zum Tragen und Heben von Lasten sowie zu Verspannungen verwendet werden, stellt man aus runden Drähten in der Art her, die Bild 42 links zeigt. Für Fahrseile eignet sich diese Bauart, die man die offene nennt, jedoch nicht, da keine glatte Oberfläche vorhanden ist. Die zu oberst liegenden Drähte würden durch die Tragrollen der Wagengehänge stärker beansprucht als die anderen und leicht verquetscht werden. Wenn ein einzelner Draht bräche, würde er aus dem offenen Seil herausspringen, von dem nächsten darübergehenden Fahrzeug mitgerissen und noch weiter aufgerollt werden, so daß hierdurch leicht eine Betriebsstörung eintreten könnte. Man stellt die Seilbahngleise daher stets aus verschlossenen Drahtseilen her, deren Außenseite ganz glatt ist.

Die äußeren Drähte erhalten hier S-förmigen Querschnitt. Sie liegen fest auf einem inneren Kranz von trapezförmigen Drähten, der sich selbst wieder auf einen Kern aus Runddrähten stützt. Durch diese Bauart findet eine gleichmäßige Verteilung des Rollendrucks statt. Ein beschädigter Draht kann auch nicht mehr ausspringen, da er von den Nachbarn gehalten wird.

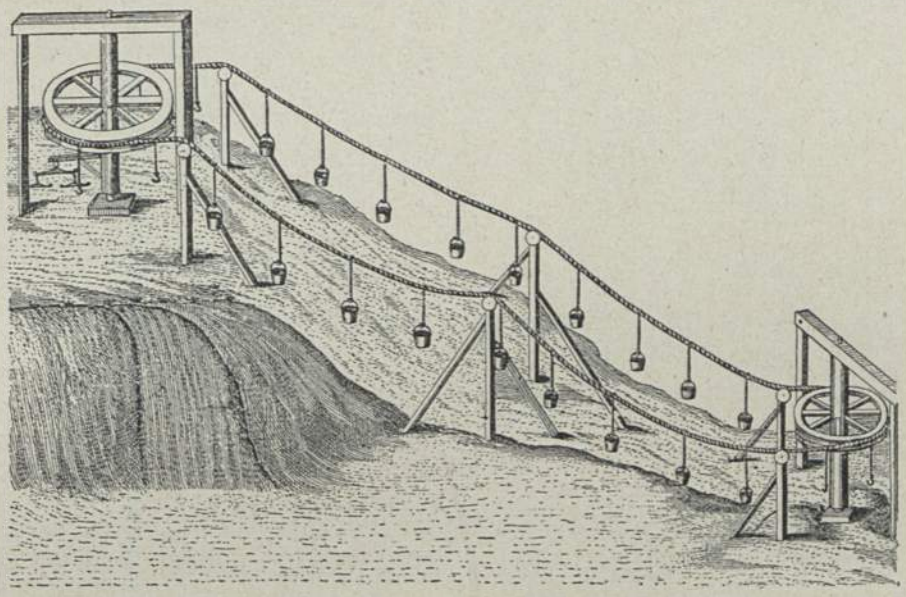
Es ist nicht möglich, Drahtseile von vielen Kilometern Länge aus Einem Stück zu fertigen. Auf langen Strecken sind daher die einzelnen Herstellungslängen durch Kupplungen miteinander zu verbinden. Die zur Verknüpfung der Seilenden verwendeten Muffen müssen derart gebaut sein, daß sie nur eine geringe Verdickung des Seil-Querschnitts verursachen, weil die Wagen sonst nicht glatt darüberfahren könnten (Bild 43). Außerdem spitzt man die Muffen nach den Enden hin zu, um den Übergang möglichst bequem zu gestalten. Die Verbindungsstücke bestehen aus zwei Teilen, die durch ein Schraubstück vereinigt werden. Die Einzeldrähte des auf jeder Seite eingesteckten Seilendes werden auseinandergespreizt und entweder mit Weißmetall ausgegossen oder durch Keile in der Spreizlage gesichert. Ein Ausreißen ist hierdurch unmöglich gemacht. Nachdem die Mittelschraube angezogen ist, wird sie durch eingesteckte Splinte gegen Lösen gesichert.

Es ist auf den heutigen Seilbahnstrecken möglich, freie Spannweiten von 1000 Metern und mehr auszubilden. Man braucht also im Notfall nur etwa an das Ende jedes Streckenkilometers eine Stütze zu setzen. Die dazwischenliegende Bodengestaltung ist gleichgültig. Und das eben befähigt die Seilbahnen, Gelände zu überbrücken, das sonst undurchdringlich wäre. Steigungen bis 1:1, gleich einem Winkel von 45 Grad, werden mit Leichtigkeit überwunden. Das Tragseil hängt zwischen den Stützen durch. Je größer die Entfernung ist, desto tiefer wölbt sich die Durchhängung hinunter.

Wegen der Reibung des Seils auf den Stützlagern können die End-Spanngewichte nur über eine beschränkte Länge wirken. Ist die Strecke sehr ausgedehnt, dann ziehen sie nicht mehr durch, und es müssen Zwischen-Spannvorrichtungen eingelegt werden. Man bringt sie der Bequemlichkeit halber für beide Seile an einem gemeinschaftlichen Gerüst unter. Die Wagen laufen innerhalb der Abspann-Gerüste auf starren Schienen, unter denen die Seile zu den Gewichten abbiegen. An jedem Seil hängen zwei Belastungskasten; der eine strafft nach rechts, der andere nach links. Das zwischenliegende Seilstück ist ungespannt, wenn es nicht überhaupt fehlt, da man zur Verringerung der Kuppelstellen Zwischen-Spannvorrichtungen gern dort anbringt, wo Seilenden liegen.

Die Stützen, die man auf bequem zugänglichem Gelände in Abständen von etwa 100 Metern zu setzen pflegt, sind

entweder aus Holz oder aus Eisen gefertigt. Holzstützen haben meist Torform, wie auf Bild 40, während die eisernen Pyramidengestalt erhalten (Bild 41). Die Auflagerschuhe, in denen die Tragseile ruhen, sind so ausgebildet, daß das Seil in einer vertieften Mulde ruht. Die hinübergleitenden Wagenrollen werden von geeignet geformten Seitenleisten der Auflagerschuhe getragen (Bild 44). Hierdurch wird verhindert, daß die Last das Seil auf die feste Unterlage preßt und flachdrückt, wodurch es sich festklemmen und seine freie Beweglichkeit in der Längsrichtung verlieren würde.



38. Seilbahn zu Danzig, um 1644
Nach Jacob Leupold, Theatrum machinarum hydrotechnicarum, Leipzig 1724

Wegen des Seildurchhangs fahren die Wagen, sobald sie sich einer Stütze nähern, stets eine Steigung hinauf und dahinter über eine Neigung hinunter. Damit sich das Seil in keinem der beiden Fälle von der Unterlage abhebt, wird der Schuh drehbar angeordnet. Er kann sich also unter dem Zug des belasteten Seils sowohl nach rechts wie nach links neigen. Bei jeder Wagendurchfahrt führt er eine Kippbewegung aus.

Wegen der Größe des Durchhangs bei sehr weitem Stützabstand in zerrissenem Gelände wird es öfter notwendig, die Stützen zu hohen Türmen auszubilden, damit an allen Stellen genügende Durchfahrthöhe unter dem hängenden Seil sichergestellt ist. Bild 45 zeigt eine eiserne Stütze, welche die beträchtliche Höhe von 55 Metern hat. Die Ausbildung ungewöhnlich hoher Tragtürme wird manchmal auch in der Ebene notwendig. So ist die Seilbahn der Portland-Zementfabrik Alsen bei Itzehoe bei der Überschreitung des schiffbaren Stör-Flusses in 52 Metern Höhe aufgehängt, damit die Schiffsmasten noch unter der tiefsten Durchhangstelle hindurchgelangen können.

39. Drahtseilriese von Hohenstein in Fai, 1859
Nach G. Dieterich, Die Erfindung der Drahtseilbahnen

Das Zugseil, das heute stets am Fahrgestell der Wagen angreift, liegt bei ebenen Bahnen meist über, auf Strecken mit starken Steigungen stets unter dem Tragseil. Das Zugseil hat geringeren Querschnitt als das Tragseil, und es muß biegsamer sein als dieses, denn die Wagenkupplungen, in die es an fortwährend wechselnden Stellen eingespannt wird, zwängen es in eine vielfach gebrochene Lauflinie. Man stellt deshalb das Treibseil aus vielen dünnen, zu Einzellitzen verwundenen Drähten her, die eine Hanfseele umschlingen (Bild 46). Eine solche Bauart setzt den Verbiegungen keinen hohen Widerstand entgegen.

Der Antrieb erfolgt durch eine Scheibe, über die das Zugseil an Einem Streckenende geführt ist. Bei langen Bahnen, über die zahlreiche Wagen zu fördern sind, genügt es nicht, das Zugseil nur einfach in halber Umschlingung um die Treibscheibe zu legen. Um die Gefahr des Gleitens wegen zu geringer Reibung auszuschließen, nimmt man zur festeren Verbindung zwischen treibender Scheibe und getriebenem Seil eine zweite Scheibe von geringerem Durchmesser zu Hilfe (Bild 47). Das auflaufende Seilstück wird um etwa $^5/_8$ des Treibscheiben-Umfangs herumgelegt, geht alsdann um die kleinere Scheibe und umschlingt das Treibrad noch einmal in gleichem Umfang, um dann erst abzulaufen. Der Antrieb kann selbstverständlich durch jede Kraftmaschine erfolgen.

Auf der Gegenseite ist das Treibseil nur in halber Umschlingung um eine Scheibe geführt, deren Achse verschiebbar gelagert und durch ein nach außen ziehendes Gewicht belastet ist. Auf diese Art wird das Zugseil gerade wie das Tragseil immer vollständig gespannt gehalten.

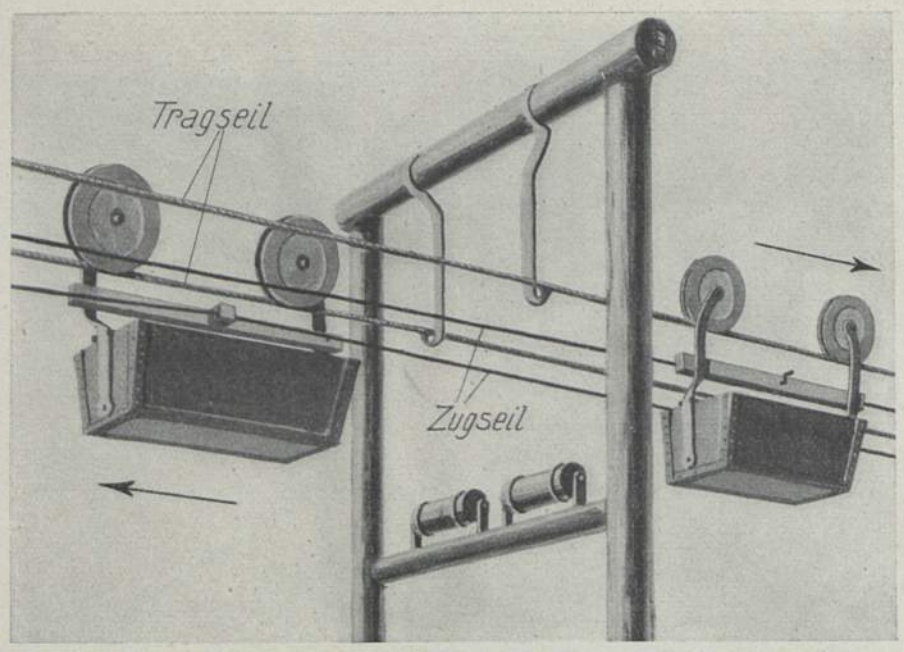
Die Fahrzeuge der Seilbahnen zeigen sehr mannigfaltige Formen. Für Schüttgüter benutzt man gewöhnlich Kippmulden, die während der Fahrt über die Strecke durch ein Hebelschloß gegen das Kippen gesichert sind (Bild 48). An der Entladestelle kann die Entriegelung von Hand oder auch selbsttätig durch einen Anschlag bewirkt werden, so daß die Entleerung ohne Zutun eines Menschen vor sich geht. Manche dieser

Kippmulden sind so gebaut, daß sie sich nach dem Ausschütten des Guts von selbst wieder aufrichten, weil der Schwerpunkt des leeren Kastens unter der Kippachse liegt, und sich auch selbsttätig verriegeln. Alsdann vermögen sie ohne menschliches Zutun auch einzuladen.

Zur Aufnahme scharfkantiger Bruchsteine, die einen starken Verschleiß der Wagenwände hervorrufen, bildet man die Kasten aus leicht wechselbaren Holzknüppeln. Ziegel werden auf Plattformwagen, Strohballen und ähnliches leichtes Gut auf hakenförmigen Fahrzeugen, Fässer in einfachen Gehängen fortbewegt (Bild 49). Grubenwagen können durch zwei Löcher in den Stirnwänden dazu befähigt werden, vom Kleinbahngleis, das auf dem Boden ruht, auf die Seilbahn überzugehen, wie überhaupt häufig Vorsorge für wechselnde Benutzung von Luft- und Bodengleis getroffen ist (Bild 50). Schwere Lasten erfordern einen Ausbau des Laufwerks für vier Rollen (Bild 52). Bild 51 zeigt sogar einen achträdrigen Doppelwagen, der zum Bewegen von Holzstämmen im Gewicht von 3000 Kilogramm dient.

Besondere Vorrichtungen, die an das Tragseil gehängt werden, gestatten, das Gewicht jedes Seilbahnwagens festzustellen, der die Beladestelle verläßt. Der Wägevorgang erfolgt selbsttätig, und das Ergebnis wird fortlaufend auf einem Papierstreifen aufgezeichnet. Daneben können Zähleinrichtungen angewendet werden, die jeden durchfahrenden Wagen anmerken.

Ein ausreichend geschwinder und bequemer Betrieb auf den Seilbahnstrecken ist erst möglich, seit die selbsttätige Wagenkupplung vorhanden ist (Bild 53). Bei ihrer Anwendung lösen sich die Fahrzeuge an den Be- und Entladestellen ohne weiteres vom Zugseil ab, um auf das Streckenstück mit starrem Gleis hinaufzulaufen, über das sie meist von Hand geschoben werden. Für die Weiterfahrt brauchen sie dann nur einen Stoß zu erhalten, worauf sie sich selbsttätig wieder an das Zugseil anschließen.

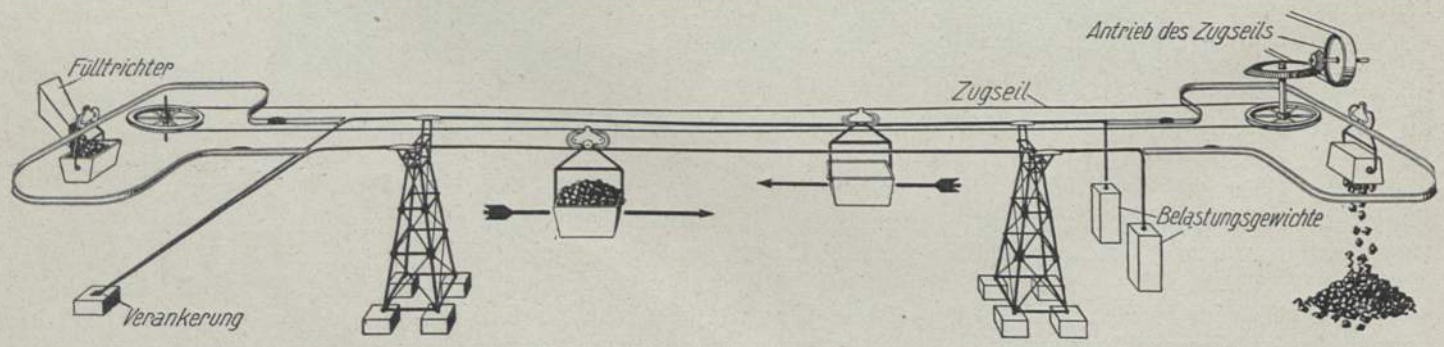



40. Darstellung der Seilbahn zu Metz vom Jahre 1872

In der von Bleichert angegebenen Bauart faßt die Kupplung das Zugseil stets mit einer Pressung, die dem Wagengewicht entspricht. Je schwerer also ein Fahrzeug beladen, desto fester wird das Zugseil angeklemmt. Hierdurch entstehen viele Vorteile. Die Kupplung schmiegt sich auch ohne weiteres wechselnden Zugseil-Durchmessern an. Das Treibseil ist ja zur Herbeiführung guter Biegsamkeit mit einer Hanfseele ausgerüstet und pflegt bei längerem Gebrauch dünner zu werden, da der Hanfkern zusammengedrückt wird. Der Kupplungsgreifer muß auch das dünner gewordene Seil stets sicher fassen können.

Zu seiner Betätigung ist das Wagengehänge nicht starr am Laufwerk befestigt; es kann sich in den Schilden, durch welche die Rollen verbunden sind, in einem senkrechten Schlitz bewegen. Starr am Laufwerk, an einem der Schilde angebracht ist dagegen eine senkrechte Strebe, die den Drehzapfen für einen gekrümmten zweiarmigen Hebel trägt. Der kürzere Hebelarm links auf Bild 53 bildet zusammen mit der Strebe eine Zange, in der das Zugseil liegt. Das Ende des größeren Hebelarms ist an das Wagengehänge angelenkt. Wenn das Fahrzeug frei am Tragseil hängt, zieht die Wagenlast das Gehänge hinunter, der rechte Hebelarm wird also gesenkt und die Zange so weit geschlossen, wie der Durchmesser des Zugseils dies zuläßt. Schwerere Last bewirkt auch ein festeres Zuklemmen der Zange.

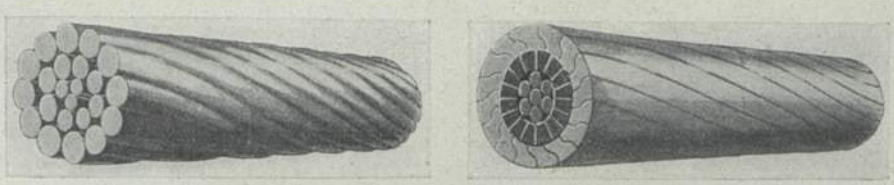
An den Stellen, wo selbsttätig entkuppelt werden soll, ist neben der Tragschiene eine zweite feste Schiene verlegt. Das Wagengehänge läuft auf diese mittels einer seitlich hinausragenden Rolle auf. Es wird gegenüber dem Laufwerk gehoben, und die Zange öffnet sich, so daß der Wagen vom Zugseil abgehen kann. Beim Ankuppeln findet der umgekehrte Vorgang statt, indem die Gehängerolle von der Seitenschiene abläuft und das Gehänge sich im Schildschlitz senkt, so daß die Zange, in die das Zugseil bereits eingefallen ist, geschlossen wird. Es ist ein besonderer Vorzug der



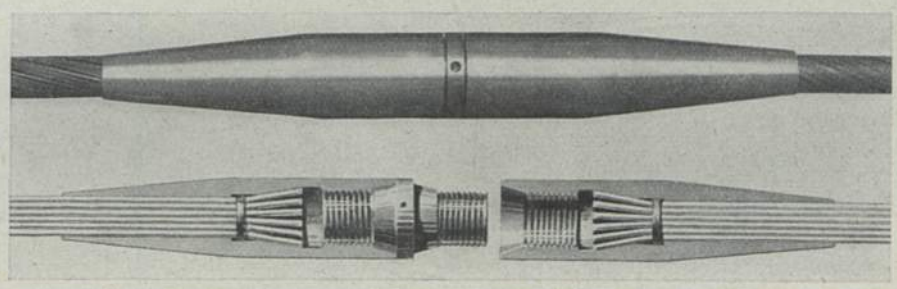

41. Schematische Darstellung einer Bleichertschen Seilbahn vom Jahre 1847

Bleichert-Kupplung, daß kein tatsächliches Heben und Senken der oft schwer beladenen Wagen stattfindet. Denn die Tragschiene liegt längs des Verlaufs der Anlaufschiene, tiefer als sonst, so daß das Laufwerk die notwendigen Bewegungen hinauf und hinunter macht, die Last aber immer in der gleichen Höhe bleibt. Die Kupplung kann sowohl für Unterseil- wie für Oberseilführung angewendet werden.

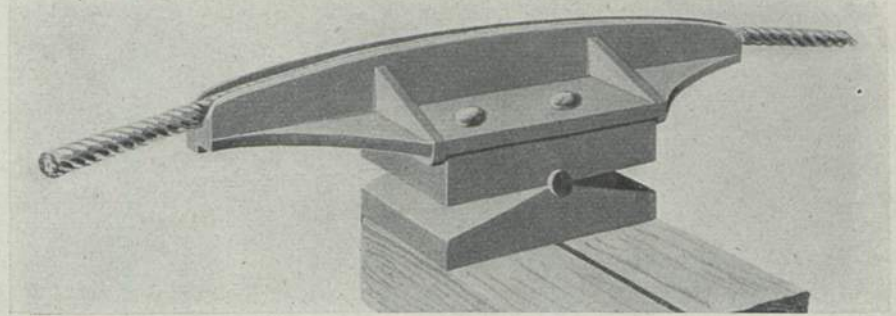
Die Seilbahnlinien können nicht immer in gerader Erstreckung geführt werden. Zwar sind bei ihnen wagerechte Krümmungen viel seltener notwendig als bei Standbahnen, dennoch aber kommt es häufig vor, daß die geradlinige Verbindung zwischen den beiden Endpunkten verlassen werden muß. Zur Umgehung eines hohen Berggipfels, zur Vermeidung einer Schlucht, die sehr große Spannweite notwendig machen würde, zur Gewinnung günstigeren Geländes für die Aufstellung der Stützen kann die Abweichung von der kürzesten Linie vorteilhaft sein. Es ist nun, wie wir schon wissen, nicht möglich, Seilbahnen mit stetigen Krümmungen anzulegen, da das Tragseil nur gerade gespannt werden kann. An die Stelle der schlanken Biegungen, wie wir sie von den Standbahnen her kennen, müssen scharfe Brüche in der Linienführung treten. Die Gesamtstrecke wird in einzelne Abschnitte zerlegt, die winklig aneinandergefügt sind. An den Brechpunkten ist die Ausbildung besonderer Winkel-Umfahrungsstellen notwendig.



42. Offenes (links) und geschlossenes (rechts) Drahtseil mit Querschnitt



43. Kupplungsmuffe für Drahtseile
Ansicht und schematischer Längsschnitt



44. Auflagerschuh für Tragseile

In jeder solcher Winkelstelle ist das Tragseil wieder durch die starre Doppelkopfschiene ersetzt. Diese rundet die kurze Strecke des Winkels in stetiger Krümmung, so daß die Wagen bequeme Durchfahrmöglichkeit vorfinden. Es ist das besondere Verdienst Bleicherts, eine Anordnung für ununterbrochene Durchführung des Zugseils durch solche Winkelstellen angegeben zu haben; die Bauart kann auch für Endschleifen benutzt werden. Mit ihrer Hilfe erst ist der vollkommen selbsttätige und durchgehende Betrieb auf den großen Seilbahnstrecken möglich geworden.

Das Zugseil wird in dem Winkel über ein Scheibenrad geführt, dessen Halbmesser gerade so groß ist wie der Krümmungshalbmesser des Gleises (Bild 55). Es bleibt also an allen Stellen über (oder unter) dem Gleis. Die Kupplungen der durchfahrenden Wagen heben das auf der sich drehenden Scheibe liegende Seil ab und lassen es hinter sich wieder darauf zurückgleiten. Bei Oberseilbauart konnten auf diese Weise von vornherein sowohl Rechts- wie Linkskrümmungen durchfahren werden. Bei Unterseil war das nicht sogleich möglich, da sich ja auf der einen Seite das Wagengehänge zwischen Seil und Scheibe legt. Es ist aber gelungen, auch Unterseilstrecken für Winkeldurchfahrung nach beiden Seiten brauchbar zu machen, indem alle umfangreicheren Gehängeteile unter das Kupplungsmaul gelegt wurden.

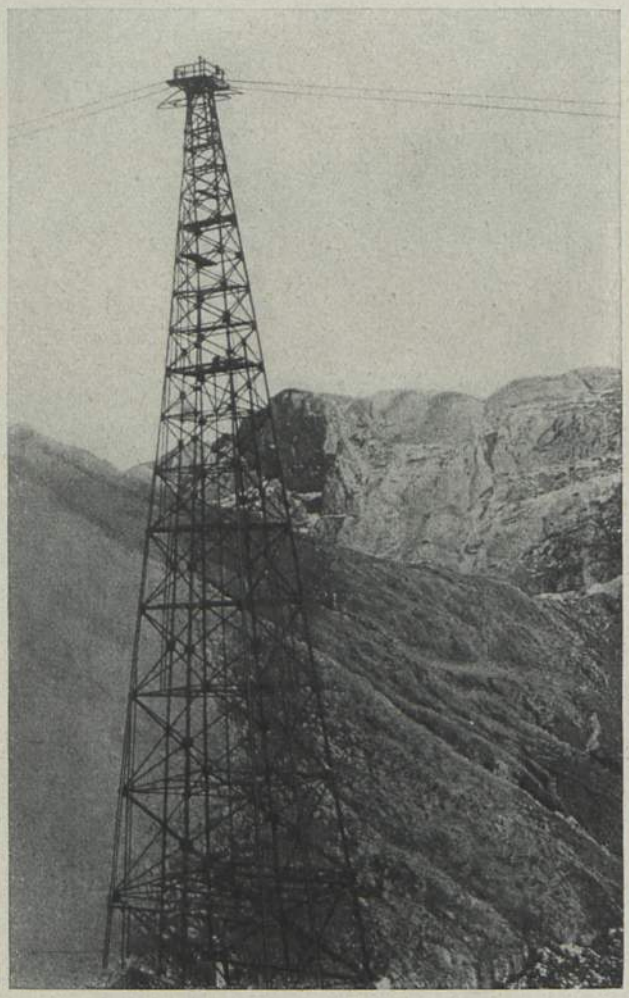
In Seilbahnstrecken können auch Verzweigungen eingebaut werden. Allerdings ist das nur dort möglich, wo Starrgleis verlegt ist, da die Anlage von Seilweichen ausgeschlossen ist. Das Bewegen der Wagen über die Weichenanlagen erfolgt stets von Hand, da die Durchführung des Zugseils nicht angängig ist. Unter diesen einfachen Umständen — ganz geringe Fahrgeschwindigkeit und ständige Anwesenheit eines Beaufsichtigenden — können die Weichen einfach gebaut sein. Verlangt wird von ihnen nur, daß sie keine Lücke in der Schiene entstehen lassen, durch die Wagen bei Unachtsamkeit hinunterfallen könnten. Notwendig ist ferner auch die Ausbildung zur Form der Kletterweichen. Die Laufrollen der Seilbahnwagen besitzen ja wie die Räder aller Schwebebahn-Fahrzeuge zwei Spurkränze. Damit ein Gleiswechsel vorgenommen werden kann, muß der eine der Kränze über das ursprüngliche Gleis hinwegsteigen können, das Rad muß also durch die Weichenzunge angehoben werden. Wir haben diesen Vorgang bereits bei Erörterung der Elberfelder Schwebebahn (Band II, Seite 354) kennengelernt.

Die Zunge der Seilbahnweiche kann entweder in der wagerechten oder in der senkrechten Ebene beweglich sein. Eine Anlage mit wagerecht schwingender Zunge zeigt Bild 56. Die Weiche liegt für gewöhnlich so, daß die Wagen aus dem Nebengleis ins durchlaufende Gleis einfahren und in der andern Richtung vom Hauptgleis zum Nebengleis übergehen können. Wenn ein Wagen, von rechts herkommend, auf dem Hauptgleis weiterfahren soll, so wird die Zunge von Hand beiseite gezogen. Sie legt sich unter Federdruck sogleich wieder auf. Fahrzeuge, die auf dem Hauptgleis von links her ankommen, schneiden die Weiche auf, das heißt das Wagengehänge drückt die Zunge so weit fort, wie es für die freie Durchfahrt notwendig ist, worauf die Zunge wieder

in ihre alte Lage zurückkehrt. Bei Benutzung einer solchen Drehweiche ist niemals eine gefährliche Gleislücke vorhanden.

Die Klappweiche mit senkrecht beweglicher Zunge betrachten wir bei ihrem Gebrauch an einer Kreuzungsstelle zweier Strecken. Sie ist in gleicher Form auch für reine Verzweigungen brauchbar; nur die Zunge selbst muß alsdann Zuspitzung und Kletterwölbung erhalten. Die Weichen der beiden kreuzenden Schienen sind für gewöhnlich geöffnet. Ein Wagen, der auf dem in Bild 54 von rechts vorn nach hinten führenden Gleis von rechts ankommt, hebt mittels eines Anschlags und eines daran angebrachten Seilzugs das Hebelwerk der Weiche, wodurch die nach oben stehende Zunge niedergelegt wird. Nachdem der Wagen darübergefahren ist, hebt sie sich wieder von selbst. Kommt das Fahrzeug von links (siehe die Anordnung an dem in Bild 54 von links vorn nach hinten führenden Gleis), dann stößt die vorderste Rolle unter den Haupthebel der Weiche, hebt ihn, und die Weichenzunge legt sich gleichfalls nieder. Die Anlagen an beiden sich kreuzenden Gleisen sind völlig gleichartig durchgebildet. Da jeder einzelne Wagen von Hand verschoben wird, ist genügend dafür gesorgt, daß kein Zusammenstoß zweier Fahrzeuge an der Kreuzungsstelle selbst stattfinden kann. Zwangsläufige Sicherungen gegen ein solches Zusammentreffen einzubauen, erscheint daher überflüssig.

Die Mannigfaltigkeit der Anwendungen, welche die Seilbahn in den Industrien jeglicher Art und aller Länder findet, sei durch die Betrachtung einiger ausgeführter Anlagen dargelegt. Wir werden sehen, daß diese Fördereinrichtung nicht nur zur Überbrückung weiter und unzugänglicher Gelände vortrefflich geeignet ist, sondern daß sie auch im engen Bezirk eines einzelnen Werkgebiets Vorzügliches zu leisten vermag.



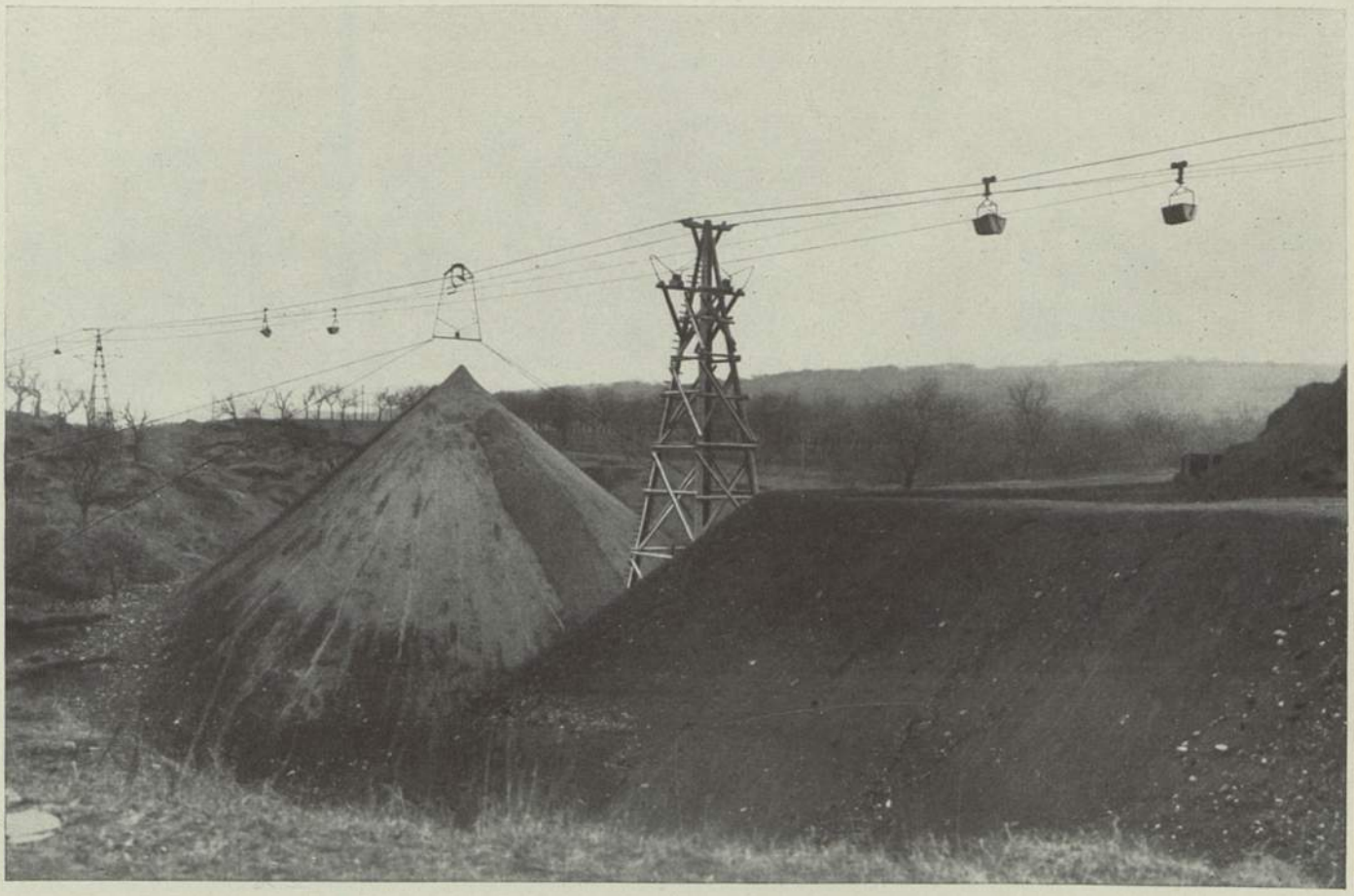
45. Turmstütze
55 Meter hoch. Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

Die Stadt Berlin hat in dem Vorort Tegel ein sehr großes Gaswerk erbaut, das in vorbildlicher Weise ausgerüstet ist (Bild 58). Zur Beförderung von Kohle, Koks, Asche, Schlacke und der zur Reinigung des Gases notwendigen chemischen Stoffe durch das Gebiet des Werks, das von zwei öffentlichen Straßen durchschnitten wird, ist eine große Zahl von Seilbahn-Linien errichtet. Ihre Gesamtlänge beträgt vorläufig ungefähr 18 Kilometer; sie soll für das erweiterte Werk bis auf 40 Kilometer verlängert werden.

Die Kohle kommt zum größten Teil auf dem Wasser an. Die Kähne machen in dem eigenen Hafen des Werks fest, worauf ihre Ladung durch Krangreifer aufgeschöpft und in die Höhe befördert wird. Die Greifer entleeren ihren Inhalt in einen Füllrumpf, der droben im Krangestell eingebaut ist. Von dort wird die Kohle in Seilbahnwagen abgezogen und zum Kohlenspeicher 1 befördert. Dieser stellt mit seiner Baulänge von 574 Metern und seinem Fassungsvermögen von rund 170 000 Tonnen Kohle eine der allergrößten Anlagen seiner Art dar. Die 50 trichterförmigen Bunker des Speichers können in beliebiger Reihenfolge durch die Seilbahnwagen gefüllt werden, welche den Oberstock des Speichers in mehreren Strängen durchziehen. Sie werden hierbei über fahrbare Brücken geführt, die während des Betriebs verschoben werden können, so daß der Kohle-Einsturz allerorten zu erfolgen vermag.

Einen geringeren Teil des Kohlebedarfs schafft die Eisenbahn am entgegengesetzten Ende des Werkgeländes heran, und von hier führen ebenfalls Seilbahnstränge zum Speicher. Ferner kann der Grundstoff für die Gasbereitung sowohl aus den Eisenbahnwagen wie aus den Schiffen unmittelbar zu der eigentlichen Gasfabrik, den sogenannten Ofenhäusern, hingeschafft werden. Die im Speicher gelagerte Kohle läßt sich unter den Trichtern aus 1107 Auslaßöffnungen wieder in Seilbahnwagen abziehen. Von dieser unteren Seilbahnstrecke steigen die Wagen über einen Zickzackweg zu dem hohen Kohlenverteilungsgerüst auf (Bild 57). Die künstliche Längenentwicklung durch die Zickzackanordnung war notwendig, weil der beträchtliche Höhenunterschied zwischen der unteren Speicherbahn und dem Verteilungsgerüst selbst von einer Seilbahn nicht auf kürzestem Weg überwunden werden kann. Auf dem Verteilungsgerüst enden auch die Strecken, die vom Hafen und von der Eisenbahn-Entladestelle herkommen. Alle an der Verteilungsstelle eintreffenden Wagen können mittels selbsttätiger Weichen so verschoben werden, daß die senkrecht darunter liegenden zahlreichen Kohlenbrecher stets gleiche Zufuhrmassen erhalten.

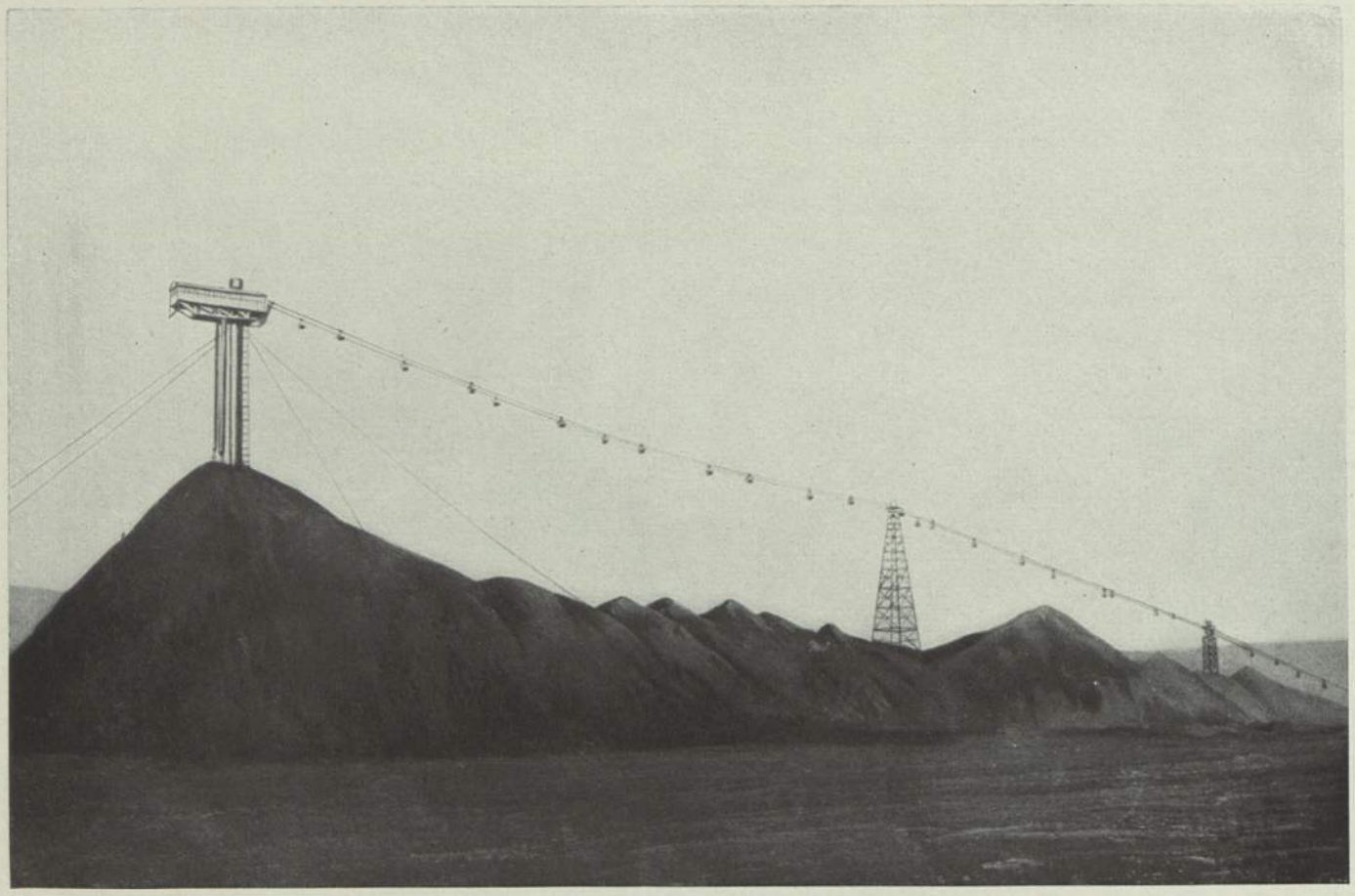
Die zur richtigen Korngröße zermalmte Kohle gelangt aus den Brechern über große Becherwerke wieder in Seilbahnwagen, welche die langgestreckten Bunker in den Ofenhäusern durchstreichen und dort selbsttätig entleert werden. Aus den Bunkern wird die Kohle in die Schrägkammeröfen abgezogen, in denen der Gasgewinnungsvorgang sich vollzieht. Zurückbleibt der Koks, der nach der Ablöschung gleichfalls auf einer Seilbahn befördert wird. Er kann entweder zum Kokslagerplatz oder unmittelbar zur Koksaufbereitung gelangen. Der vorübergehend gelagerte Koks wird bei Bedarf von Greiferkranen aufgenommen und in einen Hochbehälter geschafft, der gleichfalls durch eine Seilbahn mit der Aufbereitungsstelle verbunden ist. Von dort aus laufen Strecken zum Hafen, zur Eisenbahn und zur Ladestelle für Straßenfuhrwerke, wo Fahrzeuge zum Fortschaffen des verkauften Kokses bereitstehen. Die großen Massen von Asche und



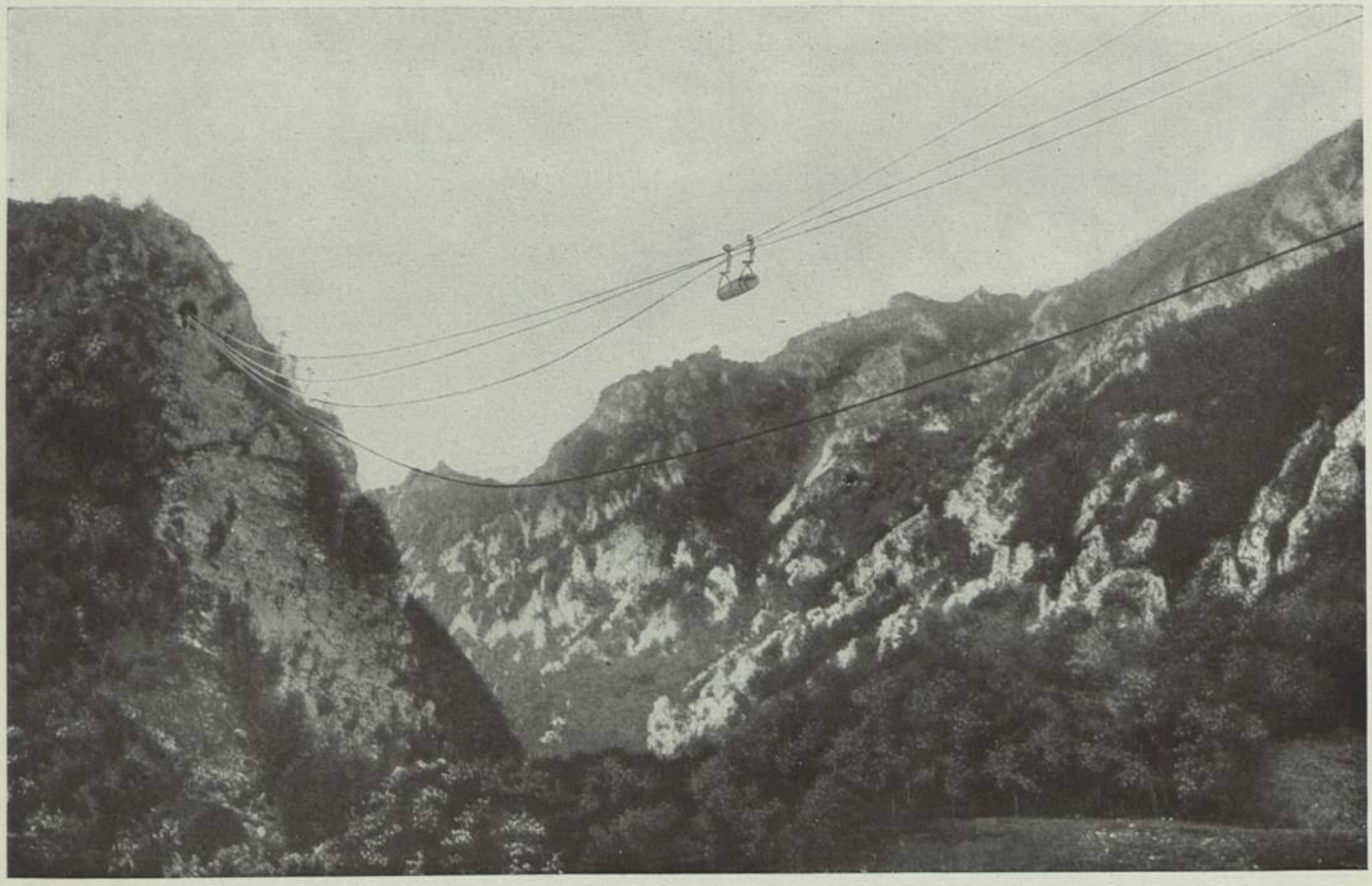
1. Hochliegende Schlacken-Seilbahn mit verschiebbarem Entleerungsanschlag, der die selbsttätige Entleerung der Wagen an jeder Stelle der Seilbahn gestattet. Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

2. Schlacken-Seilbahn mit Schrägbrücke, an deren Ende die selbsttätige Entleerung der Wagen erfolgt
Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

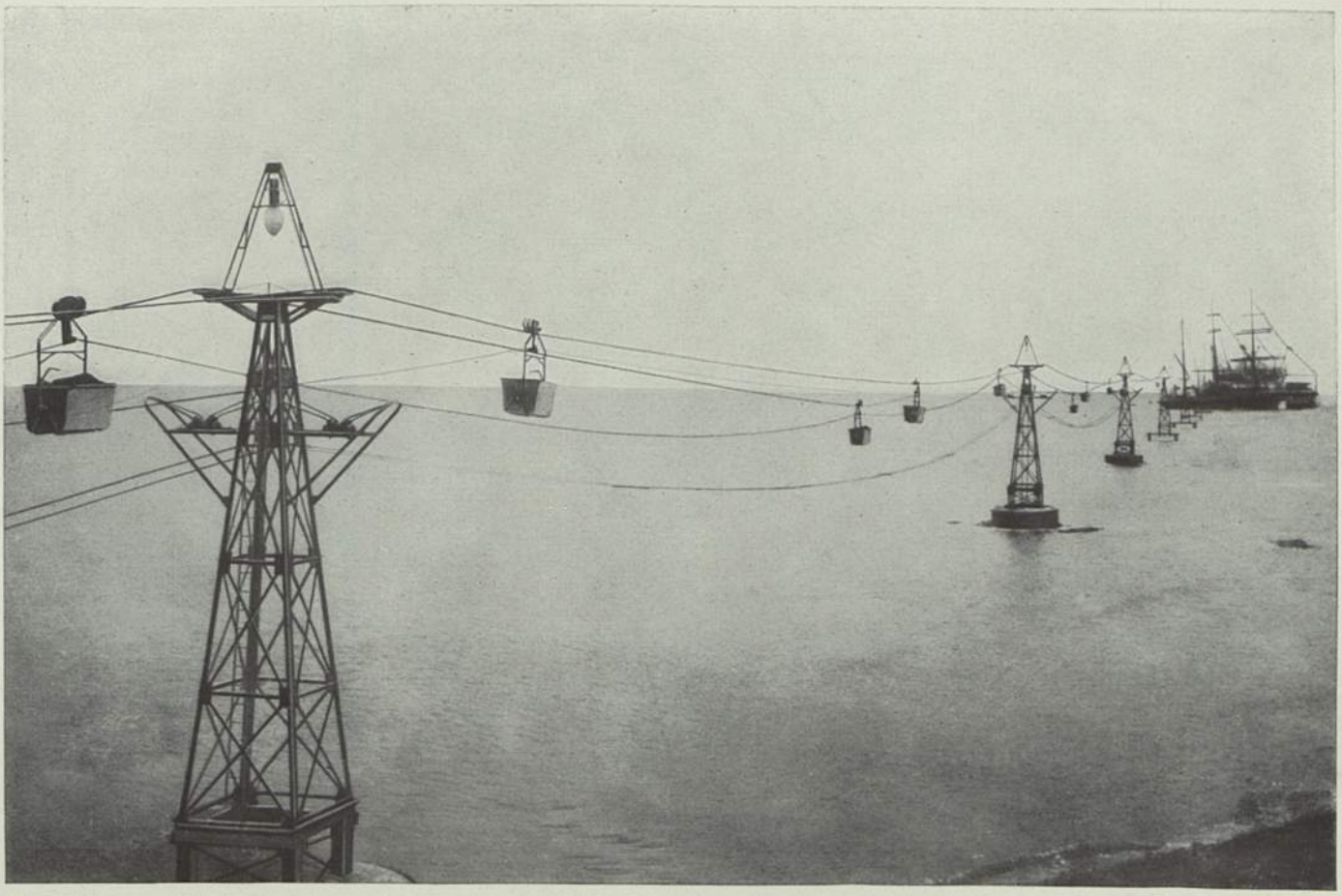
## Seilbahnen in mannigfaltiger Verwendung



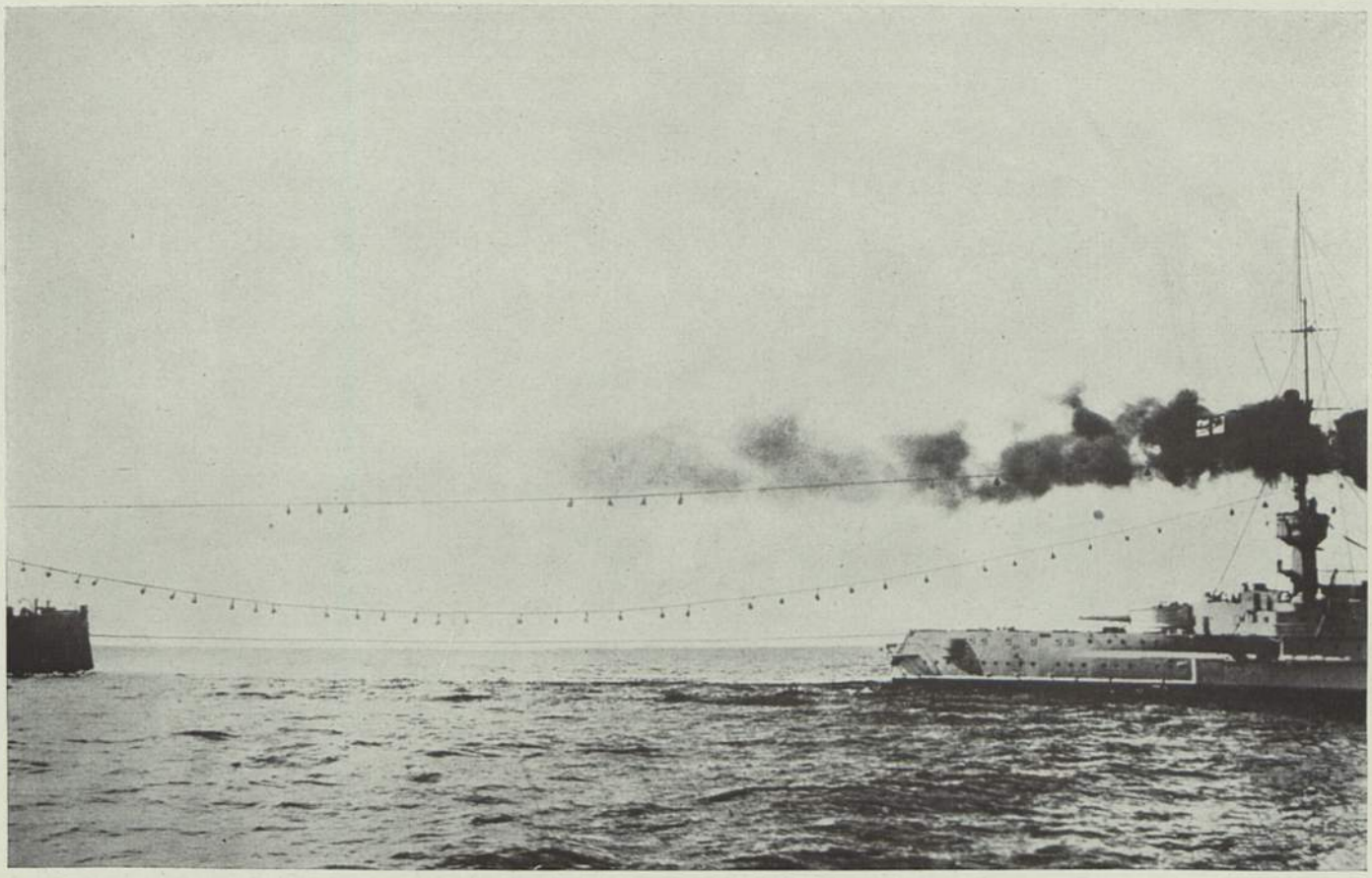
3. Schlacken-Seilbahn mit hohem Turm, an dem das Entlade- und Umkehrgerüst hängt. Phot. Ernst Haeckel, Saarbrücken



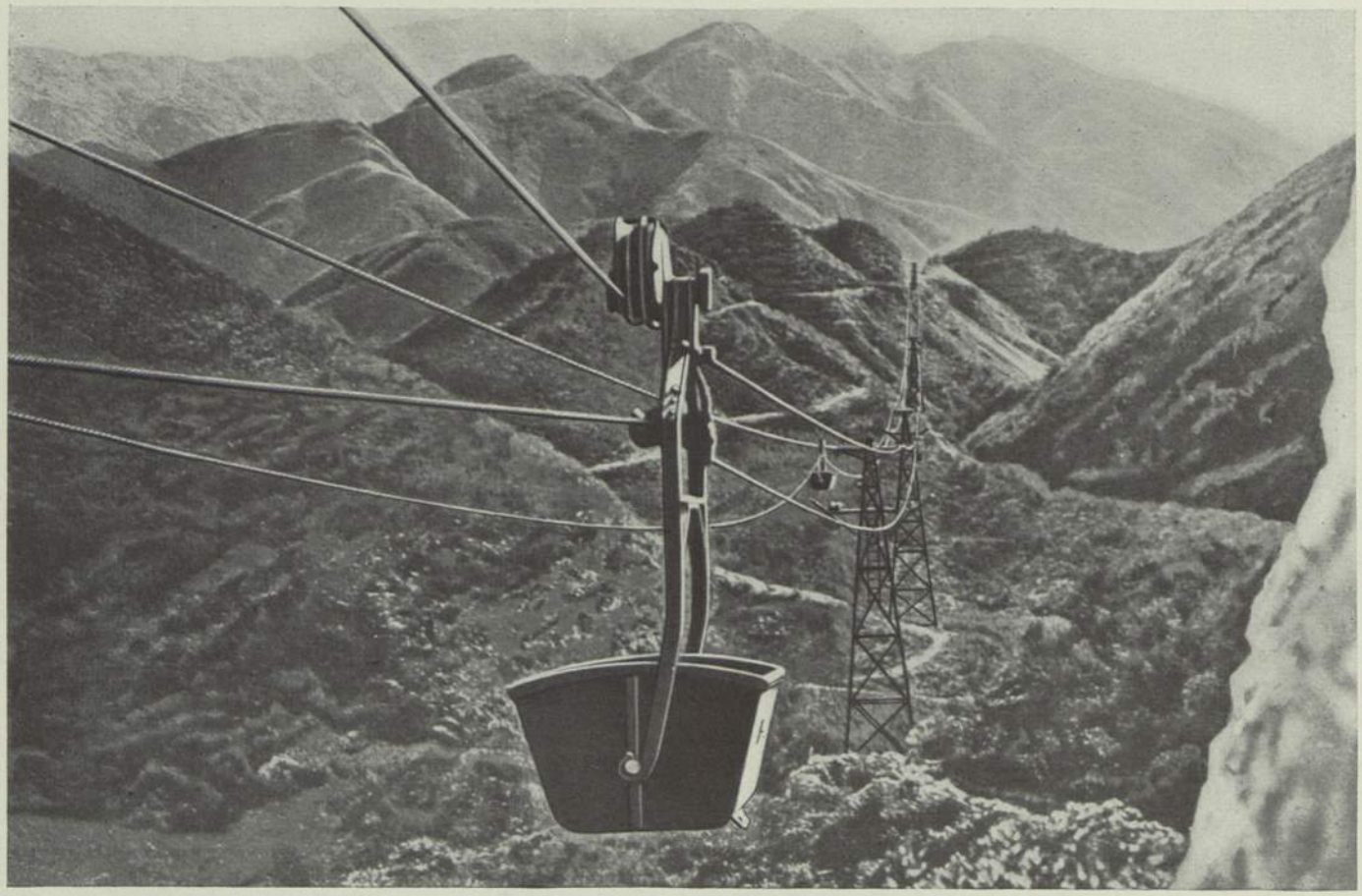
4. Seilbahn für Baumstämme mit Tunnel in Serbien. Die Anlage ist etwa 10 Kilometer lang und überwindet einen Höhenunterschied von 1205 Metern. Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig



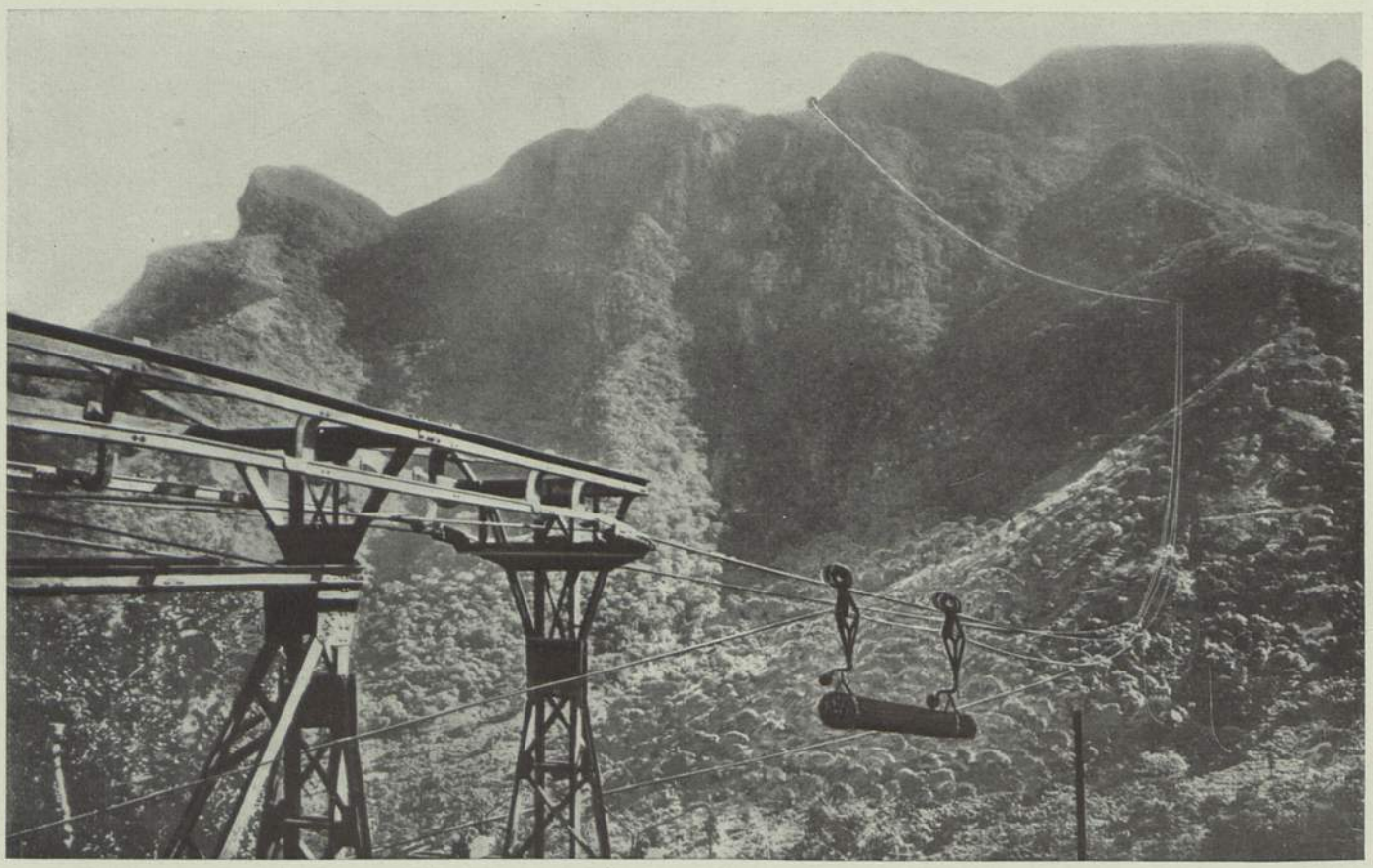
5. Die Seestrecke der Seilbahn in Neu-Kaledonien zur Verladung von Erzen auf Schiffe, die wegen der Korallenriffe nicht am Ufer anlegen können
Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig



6. Seilbahn zur Verladung von Kohle von Schiff zu Schiff auf hoher See. AEG, Berlin



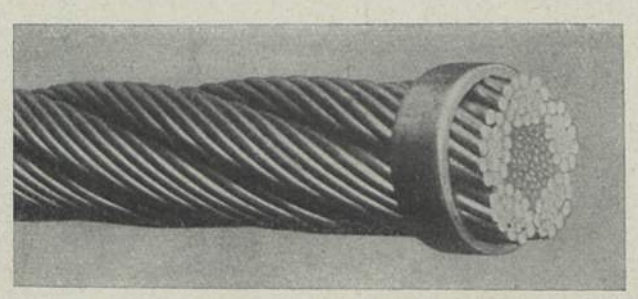
7. Teilstrecke der längsten Drahtseilbahn der Welt. Diese 34 Kilometer lange Seilbahn verbindet die in 4600 Metern Meereshöhe gelegenen Famatina-Gruben der argentinischen Kordilleren mit der in 1080 Metern Meereshöhe gelegenen Eisenbahn. Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig



8. Teilstrecke der 9 Kilometer langen Seilbahn für Baumstämme, die den Schumme-Wald mit der Usambara-Bahn im ehemaligen Deutsch-Ostafrika verbindet. Die Spannweite des Talübergangs im Vordergrunde beträgt 900 Meter Ausgeführt von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

Schlacke, die in den Ofenhäusern anfallen, werden auf weiteren Seilstrecken zu den Verfrachtungsorten geschafft.

Sehr wichtige Aufgaben erwachsen den Seilbahnen im Betrieb der Berg- und Hüttenwerke. Wir werden Gelegenheit haben, ihr Arbeiten in diesen Anlagen zu beobachten, wenn wir in späteren Abschnitten die Gewinnung der Kohle und die Verhüttung der Eisenerze besprechen. Hier beschränken wir uns darauf, eine bestimmte Art der Förderung in Hüttenwerken herauszugreifen, die zur Ausbildung eigentümlicher Seilbahnformen geführt hat.



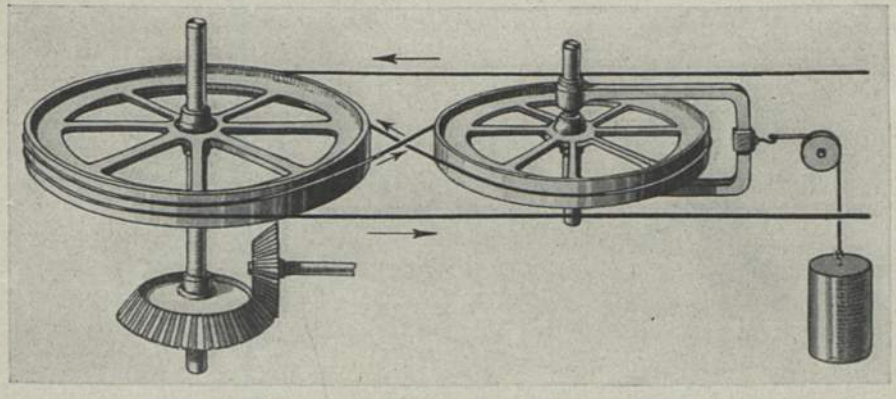
46. Zugseil mit Querschnitt

Eine Seele aus Hanf ist von fünf dünnen Drahtseilen umschlossen. Ausführung von Adolf Bleichert & Co., Leipzig

Aus dem glühenden Inneren der Hochöfen rinnt in ununterbrochenem Fluß die Schlacke heraus, ein Stoff, der vorläufig noch zum größten Teil als Abfall betrachtet und auf abliegenden Feldern gestapelt wird, wo er im Lauf der Jahre zu ungeheuren Massen anwächst. Die Seilbahn gestattet infolge ihrer Schmiegsamkeit ein sehr bequemes Beschütten der Schlackenhalden, mit ihren ständig wachsenden Kronenhöhen. Auf Bild 1 der Tafel II sehen wir eine in bedeutender Höhe geführte Seilbahn, deren Wagen sich durch Anstoßen an einen Anschlag selbständig entleeren. Dieser Anschlag ist über dem Gipfel des Schlackenbergs deutlich sichtbar. Auf solche Art wird es möglich, die Schlackenmassen bis zu 120 und 150 Metern Höhe aufzuschütten, so daß sehr große Mengen auf verhältnismäßig kleiner Bodenfläche untergebracht werden können.

Eng zusammengedrängte Schüttung wird ferner möglich durch Anwendung von Seil-Schrägbrücken. Die Wagen fahren bis zum Ende des Schräggerüsts, werden dort selbsttätig gekippt und kehren zur Aufnahme neuer Schlacke auf dem zweiten Strang zurück. Sobald die Schüttung die äußerste Spitze des Schräggerüsts erreicht hat, wie das auf Bild 2 der Tafel II beinahe der Fall ist, wird ein neues, freitragendes Gerüststück angesetzt, und es beginnt nach ganz kurzem Stillstand der Bahn die Anschüttung einer neuen Böschung.

Bei einer dritten Bauart sehen wir einen hohen Turm aus Eisenblech mit Betonfüllung aufgeführt, an den das Entlade- und Umkehrgerüst gehängt ist (Bild 3 der Tafel II). Mit dem Wachstum des Schüttkegels wird das Gerüst immer höher emporgehoben. Nach Erreichung einer Schütthöhe von etwa 120 Metern errichtet man einen zweiten Turm in einiger Entfernung, die Umkehr- und Entladestelle wird dorthin verlegt, worauf der Schlackenberg drüben gleichfalls emporwächst. Später wird die Entladung in die Mitte der Verbindungsstrecke verlegt, bis das gewaltige Tal zwischen den beiden Bergen ausgefüllt ist.



47. Treibmaschine für das Zugseil mit Hilfsscheibe

Um ein Abgleiten des Zugseils zu verhindern, wird es von der Hauptscheibe um eine durch Gewicht beschwerte Hilfsscheibe und dann nochmals um die Hauptscheibe gelegt

Bild 60 zeigt den Grundriß und die Längenerstreckung einer Seilbahn von rund 10 Kilometern Länge, die in Serbien erbaut worden ist und sehr stark von der kürzesten Linienführung abweicht. Sie dient zur Niederführung der in Hochwäldern geschlagenen Holzstämme zur Verfrachtungsstelle an der Drina. Die Strecke überwindet einen Höhenunterschied von 1205 Metern. Auf den ersten Blick ist zu erkennen, daß die Anlage einer andern Bahn an dieser Stelle überhaupt nicht möglich gewesen wäre. Das Gelände ist auf das wildeste zerrissen, und manche Teile sind völlig unzugänglich. Die Seilbahn braucht sich um solche Stellen nicht zu kümmern; sie vermeidet eben dort das Aufstellen von Stützen.

Der Talübergang, den Bild 4 der Tafel II schildert, hat eine Spannweite von 800 Metern. Die Photographie zeigt mit der Kühnheit der Anlage zugleich die Grenze, die auch der Seilbahnführung gesetzt ist. Wir sehen, daß die Strecke in einen Tunnel hineinläuft. Der entgegenstehende Bergkegel steigt zu schroff an, als daß das Tragseil über seinen Rücken geführt werden könnte. Es mußte also auch hier, wie so häufig bei Standbahnen, zur Anlage eines Kunstbaus geschritten werden. Im Tunnel fahren die Wagen auf starrem Gleis, weil durch die Vermeidung des Seildurchhangs die Bauhöhe für den Durchstich geringer gehalten werden konnte.

Die Strecke enthält zwei Winkelstellen, die selbsttätig durchfahren werden. Bei Sjenitsch und Predov Krst sind über Weichen Nebengeleise angeschlossen, damit man auch von dort beladene Fahrzeuge ablassen kann. Da die einzelnen Holzstämme ein Gewicht von 3000 Kilogramm bei einer Länge von 18 Metern erreichen, werden die schon auf Bild 51 gezeigten sehr starken Doppelgehänge benutzt. In der Entladestelle am Drina-Ufer können die Hölzer von der Schwebebahn unmittelbar auf Standbahn-Wägelchen übergeladen werden, die sie zum Sägewerk führen.

Eine besonders bemerkenswerte Anlage ist von der Firma Adolf Bleichert & Co. für die französische Gesellschaft „Le Nickel" auf Neu-Kaledonien im australischen Inselgebiet geschaffen worden. Ihre Bestimmung ist, die im Inneren des Landes gewonnenen Nickelerze vom Lagerplatz am Ufer auf die Schiffe zu überführen, in denen die Erze zur Verhüttung nach Europa gebracht werden. Das Beladen der Schiffe, die wegen des seichten, von Korallenriffen durchsetzten Wassers nicht am Ufer festmachen können, geschah früher durch flach gehende Schuten, aus denen Eingeborene das Erz mit Körben und Kübeln in den

Schiffsraum schafften. Das war eine umständliche und wegen des unruhigen Wassers oft auch gefährliche Arbeit. Für den gesamten Umschlag brauchte man ständig 400 bis 500 Arbeiter. Unter günstigen Verhältnissen war ein Schiff von 300 Tonnen Ladefähigkeit in 50 bis 60 Tagen wieder abfahrtbereit; bei andauernd schlechtem Wetter konnte die Liegezeit sogar 120 Tage dauern. Die Kosten für die Überbringung der Erze zu den europäischen Häfen waren daher sehr groß. Seit die ein Kilometer weit in die See hinausgeschobene Seilbahn (Bild 5 der Tafel II) fertiggestellt ist, währt die Liegezeit der Schiffe nur noch zwei bis drei Tage, und ein paar Dutzend Arbeiter genügen für den Umschlag. Die recht kostspielige Anlage macht sich daher reichlich bezahlt.

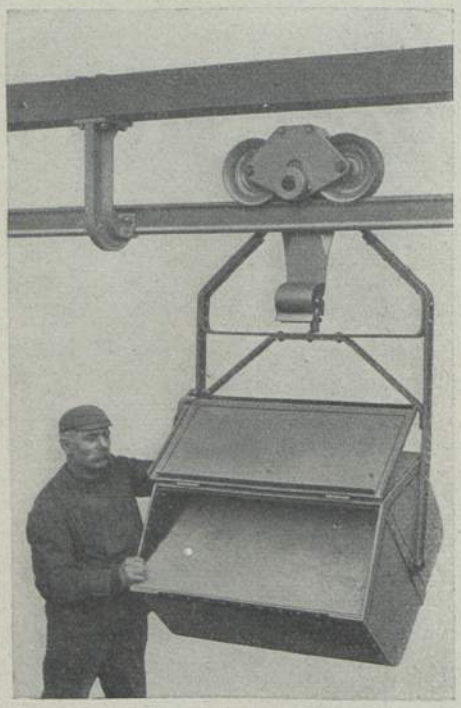
Die vom Lagerplatz aufgenommenen Erze fahren über Stützen, die auf Rammpfählen ruhen, zum Ladegerüst hinaus. Dort werden die Erze aus den Seilbahnwagen in Füllrümpfe geschüttet, von denen aus sie mittels Auslegerkranen zu den Schiffen übergeführt werden. Die Bahn dient gleichzeitig dem Personenverkehr von und zu den Schiffen.

Anlagen zur Schiffsbeladung von ähnlicher Art sind durch Bleichert auf der Insel Elba erbaut worden. Sie unterscheiden sich von dem Bauwerk in Neu-Kaledonien hauptsächlich dadurch, daß die Tragseile nicht an einzeln aufgerichteten Stützen befestigt, sondern über eine zusammenhängende Brücke geführt sind.

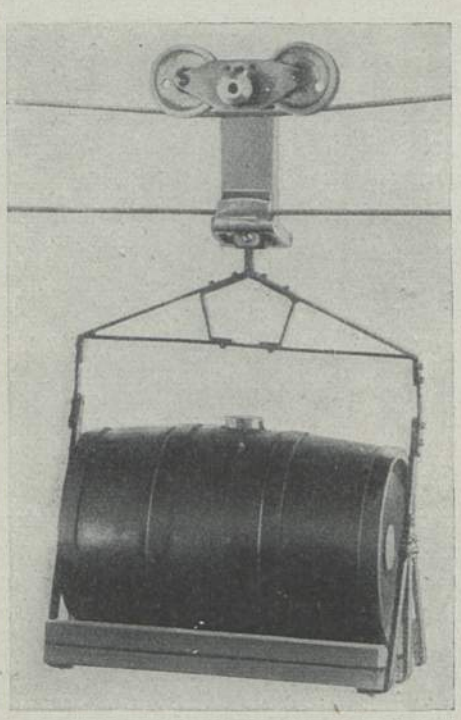
Die Seilbahn ist schmiegsam genug, um sogar auf hoher See zur Verbindung zweier Schiffe verwendet werden zu können (Bild 6 der Tafel II). Kriegsschiffe pflegen öfter während der Fahrt zu bunkern, indem sie die Kohle von einem zu ihnen geschickten Frachtdampfer übernehmen. Das Fahrzeug wird alsdann ins Schlepptau genommen und das endlose, laufende Tragseil so ausgespannt, daß eine Spannrolle es stets gestrafft hält. Die wechselnden Bewegungen der Schiffe in See gegeneinander können dann keine Störung der Übernahmearbeit verursachen. Die Kohle wird auf dem Frachtdampfer in Säcke getan, die mittels dünner Taue an dem Seil befestigt und auf Deck des Kriegsschiffs geschwind abgeschnitten werden. Die Famatina-Gruben in den argentinischen Kordilleren sind durch eine Seilbahn (Bild 7 der Tafel II) erschlossen, die wohl die großartigste Anlage ihrer Art ist. Das Erzbergwerk liegt in einer Höhe von 4600 Metern, also fast so hoch wie die Spitze des Montblanc. Stephan schreibt in seinem Buch „Die Drahtseilbahnen" über diese Förderanlage:

„Schon seit Jahrhunderten wurde in der kaum zugänglichen Einöde Kupferbergbau betrieben, dessen Erträgnisse auf schmalen Saumpfaden durch Maultiere zu Tal geschafft werden mußten, ein Transport, der ungefähr drei Tage in Anspruch nahm und die Tonne Erz um 54 Mark verteuerte. Als die Gruben an eine englische Gesellschaft zur intensiven Ausbeutung verpachtet wurden, forderte diese eine gute Bahnverbindung mit der nächsten Stadt, Chilecito, bei der Schmelzwerke zur Verhüttung der Erze angelegt werden sollten. Jedoch scheiterten alle vorgeschlagenen Projekte an den Schwierigkeiten des Geländes, und selbst den Amerikanern, die als wagemutige Eisenbahn-Pioniere bekannt sind, schien die Herstellung einer regelmäßigen, sicheren Verbindung unausführbar, bis man sich entschloß, die deutsche Seilbahntechnik zu Hilfe zu rufen.

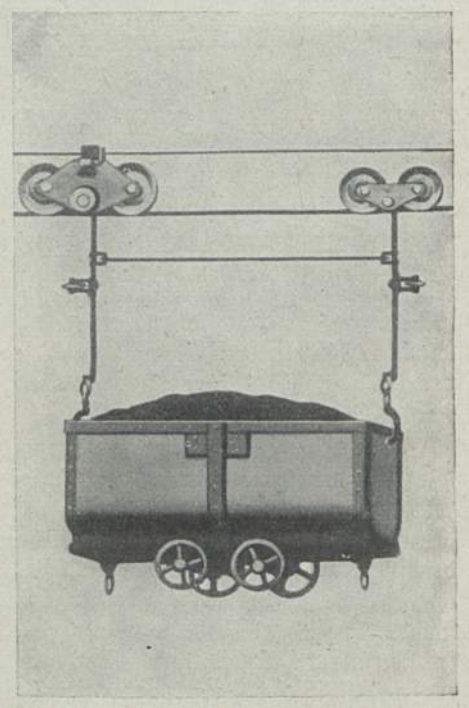
„Die auf Grund eingehender Gelände-Studien erbaute, 34 Kilometer lange Drahtseilbahn schließt sich in Chilecito auf 1080 Metern Meereshöhe, noch im Gebiet der brennenden Tropensonne, an die Eisenbahn an und steigt, anfänglich in der Ebene sich hinziehend, nur wenig, bis sie bei Kilometer 9 die erste Zwischenstation erreicht, von denen im ganzen 7 vorhanden sind, die die Bahn in 8 miteinander verbundene und durch besondere Maschinen angetriebene Teilstrecken zerlegen. Hier beginnt das eigentliche Gebirge, in dem die Linie dauernd ansteigt, oft im Verhältnis 1:2, wobei sie zwischenliegende Täler mit Spannweiten von 700 bis 800 Metern mehrere hundert Meter über der Talsohle überschreitet. . . . Im ganzen besitzt die Bahn 275 Seilstützen, von denen einige die bedeutende Höhe von 50 Metern aufweisen.



48. Kippmuldenwagen mit Verschluß



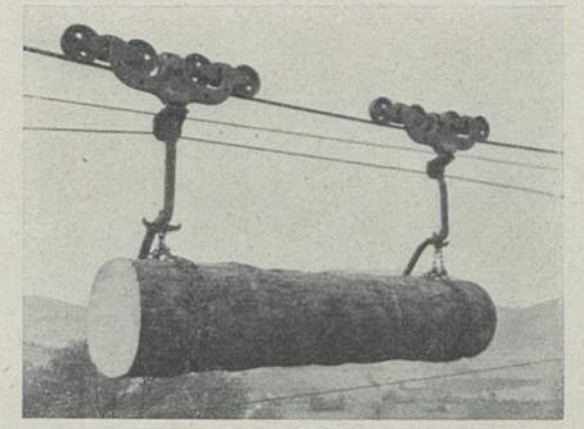
49. Gehänge für Fässer



50. Gehänge für Grubenwagen

Ausführungen von Adolf Bleichert & Co., Berlin

Die Anlage hat nach ihrer Fertigstellung den Erfolg gezeitigt, daß die Fracht von 1000 Kilogramm sich heute bei einer stündlichen Leistung von 40 Tonnen auf 5,30 Mark stellt, also auf den zehnten Teil des früheren Betrags. Dabei kann die frühere Jahresförderung von 4000 Tonnen jetzt mit Hilfe der Seilbahn in vier Tagen erledigt werden. Außerdem gestattet die Bahn, die auch während der schlimmsten Schneestürme arbeitet, das ganze Jahr hindurch zu fördern, während man vorher mit Rücksicht auf die Witterungsverhältnisse den Frachtverkehr und damit den Betrieb der Gruben höchstens vier Monate aufrechterhalten konnte. Die Durchhaltung des Bergbaubetriebs ist nicht nur dadurch möglich geworden, daß die Drahtseilbahn ununterbrochen die Erze zu Tale förderte, sondern auch die für den gesamten Betrieb der Gruben nötigen Baustoffe, Arbeitsgeräte, Lebensmittel und sogar das Wasser für die Arbeiter nach oben schafft. Ferner vermittelt sie fast den ganzen Personenverkehr auf das Gebirge, für den besondere geschlossene Wagen gebaut worden sind, die die Passagiere gegen Unbilden des Wetters schützen."



51. Doppeltes Vierrollengehänge mit Baumstamm
Adolf Bleichert & Co., Leipzig

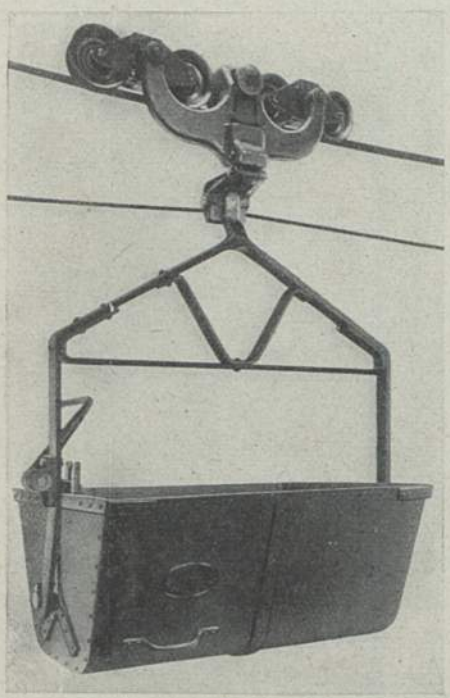
Die steilsten Steigungen unter allen Seilbahnen besitzt eine 9 Kilometer lange Strecke im ehemaligen Deutsch-Ostafrika. Sie wurde zur Verbindung des Schumme-Waldes mit der Usambara-Eisenbahn angelegt. Die Holzungsstellen liegen in 2000 Metern Höhe, und das Gebirge fällt an vielen Stellen nahezu senkrecht in die Massai-Steppe ab. Da dem Hauptgebirgsstock noch einzelne niedrigere, aber ebenso steil aufsteigende Höhenrücken vorgelagert sind, war es schwierig, selbst für eine Seilbahn die geeignete Linienführung zu finden. Zweimal muß die Strecke an schroffen Bergabhängen die Richtung wechseln; der geringe zum Aufstellen der Winkelgerüste erforderliche Platz konnte dort nur durch Sprengarbeit gewonnen werden. Die größte freie Spannweite beträgt 900 Meter. Sie ist auf Bild 8 der Tafel II dargestellt, das zugleich die beiden Winkelstellen auf den Berghöhen zeigt. Von dem im Vordergrund des Bilds stehenden Spanngerüst steigt die Strecke bis zu dem höchsten auf dem Bild sichtbaren Punkt um 710 Meter, während die Entfernung der beiden Punkte voneinander nur zwei Kilometer beträgt.

*

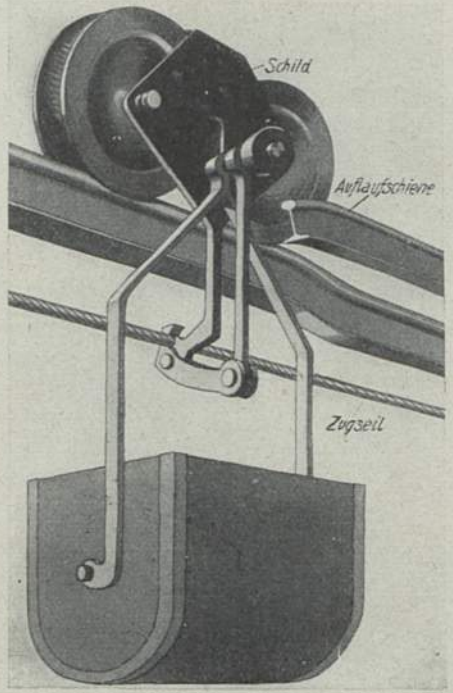
Hängebahnen, die nur über kurze, vielfach gekrümmte Strecken laufen und sehr lebhaften Verkehr haben, rüstet man unter Fortfall des Zugseils vorteilhaft mit Fahrzeugen aus, die Einzelantrieb besitzen. Es kommt hierfür einzig der Elektromotor in Betracht, dem der Strom aus einer dicht über oder unter dem Gleis liegenden blanken Leitung zugeführt wird.

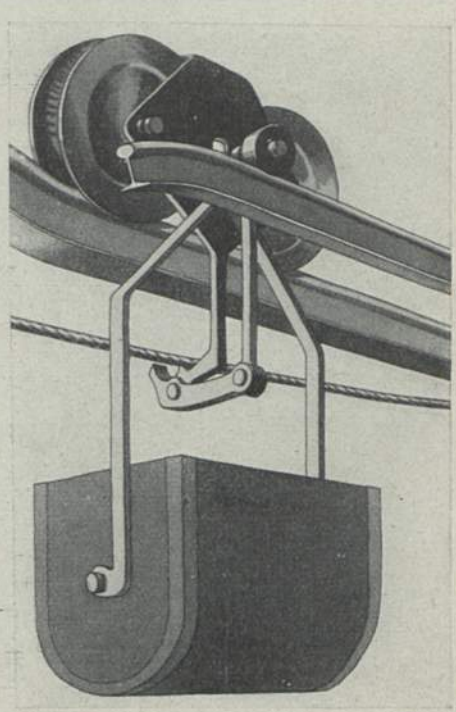
Die Elektro-Hängebahnen führen sich, obgleich ihre Ausrüstung sehr kostspielig ist, mehr und mehr ein. Man pflegt die Wagen mit Einzelmotor fast nie auf Tragseilen laufen zu lassen, sondern stützt sie durch Starrschienen (Bild 59). Der Durchhang des Tragseils würde fortwährende Ueberwindung von Steigungen notwendig machen, was den Elektro-Hängebahnen nicht angenehm ist. Das Gleis besteht entweder aus der bereits auf Seite 19 erwähnten Doppelkopfschiene oder aus einem Doppel-T-Träger, auf dessen Unterflansch die Fahrzeuge mit zwei Gehängen laufen.

Wo die Strecke stark ansteigt, muß zu einer Hilfseinrichtung gegriffen werden, sobald die Reibung zwischen



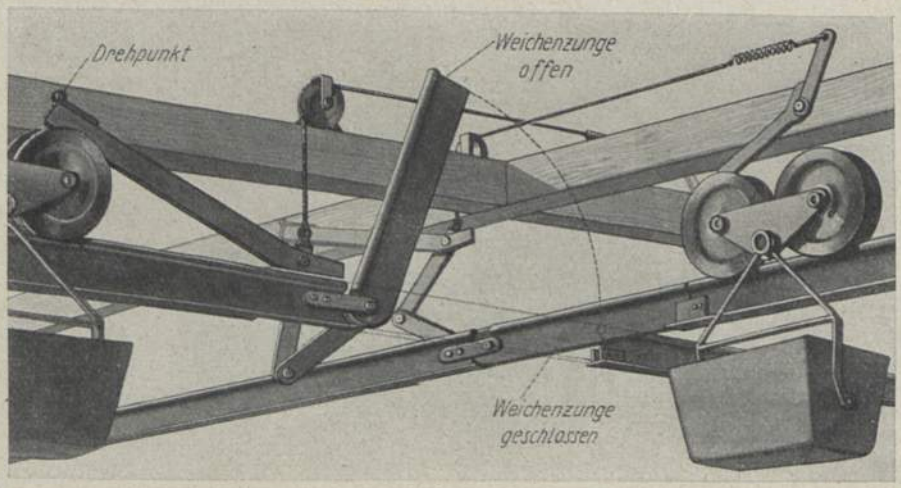
52. Kippmuldenwagen mit Vierrollengehänge
Adolf Bleichert & Co., Leipzig



53. Selbsttätige Wagenkupplung bei Seilbahnen
An den Be- und Entladestellen läuft das Gehänge mit einer seitlich angebrachten Rolle auf eine zweite Schiene auf und wird etwas gehoben, wodurch der Kupplungsgreifer gelöst wird

den Laufrädern und den Schienen nicht ausreicht, um die Wagen vorwärtskommen zu lassen. Es wird dann ein endloses, ständig bewegtes Zugseil über dem Gleis ausgelegt. Die herankommenden Wagen kuppeln sich selbsttätig an, während ihre Motoren gleichzeitig stromlos werden. Nach der Ankunft droben findet selbsttätige Abkupplung vom Zugseil statt, und der nun wieder mit Strom versorgte Elektromotor zieht den Wagen weiter.




54. Kreuzungsweiche mit zwei senkrecht beweglichen Zungen

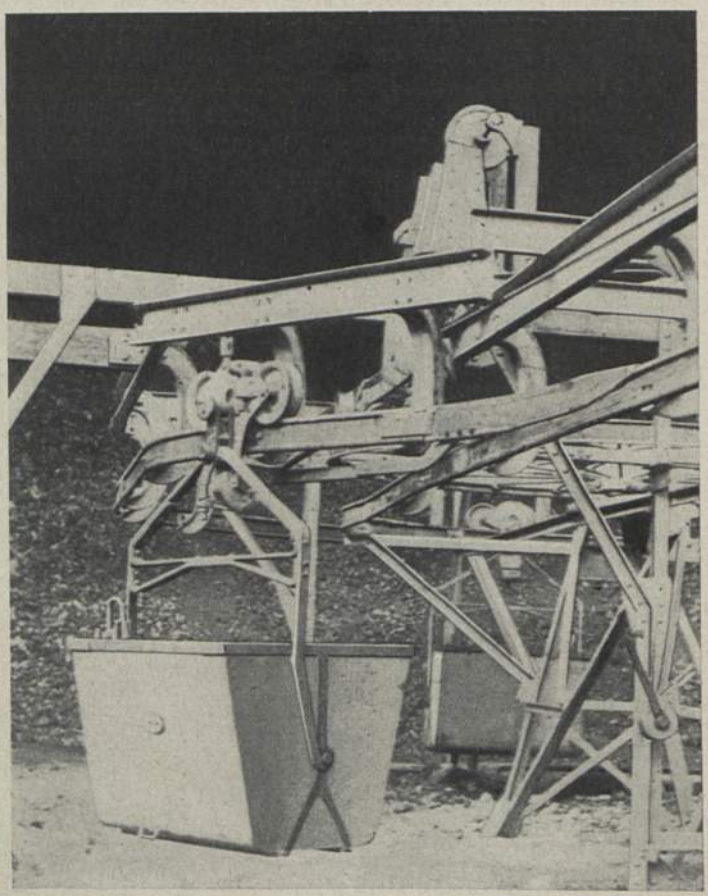
Der von Hand bewegte Wagen trifft, von links kommend, auf den Haupthebel, von rechts auf einen Anschlag und klappt die nach oben stehende Weichenzunge mittels des Seilzuges herab. Nach Durchgang des Wagens hebt sich die Weichenzunge wieder von selbst

Die Selbsttätigkeit ist bei den Elektro-Hängebahnen sehr hoch ausgebildet. Da die Wagen trotz gleicher Motorausrüstung verschiedene Geschwindigkeiten annehmen, sobald die Gewichte der Ladungen nicht gleich sind, muß dafür gesorgt sein, daß kein Zusammenstoß stattfinden kann. Die Wagen bewirken das ganz allein, indem jeder einzelne das eben durchfahrene Streckenstück hinter sich stromlos macht. Es wird erst wieder gespeist, wenn das Fahrzeug den nächsten Abschnitt verlassen hat und in das übernächste Streckenstück eingefahren ist. So hat jeder Wagen einen stromlosen Abschnitt hinter sich, wodurch ausreichende Abstände gesichert sind.

Damit die Fahrzeuge in geneigten Strecken nicht etwa durch die bloße Schwerkraftwirkung weiterrollen, besitzt jedes eine Bremsvorrichtung, die selbsttätig sofort in Kraft tritt, wenn die Stromzufuhr aufhört. Ein Magnet hält für gewöhnlich einen Bremsklotz angelüftet. Dieser wird aber sogleich durch eine kräftige Feder an das Gleis gedrückt, wenn der Magnet infolge Strommangels keinen Zug mehr ausüben kann. Auf Strecken mit sehr lebhaftem Verkehr, die von vielen Wagen mit engen Abständen befahren werden, wird die Sicherung vor Zusammenstößen auch dadurch bewirkt,

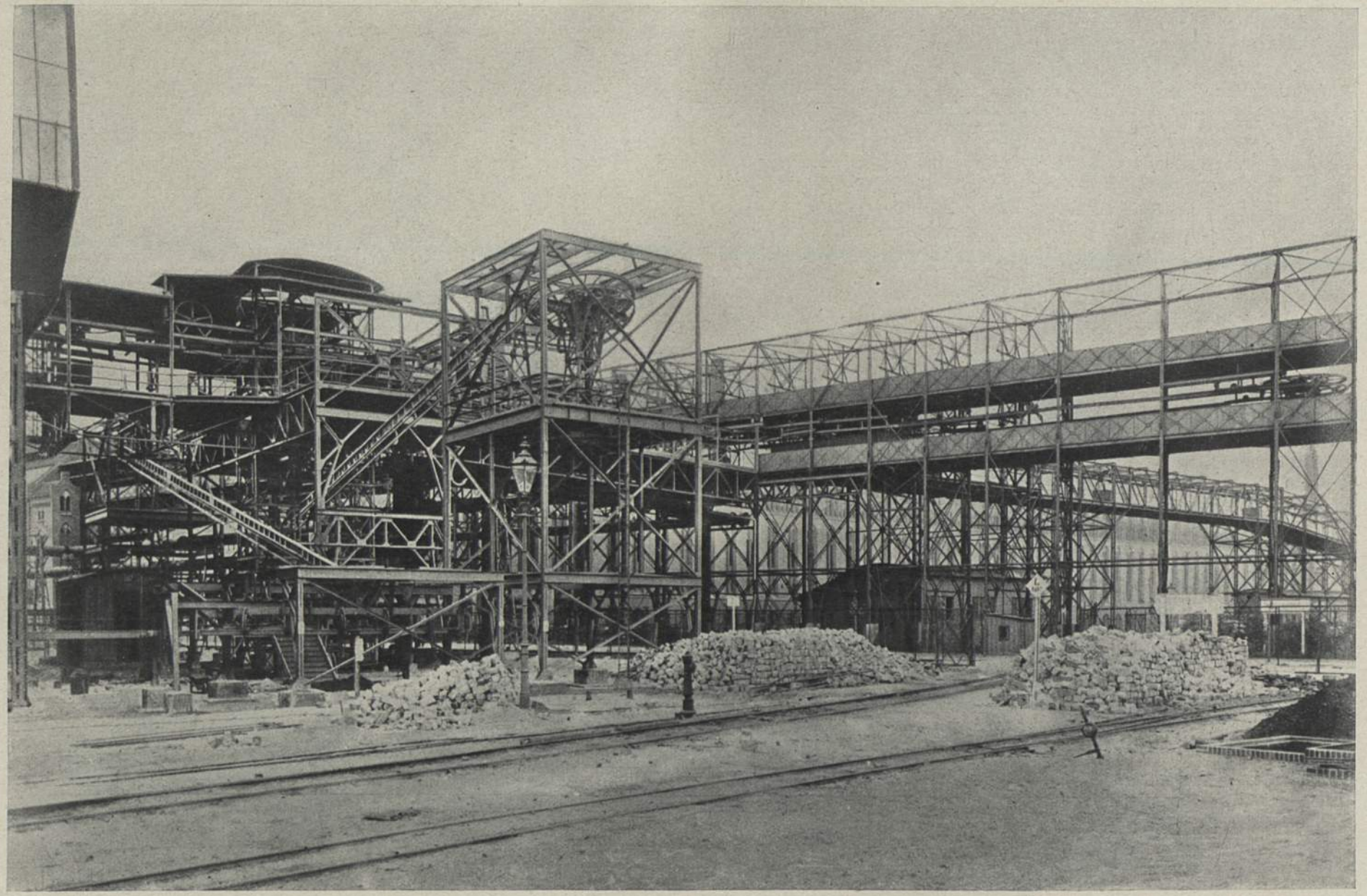
55. Winkelstelle mit Zugseildurchführung

Das Zugseil läuft an der Winkelstelle über ein Rad mit gleichem Krümmungshalbmesser wie das Gleis und bleibt dadurch gespannt. Bauart Adolf Bleichert & Co., Leipzig



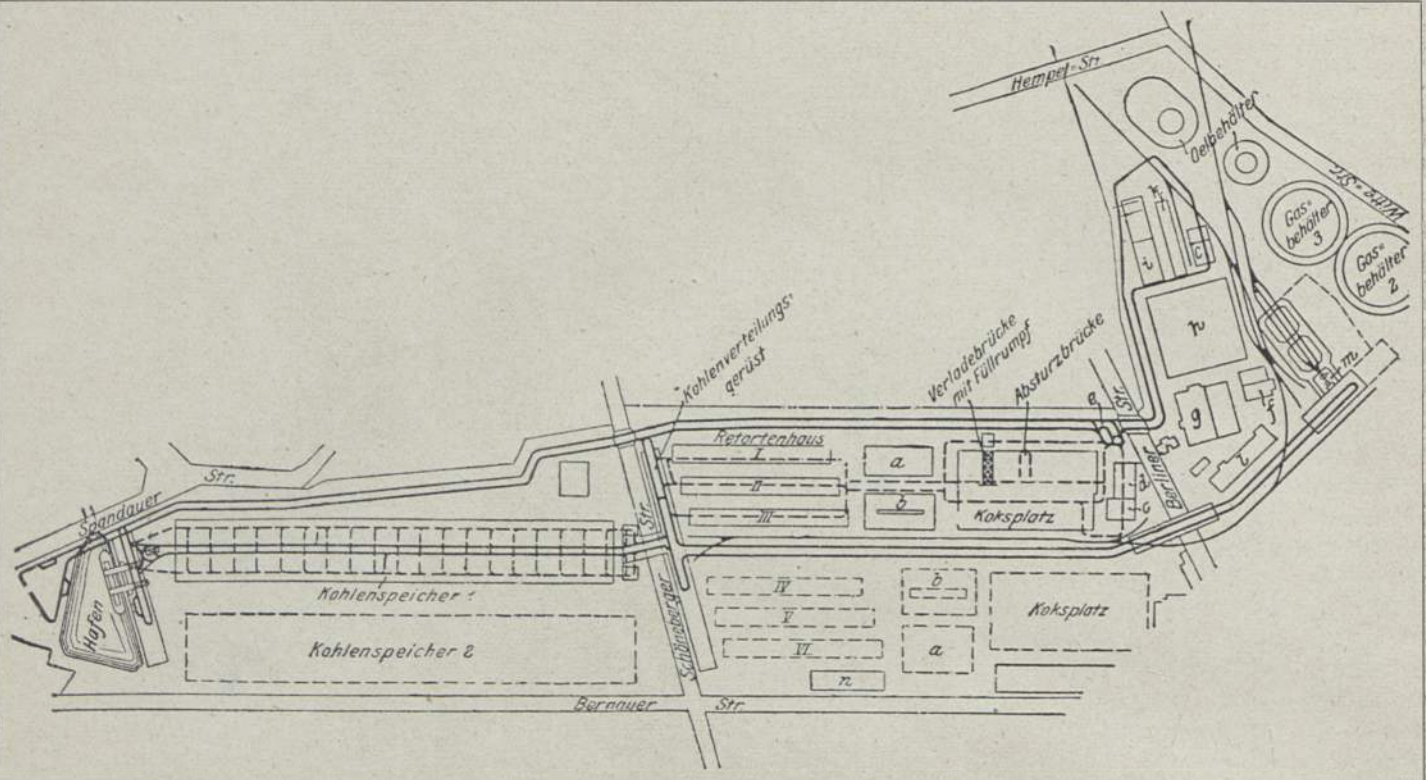
56. Drehweiche mit wagerecht beweglicher Zunge

Die Weichenzunge (im Bilde rechts) wird durch eine Feder an das Hauptgleis gedrückt. Soll der von rechts kommende Wagen auf dem Hauptgleis weiterfahren, dann muß die Zunge von Hand beiseitegezogen werden. Bauart Adolf Bleichert & Co., Leipzig



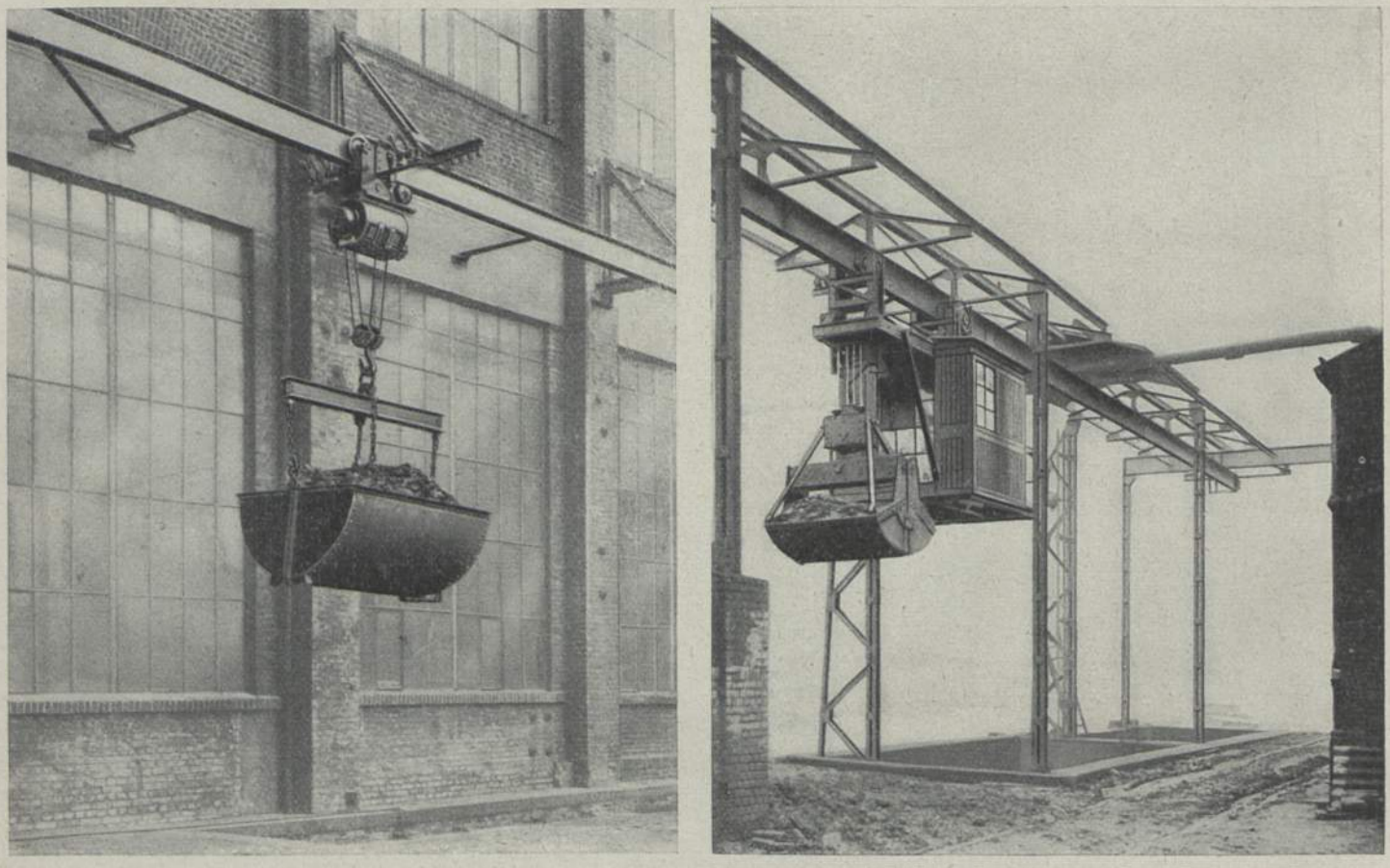
57. Auffahrt zum Kohlenverteilungsgerüst der Tegeler Gasanstalt

Wie der Lageplan (Bild 58) zeigt, liegt das Gerüst fast in der Mitte des Geländes. Im Zickzackwege werden die Seilbahnen von den tief liegenden Kohlenbunkern auf das hohe Verteilungsgerüst geführt, von wo die Seilstränge ihren Weg zu den einzelnen Anlagen nehmen




58. Lageplan der Tegeler Gasanstalt mit Hafen und Förderanlagen

18 Kilometer Seilbahn erschließen das 80 000 Quadratmeter umfassende Grundstück, das durch zwei Straßen in drei Teile zerschnitten, durch die darüber hinwegführenden Förderanlagen aber doch zu einem einheitlichen Ganzen zusammengeschlossen wird

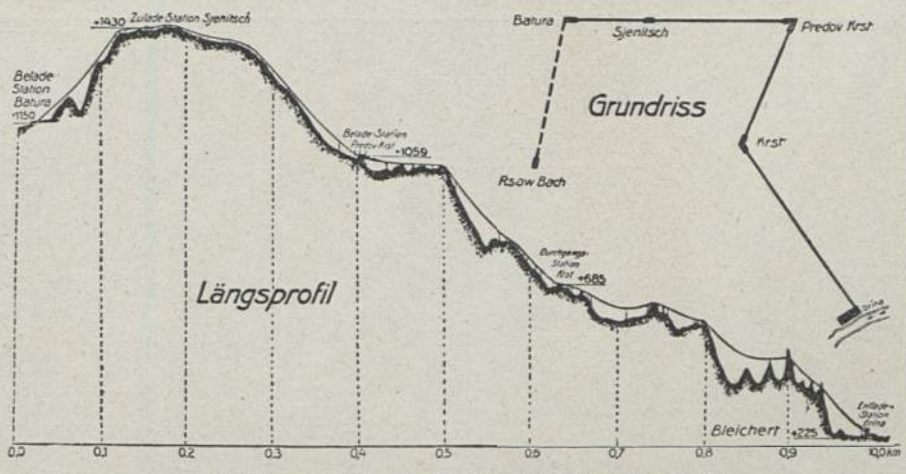


59. Elektrische Hängebahnen

Links einfacher Wagen, rechts Wagen mit Selbstgreifer, Windwerk und Führerstand. Bauart Demag, Duisburg

daß jedes Fahrzeug an seinem Stromabnehmer eine lange Isolierleiste hinter sich herzieht, die den Fahrdraht von unten abdeckt.

In Krümmungen sind Widerstände in die zugehörigen Leitungsabschnitte gelegt, damit die Fahrzeuge hier von selbst langsamer fahren als auf geraden Strecken. Wenn eine Weiche in gefährlicher Stellung liegt, bleibt der Motor in genügender Entfernung stehen; sobald die Zunge richtig gelegt ist, fährt der Wagen von selbst wieder an.




60. Aufriß und Grundriß einer Seilbahn in Serbien

„Für die Bedienung einer ganzen Elektro-Hängebahnstrecke ist", so schreibt von Hanffstengel, „in der Regel nur Ein Arbeiter an der Beladestelle erforderlich, da bei einer mit den nötigen Sicherheitsvorrichtungen ausgestatteten Anlage die Wagen die ganze Bahnstrecke selbsttätig durchfahren und sich meist auch selbsttätig entleeren. Häufig findet während der Fahrt eine Wägung des Nutzinhalts der Wagen durch eine automatische, selbstregistrierende Wage statt. Der Arbeiter, der die Wagen beladet, bedient einen Schalter, durch den er die Blockstelle an der Beladestelle aus- und einschalten kann. Er läßt den Wagen vorfahren, hält ihn an der gewünschten Stelle durch Ausrücken des Schalters an und schickt den Wagen nach der Beladung weiter, indem er den Schalter von neuem einrückt. Der folgende Wagen, der bisher auf der vorhergehenden Blockstrecke zurückgehalten wurde, rückt dann selbsttätig nach."

Wenn man die Fahrzeuge so einrichtet, daß die gekippten Mulden sich nach der Entleerung von selbst wieder aufrichten, und auch noch selbsttätig arbeitende Belade-Einrichtungen vorsieht, so kann der gesamte Betrieb ohne jeden menschlichen Eingriff vor sich gehen. Einstellbarkeit des Entleerungsanschlags gibt die Möglichkeit, Wagen mit wechselndem Inhalt über die Strecke zu schicken und die verschiedenen Güter so entladen zu lassen, daß jede Gattung in einen Sonderbehälter eingeschüttet wird.

Welch ausgezeichnete Arbeit eine gut eingerichtete Elektro-Hängebahn zu leisten vermag, geht aus der Schilderung hervor, die von Hanffstengel über die Anlage der Deutschland-Grube in Schwientochlowitz gibt:

„Die Wagen werden aus den Füllrümpfen der Aufbereitung mit verschiedenen Kohlensorten beladen, gelangen zu einer Elektro-Seilbahn, die sie über eine schräge Brücke auf die Höhe der Bunker hebt, und fahren dann auf vielfach gewundenen Wegen zwischen den Schachtgebäuden hindurch nach dem alten Kesselhaus, den Füllrümpfen für den Landverkauf, aus denen Straßenfuhrwerke beladen werden, und dem neuen Kesselhaus, von wo sie zur Aufbereitung zurückkehren, ohne ihre Fahrt unterbrochen zu haben. Irgendeine Bedienung ist auf dem ganzen Weg nicht erforderlich, weil der Lagerarbeiter an der Aufarbeitung bestimmen kann, an welcher Stelle der betreffende Wagen sich automatisch entleeren soll, so daß jede Kohlensorte in den richtigen Bunker gelangt .... Will man bei derartigen Anlagen vermeiden, daß die Wagen unnötigerweise die ganze Bahnstrecke durchlaufen, wenn sie nach einem näher gelegenen Punkt zu fördern haben, so wird zur Abkürzung des Wegs eine durch Weichen angeschlossene Umkehrschleife eingebaut."

Elektro-Hängebahn- wie Seilbahn-Wagen können auch mit Winden zum Hinablassen des Wagenkastens oder zum Senken von Selbstgreifern ausgerüstet werden. Wenn noch ein Führerstand eingebaut ist, so stellt solch ein Fahrzeug nichts anderes mehr dar als einen fahrbaren Kran. Die Betrachtung seines Baus führt uns so zu der nächsten Gattung der Förder-Einrichtungen hinüber, zu den Hebezeugen.

# 23. Hebezeuge

Die Arbeit des Lastträgers ist von jeher als besonders hart und drückend empfunden worden. Dies spricht sich aus in bildlichen Ausdrucksformen: ‚Jemandem eine Last aufbürden' — ‚Schwer daran tragen' — und anderen. Das Drückende liegt nicht etwa in der großen Muskelanstrengung, denn die Arbeit des Schmieds strengt gewiß nicht minder an und ist gleichwohl seit alten Zeiten als eine vornehme empfunden worden. Die drückende Empfindung wird vielmehr dadurch hervorgerufen, daß einmal der Lastentransport eine nur körperliche Arbeit ohne jeden Aufwand von Denkarbeit ist, und daß er zudem eine unproduktive Arbeit ist. Denn durch den Transport wird keinerlei Veredelung des Stoffs herbeigeführt, sondern nur eine Raumveränderung."

Mit diesen Worten beginnt Kammerer sein treffliches Werk über „Die Technik der Lastenförderung einst und jetzt". Die Sätze kennzeichnen vortrefflich die Stellung, welche den Hebezeugen im Kulturkreis zukommt.

Schiller nennt die Natur entgöttert, weil sie knechtisch dem „Gesetz der Schwere" dient. Auch des Menschen Kampf mit der Natur, den man Fortentwicklung der Technik nennt, wäre wahrhaft entgöttert, wenn wir jegliche Last durch eigene Muskelkraft emporheben müßten. Von Urbeginn an strebte deshalb der Mensch danach, sich von dieser niedrigsten und drückendsten aller Arbeiten zu befreien. Und wenn es ihm auch erst in jüngster Zeit glückte, die Überwindung der Schwere toten Naturkräften aufzubürden, so gelang ihm doch schon sehr früh wenigstens die Umwandlung des Hebens in bequemere Bewegungsformen, zu denen sich noch der Vorteil einer scheinbaren Lastverminderung gesellte.

61. Anwuchten eines Steinblocks
Darstellung der Hebelwirkung nach alten Kupfern

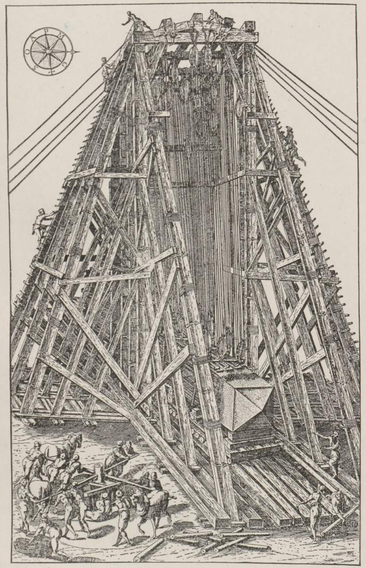
Die einfachste aller Maschinen, vermutlich die erste, die je erdacht wurde, ist ein Hebezeug: der Hebel.

Wenn ein sehr schwerer Gegenstand, etwa ein Steinblock, über ungeebnetem Boden fortbewegt werden soll, ist es notwendig, die sehr starke Reibung zwischen seiner Auflagefläche und dem Boden zu vermindern. In vollständigster Weise geschieht das, wenn der Block in die Höhe gehoben wird. Dazu ist aber oft die Kraft von so viel Menschen erforderlich, daß längst nicht genügend Hände an dem Block anzugreifen vermögen. Darum muß man sich mit einer Verminderung der Reibung an Stelle ihrer Beseitigung begnügen, indem man die Last nur anwuchtet, das heißt die Auflagefläche verschmälert (Bild 61). Schon in uralten Zeiten bediente sich der Mensch für dieses Anwuchten eines Zwischenmittels, indem Stangen, dicke Äste etwa, unter den Stein geschoben wurden. Sie stellten einarmige Hebel dar (Bild 63).

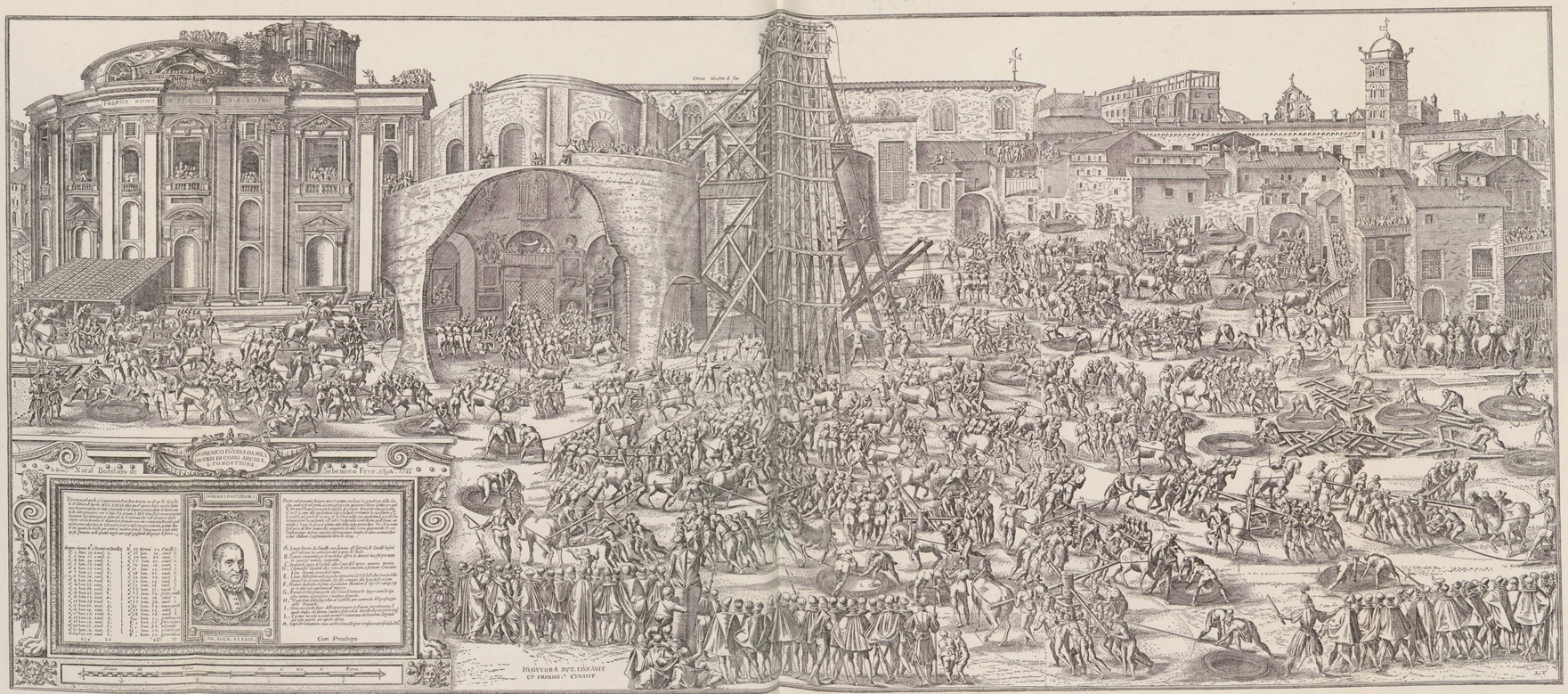
Bei solchen Maschinen greifen Kraft und Last auf derselben Seite des Unterstützungspunkts an. Jede der unter den Steinblock geschobenen Stangen schafft sich selbst einen Drehpunkt an ihrem Ende, indem dieses sich auf fest zusammengepreßte Erde stützt. Der Angriffspunkt der Last, also die Stelle, an welcher der Stein den Hebel berührt, und der Angriffspunkt der Kraft liegen auf derselben Hebelseite, vom Unterstützungspunkt aus gesehen. Der Kraftpunkt aber ist weiter vom Unterstützungspunkt entfernt. Hierdurch wird der Widerstand, den der vorwärtszuschiebende Block durch die Reibung auf dem Boden findet, den wuchtenden Armen längst nicht in seiner ganzen Größe fühlbar. Nur ein Teil davon ist zu überwinden.

Wenn zum Beispiel der Lastarm des Hebels sich zu dem Kraftarm verhält wie 1 : 5, dann braucht zum Vorwärtsbringen des Steins nur mit einer Kraft gestemmt zu werden, die $^1/_5$ des Reibungswiderstands ausmacht, und der Block kommt doch vorwärts. Denn das einfache und schon durch die bloße Anschauung glaubhafte Hebelgesetz lautet: Die aufzuwendende Kraft verhält sich zum Widerstand (Last), wie die Länge des Kraftarms zur Länge des Lastarms.

Aber es ist gleichfalls ohne weiteres einzusehen, daß die wuchtenden Männer das, was sie an Kraft sparen, an Wegstrecke zugeben müssen. Um den Stein über 1 Zentimeter zu bringen, müssen sie ihre Arme um ein Fünffaches, also um 5 Zentimeter, strecken. Die Natur ist ihrer ganzen Art nach eben nicht imstande, dem Menschen etwas zu schenken. Sie verlangt für die gleiche Leistung immer die gleiche Arbeitsaufwendung. Was sie mit der Rechten gibt, indem sie die Last geringer erscheinen läßt, das nimmt sie mit der Linken, indem sie den von der Kraft zurückzulegenden



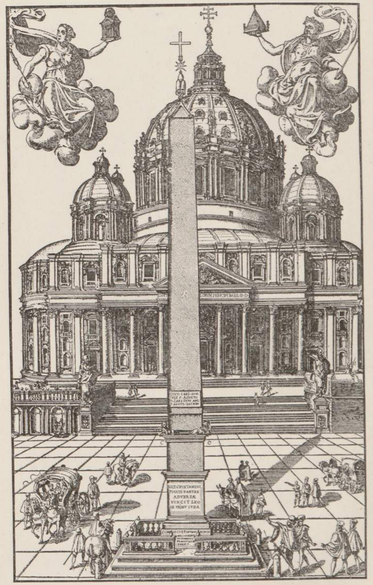
Das Gerüst mit liegender Säule



Anordnung der Göpel beim Abbruch des Obelisken vom alten Standort

Versetzung des altägyptischen Obelisken Julia in Rom unter Papst Sixtus V. im Jahre 1586

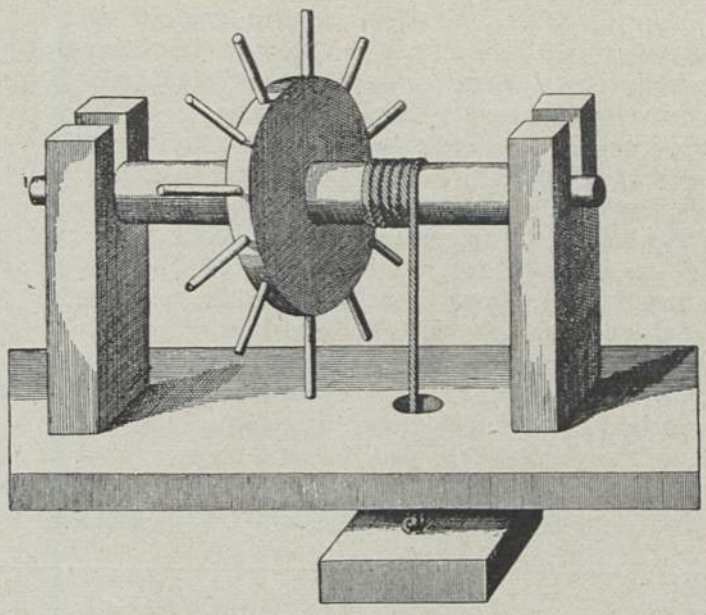
Nach einem Kupferstich von Natal Bonifacio von Sebenicco



Platz vor St. Peter mit dem Obelisken

Weg entsprechend verlängert. Welche Hilfsmittel man auch anwenden möge: das Produkt Kraft × Weg, also die aufzuwendende Arbeit, bleibt immer gleich. Und das kann auch gar nicht anders sein, da die Welt nun einmal unter der unerbittlichen Satzung steht, die wir das Gesetz von der Erhaltung der Energie nennen.

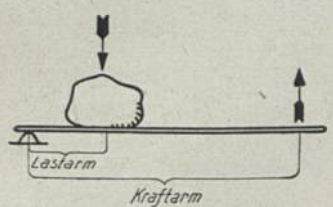
Greifen Kraft und Last nicht auf derselben Seite des Hebels an, liegen ihre Angriffspunkte vielmehr diesseits und jenseits des Unterstützungspunkts, so haben wir einen zweiarmigen Hebel vor uns (Bild 64). Wiederum gilt hier die Regel: Die Kraft verhält sich zur Last wie der Kraftarm zum Lastarm. Man ist also theoretisch imstande, eine jede Last, sie möge noch so schwer sein, mit einem Hauch von Kraft zu heben, wenn nur der Kraftarm genügend lang gemacht wird. Praktisch aber ergibt sich bald eine Grenze für diese „Übersetzung", da ein sehr langer Hebelarm nicht mehr genügende Widerstandsfähigkeit zur Übertragung der an seinem Ende angreifenden Kraft hat, wenn man ihn nicht außerordentlich kräftig ausbildet. Und dann hebt das Eigengewicht des Hebels, das ja mitbewegt werden muß, jeden Vorteil auf. Darum hatte Archimedes unrecht, als er im ersten Jubel über die Auffindung des Hebelgesetzes ausrief: „Gebt mir einen festen Punkt im Weltraum, und ich werde die Erde aus ihren Angeln heben!"



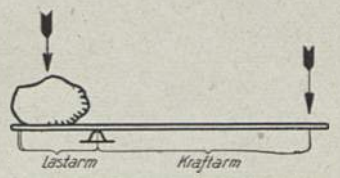
62. Rad an der Welle
Aus Daniel Mögling „Mechanische Kunstkammer", 1629

In seiner einfachen linearen Gestalt, also als Stange, wird der Hebel von der Technik nur gelegentlich, in wenig beträchtlichem Maß, angewendet. Noch heute benutzt man den Einarmer zum Vorwärtsschieben von Geldschränken und anderen Schwerlasten, den Zweiarmer in Form der Brechstange zum Aufnehmen von Steinpflaster. Die uralte Maschine ist aber dennoch an jedem neuzeitlichen Hebezeug zu finden, wenn auch in einer Gestalt, die ihr Urwesen gänzlich verhüllt.

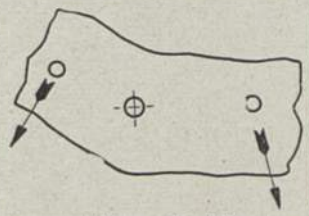
Für die Geltung der Hebelgesetze ist es gleichgültig, welche Form die Hebelarme haben; sie können beliebig gestaltet sein (Bild 65). So kann man zum Beispiel jeden Arm eines zweiarmigen Hebels als halbkreisförmige Scheibe ausbilden. Auf diese Weise gelangt man zur Rolle. Wenn ihr Drehpunkt, der dem Unterstützungspunkt des stangenförmigen Hebels entspricht, im Raum feststeht, dann ergibt der Gebrauch der Rolle keine Kraftersparnis, denn der Kraftarm ist ja hier immer gleich dem Lastarm; wie die Rolle sich auch unter dem Zug des umgelegten Seils stellen mag: die Länge jedes Arms bleibt stets gleich dem Halbmesser der Scheibe. Die feste Rolle (Bild 66) gewährt jedoch in vielen Fällen eine



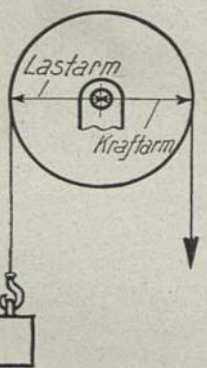

63. Einarmiger Hebel



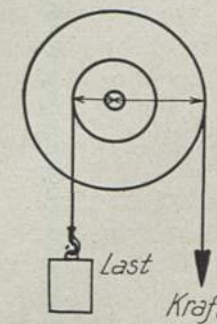

64. Zweiarmiger Hebel



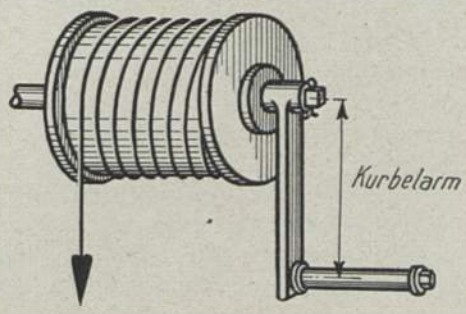
65. Unregelmäßig gestalteter Hebel



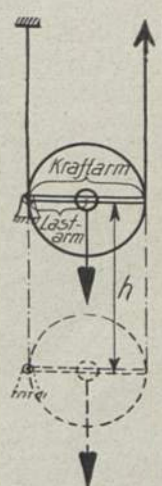

66. Die feste Rolle
wirkt als zweiarmiger Hebel mit gleichlangem Last- und Kraftarm




67. Das Rad an der Welle
wirkt als zweiarmiger Hebel, bei dem der Lastarm dem Halbmesser der Welle, der Kraftarm dem Halbmesser des Rades entspricht




68. Die Kurbelwinde
entsteht aus dem Rad an der Welle; von der Radscheibe ist nur ein Radius (Kurbelarm) übrig geblieben




69. Die lose Rolle
ist ein einarmiger Hebel mit dem Halbmesser der Rolle als Last- und dem Durchmesser als Kraftarm

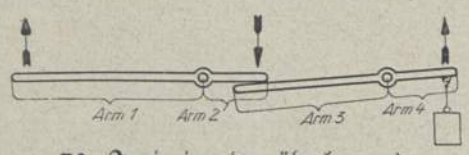
sehr erwünschte Bequemlichkeit, indem sie gestattet, eine Last durch Niederziehen des Seils emporzuheben. Die Kraftäußerung dieser Art fällt dem Menschen leichter als das Heben, da beim Ziehen das Körpergewicht mit ausgenutzt werden kann.

Anders aber liegen die Dinge, wenn an die Stelle der festen Rolle die lose tritt, das heißt eine solche, deren Drehpunkt im Raum wandern kann (Bild 69). Die lose Rolle ist in jedem Augenblick ihrer Tätigkeit nichts anderes als ein einarmiger Hebel, bei dem die Kraft am Ende, die Last in der Mitte angreift. Da also der Kraftarm doppelt so groß ist wie der Lastarm, so läßt sich mit Hilfe einer losen Rolle die Last durch die Hälfte der Kraft heben, wie sie beim unmittelbaren Angriff notwendig wäre.

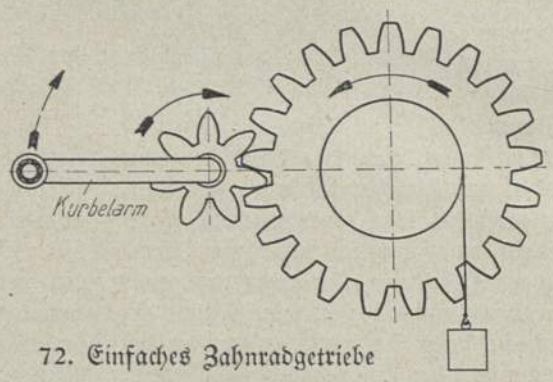
Findet nun aber auch hier eine entsprechende Verlängerung des Kraftwegs statt? Das ist selbstverständlich der Fall, da wir die Natur unter keinen Umständen betrügen können. Wenn der Mittelpunkt der Rolle, also der Angriffspunkt der Last, sich aus der in Bild 69 gezeichneten unteren Lage in die darüber angedeutete gehoben, wenn also die Last den Weg h zurückgelegt hat, dann müssen offenbar die Seilstücke auf beiden Seiten um die Strecke h verkürzt worden sein. Notwendigerweise hat der Ziehende also eine Seillänge von 2 h aufhissen müssen.

Eine kraftsparende Anwendung des zweiarmigen Hebels stellt das Rad an der Welle dar (Bild 62). Auf Bild 67 sehen wir zwei Rollen von verschiedenem Durchmesser fest miteinander verbunden. An dem größeren Rad greift die Kraft, an dem kleineren die Last an. Offenbar haben wir hier einen zweiarmigen Hebel mit verschiedener Länge der Arme vor uns. Die an der kleinen Rolle hängende Last ist durch das Drehen an dem größeren Rad leichter zu heben als durch unmittelbares Angreifen an dem Lastseil. Dafür muß die Kraft aber den ganzen Umfang des großen Rads durchlaufen, bis die Last sich um eine Strecke gehoben hat, die dem Umfang des kleinen Rads entspricht. Denkt man sich die große Rolle so weit weggeschnitten, daß davon nur noch ein schmales Halbmesserstück übrig bleibt, dann sind wir zur Kurbelwinde gelangt (Bild 68). Die Kraftverhältnisse zu erkennen, die hierbei wirken, ist nach dem vorher Gesagten sehr einfach. Je länger der Kurbelarm, desto geringer die aufzuwendende Kraft, desto länger aber auch der zurückzulegende Weg für jede Umdrehung der Lasttrommel.

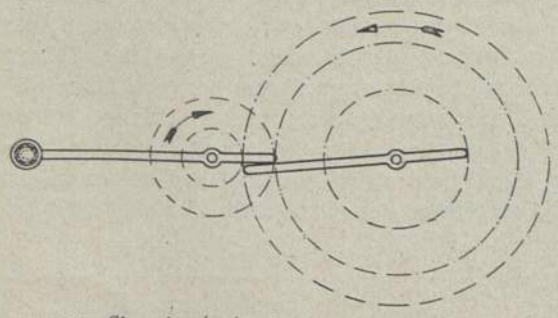
Selbst das schon recht verwickelt erscheinende Zahnradgetriebe läßt sich, so unwahrscheinlich das auf den ersten Blick dünkt, von einfachen Hebeln ableiten. Wir denken uns zwei zweiarmige Hebel so zusammengerückt, daß die Armenden einander etwas überlappen (Bild 70). Wenn der lange Arm links gehoben wird, hebt sich auch der kurze Arm rechts. Hierbei hat eine zweimalige Übersetzung stattgefunden, da Arm 1 länger ist als Arm 2 und wiederum Arm 3 länger als Arm 4. Um die rechts hängende Last emporzuheben, werden wir also links nur eine Kraft aufzuwenden brauchen, die




70. Zwei einander überlappende zweiarmige Hebel

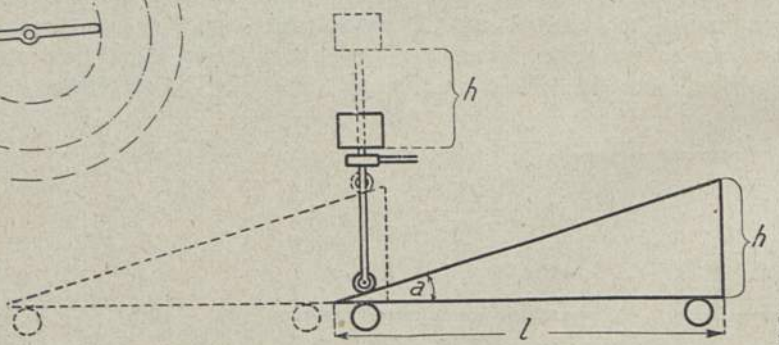



72. Einfaches Zahnradgetriebe

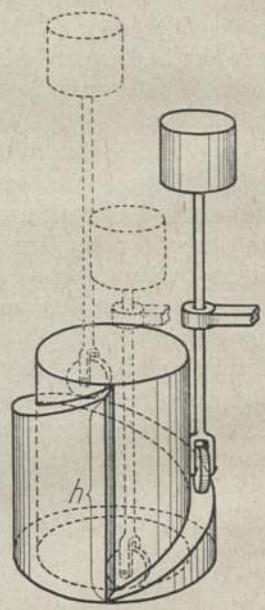


71. Grundprinzip des Zahnradgetriebes

Der linke Hebel wird zu einer Kurbelwinde, der rechte zu einem Rad an der Welle ausgebildet. Die Räder greifen mittels Zähne ineinander




73. Wirkungsweise der schiefen Ebene

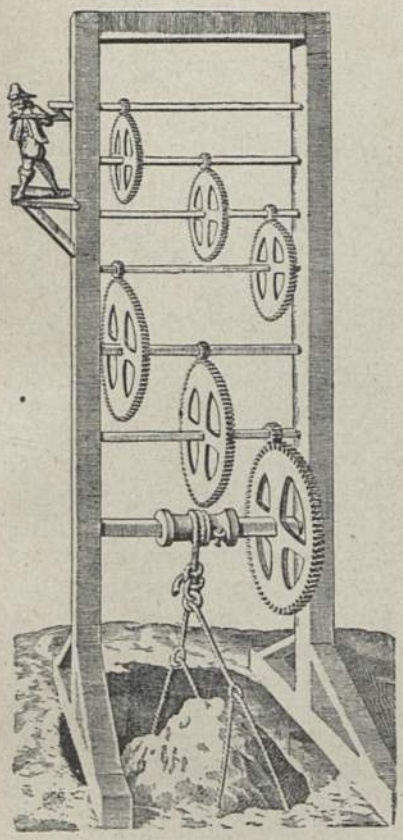



74. Ein Gang der Schraube

entsteht durch Aufwicklung der schiefen Ebene um einen Zylinder

entsprechend den Armverhältnissen verringert ist. Wir bilden nunmehr Arm 2 zu einem Rad aus, Arm 1 als Kurbel, die mit diesem fest verbunden ist. Arm 3 wird ein großes Rad, das sich um den zweiten Unterstützungspunkt dreht, und Arm 4 ein kleines, hiermit verbundenes Rad (Bild 71). An den Übersetzungsverhältnissen hat sich nichts geändert. Geben wir nun durch Einschneiden von Zähnen den Rädern 2 und 3 die Möglichkeit, sich beim Drehen aufeinander abzuwickeln, dann haben wir ein kraftsparendes Zahnradgetriebe vor uns (Bild 72). Wenn die Durchmesser der beiden Zahnräder sich zueinander verhalten wie 1:3, so muß der lange Kurbelarm dreimal herumgedreht werden, bis sich die Last um die kurze Strecke hebt, die dem Umfang des kleinen Lastrads entspricht.

Um sehr schwere Lasten mit wenig Kraft, aber durch sehr viele Kurbeldrehungen emporwinden zu können, muß man die Zahnrad-Übersetzung sehr groß machen. Da aus baulichen Gründen weder das Treibrad allzuklein, noch das angetriebene Rad allzugroß gemacht werden können, so unter-



75. Sechsfache Zahnradwinde
Aus Salomon de Caus „Von gewaltsamen Bewegungen usw."

teilt man die Übersetzung, indem man eine größere Zahl von Zahnrädern aneinanderreiht. Bild 75 zeigt eine solche Vielfachübersetzung in einer alten Form.

Eine zweite einfache Maschine, die krafterspärend wirkt, ist die schiefe Ebene. Um eine Last auf die Höhe h emporzuheben, kann man einen Keil von der Form, die Bild 73 zeigt, daruntergeschieben. Die Kraft hat während des Hubs den Weg l zurückgelegt, der notwendigerweise länger als h ist, solange der Winkel a kleiner bleibt als 45 Grad. Die aufzuwendende Kraft ist daher um das Verhältnis l : h verringert.

Anwendung in der Hebetechnik findet die schiefe Ebene in ihrer ursprünglichen Gestalt sehr selten. Häufig wird sie jedoch in Form der Schraube gebraucht. Die Schraubenlinie entsteht, wenn eine schiefe Ebene um einen Zylinder gewickelt wird. Ist der Durchmesser dieses Zylinders gerade so groß, daß beim Umwickeln der Endpunkt der schiefen Ebene senkrecht über dem Anfangspunkt liegt, dann ist ein Schraubengang entstanden. Bei jeder vollen Drehung der Schraube wird eine angehängte Last um die Höhe eines Schraubengangs gehoben, die der Höhe h auf Bild 74 entspricht. Die einfachen Gesetze der schiefen Ebene können also ohne weiteres auch auf Schrauben angewendet werden.

Die schlichteste Gebrauchsform der Schraube ist die Schraubwinde, die oft zum Anheben von Wagen gebraucht wird (Bild 76). Besonders umfangreiche und kräftige Vorrichtungen dieser Art stellen die Lokomotivwinden dar (Bild 77). Auch sonst wird die Schraube gar nicht selten dort angewendet, wo besonders schwere Lasten über kurze Strecken zu heben sind. Man findet sie bei Hebebrücken und auch an Walzgerüsten, zur Einstellung der häufig wechselnden Entfernung zwischen Ober- und Unterwalze.

Dem langsamen Anheben schwerer Lasten dient ferner eine eigentümliche Zusammenstellung von Schraube und Zahnrad (Bild 78). Der Schraubenbolzen ist hierbei gegen jede Längsbewegung festgehalten, und durch seine Drehung wird das eingreifende Zahnrad in Umdrehung versetzt. Man kann sich den Kranz des Zahnrads entstanden denken aus der zum Schraubenbolzen gehörigen Mutter. Hierfür stelle man sich vor, daß von der Mutter, die den Schraubenbolzen zunächst völlig umgab, so viel fortgeschnitten wurde, daß nur noch ein schmaler Streifen parallel der Längsachse des Bolzens übrigblieb. Dieser Streifen ist kreisförmig nach oben gebogen worden, so daß er jetzt den Zahnkranz bildet.

Bei jeder vollen Umdrehung der Schraube wird der Zahnkranz nur um eine Ganghöhe weitergeschoben. Es findet also bei der Schraube ohne Ende oder dem Schneckengetriebe, wie man die Vorrichtung nennt, eine sehr starke Übersetzung nach unten statt. Gerade deswegen, weil also mit geringer Kraft gearbeitet werden kann, ist die Vorrichtung zum Heben schwerer Gewichte besonders geeignet.

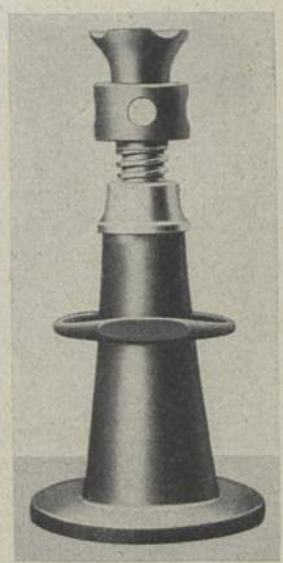
Von den hier geschilderten Grundelementen der Hebetechnik wird am häufigsten die Rolle angewendet. Bei der praktischen Benutzung ist ihre Achse in einem Gestell gelagert, das man den Kloben nennt. Das Ganze, also Rolle und Kloben, heißt Flasche (Bild 79). Die feste Rolle hängt selbst am Kloben, bei der losen Rolle trägt das Gestell die Last. Die Vereinigung von fester und loser Rolle ergibt den Flaschenzug. Bei der losen Rolle ist die anzuwendende Kraft, wie wir aus der Erörterung des Bildes 69 wissen, gleich der halben Last. Die feste Rolle bringt keine Krafterspärnis, sie dient nur dazu, der angreifenden Kraft eine geeignetere Richtung zu geben. Der zweirollige Flaschenzug erfordert also zur Hebung einer Last nur die halbe Kraft.

Wenn wir zwei lose Rollen anwenden, so gelangen wir vom zweirolligen zum vierrolligen Flaschenzug (Bild 80). Offenbar müssen beim Emporziehen der Last um ein bestimmtes Stück 4 Seilstücke um ebensoviel verkürzt werden. Wir dürfen hieraus schließen, daß der vierrollige Flaschenzug nur noch ein Viertel der Kraftanwendung erheischt. Beim sechsrolligen genügt ein Sechstel, beim achtrolligen ein Achtel der Kraft, wie die rechnerische Nachprüfung bestätigt (Bild 81, 82).

So kann man mit der Vermehrung der Rollen theoretisch unbegrenzt weiterschreiten, und immer geringer wird rechnungsmäßig die Kraft, mit der auch die schwerste Last zu heben sein muß. Aber gerade wie beim Hebel legen die rauhen Tatsachen bald ihren Widerspruch ein. Die Reibung der vielen Rollenachsen in ihren Lagern und die Biegungswiderstände des Seils überwiegen bald, so daß man in der Hebetechnik kaum je über den achtrolligen Flaschenzug hinausgeht, also höchstens vier feste und vier lose Rollen anwendet.

Die Vertreter jeder einzelnen dieser Gattungen können untereinander liegen, wobei aber eine sehr bedeutende Baulänge des Flaschenzugs entsteht. Man ordnet deshalb bei den größeren Flaschenzügen die Rollen nebeneinander in je einem großräumigen kräftigen Gehäuse an.

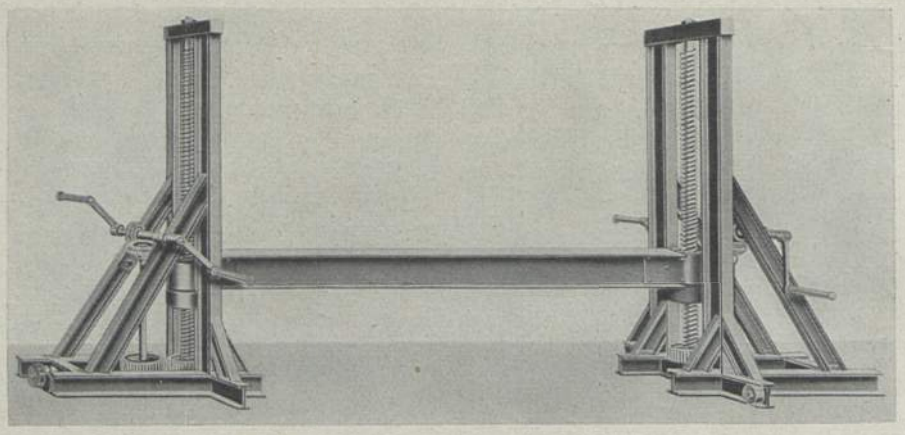
Sehr merkwürdig ist die Wirkung eines Flaschenzugs, der nur eine ganz geringe Rollenzahl hat und trotzdem eine bedeutende Krafterspärnis gestattet. Er heißt Differential-Flaschenzug und besteht aus einer festen Flasche, in der zwei miteinander verbundene Rollen von verschiedenem Durchmesser liegen, und einer einfachen losen Flasche (Bild 83). Als Zugmittel wird stets eine Kette verwendet. Jede der beiden festen Rollen hat auf dem Boden ihrer Rille kleine zahnartige Ansätze, welche in die Öffnungen der Kettenglieder eingreifen, so daß kein Rutschen stattfinden kann.



76. Schraubwinde
Bauart AEG, Berlin

Die Kette ist, wie Bild 83 zeigt, in endlosem Zug um alle drei Rollen herumgeschlungen. Zieht man an dem Kettentrum 1, so wird das Trum 2 verkürzt, aber

das Trum 3 gleichzeitig nachgelassen. Die Last hebt sich also immer nur um ein Stück, das von dem Unterschied (Differenz) zwischen der aufgehißten und der nachgelassenen Kettenlänge abhängig ist. Es wird dafür gesorgt, daß dieser Unterschied gering bleibt, indem der Durchmesser der kleinen Rolle in der Oberflasche nur wenig kürzer gemacht wird als der Durchmesser ihrer Nachbarin; demgemäß sind auch die Umfänge wenig verschieden.



77. Lokomotivwinde
Bauart AEG, Berlin

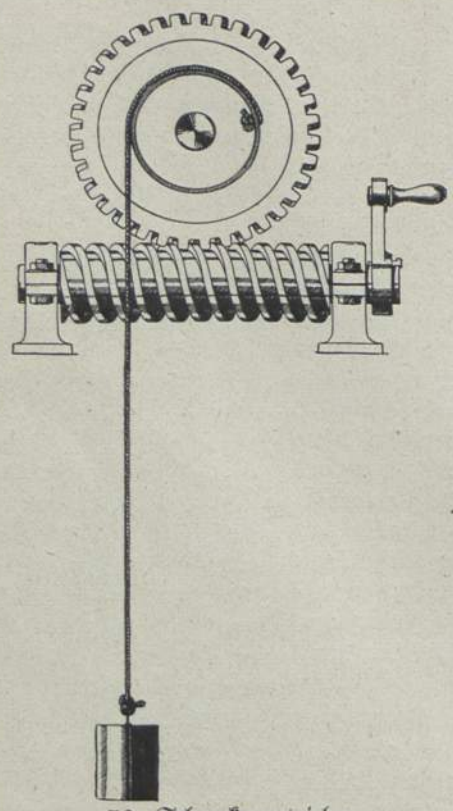
Meistens hat die kleinere Rolle nur Einen Kettenzahn weniger als die große. Also verkürzt sich die Kette zwischen dem Punkt, an dem sie von der kleineren Rolle abläuft, bis zu dem Punkt, an dem sie auf die größere aufläuft, bei jeder vollständigen Umdrehung der festen Doppelrolle nur um die Länge Eines Kettenglieds, und die Last wird gar nur um die halbe Länge eines Kettenglieds gehoben, da die Gesamtverkürzung sich ja auf zwei Seiltrums verteilt. Das Trum 1 muß also um ein sehr bedeutendes Stück hinuntergezogen werden, wenn man die Last auch nur ein wenig heben will, und die Verringerung der aufzuwendenden Kraft ist dementsprechend.

Wegen der außerordentlichen Langsamkeit seiner Arbeit wird der Differential-Flaschenzug nur gelegentlich zum Heben sehr schwerer Lasten angewendet, während es kein einziges größeres Hebezeug gibt, an dem nicht der gewöhnliche Flaschenzug zu finden wäre.

*

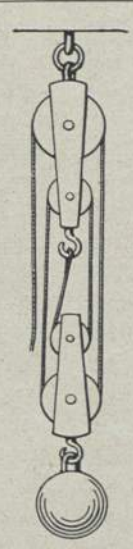
Die kunstvollen, oft gewaltigen Bauten, die wir als Krane bezeichnen, sind letzten Endes nichts anderes als Traggerüste für Flaschenzüge. Die Hebezeuge werden mit vielen Mühen und großen Kosten aufgerichtet, nur damit die kraftsparenden Rollenvorrichtungen in günstiger Lage aufgehängt und bequem benutzt werden können. Ferner ist es Aufgabe der Krane, seitliche Verschiebung der aufgehißten Last, doch meistens nur innerhalb beschränkten Raums, zu ermöglichen. Die Antriebkraft für die Hebeeinrichtungen kann durch die Muskelkraft von Menschen oder Tieren, durch Druckwasser, Preßluft und Dampf erzeugt werden; heute wird sie in überwiegendem Maß aus elektrischen Stromleitungen geliefert.

Die Bezeichnung Kran ist nichts anderes als eine Verkürzung des Worts Kranich. Noch vor hundert Jahren war das Fortlassen der Endbuchstaben nicht gebräuchlich, so daß man sowohl die Vögel wie die Hebezeuge Kraniche nannte. Veranlassung zu dieser Gleichnennung gab die ursprüngliche

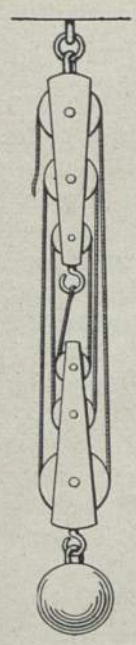


78. Schneckengetriebe

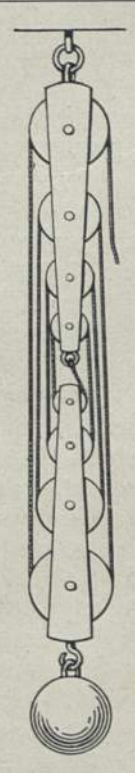
79. Zweirolliger Flaschenzug



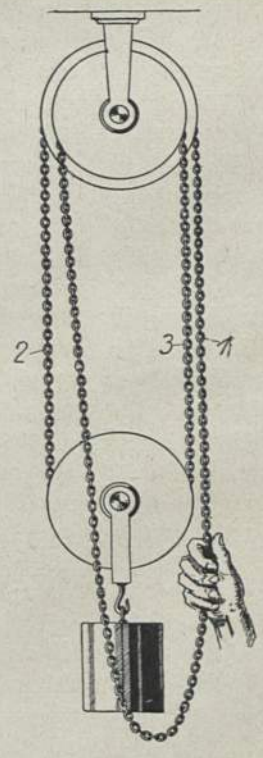
80. Vierrolliger Flaschenzug



81. Sechsrolliger Flaschenzug



82. Achtrolliger Flaschenzug




83. Differential-Flaschenzug

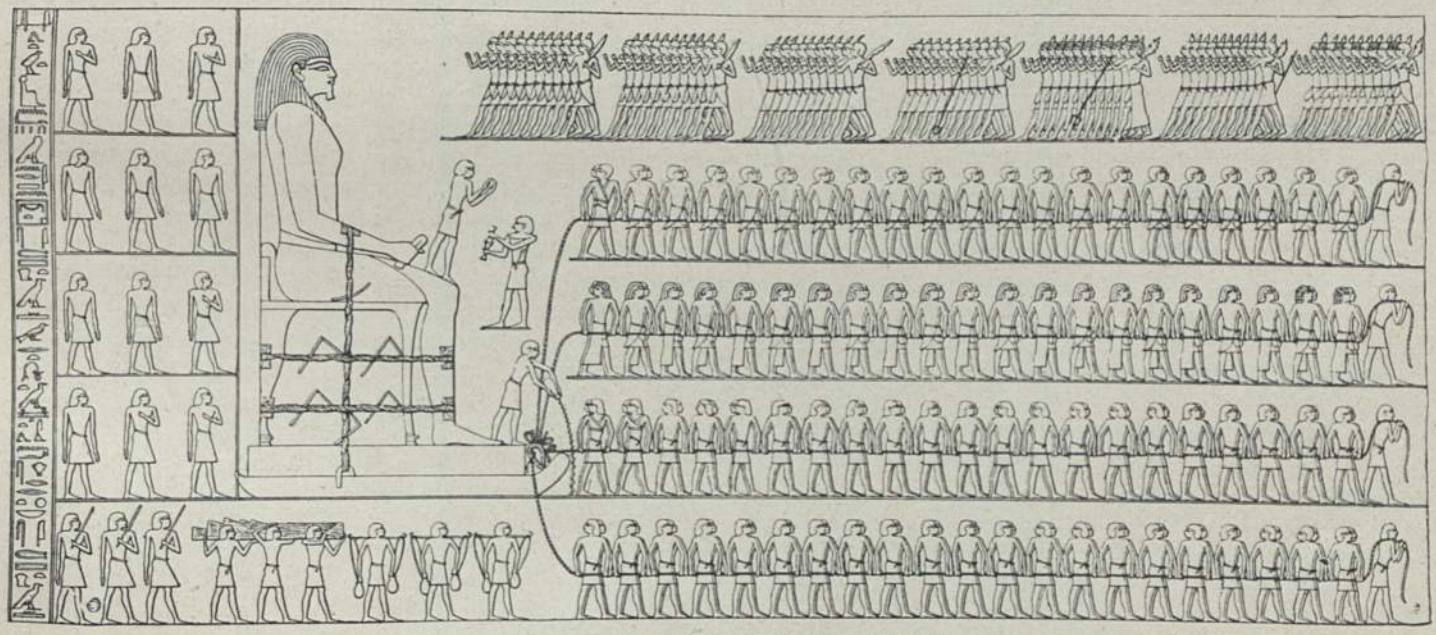
Form der Ausleger, die an den Halsbau des großen, schönen Stelzvogels erinnerte, während das Gerüst, an welches der Ausleger gesetzt war, allenfalls dem Leib des Vogels ähnlich erschien. Jetzt ist diese Gleichheit des Aussehens durch veränderte Bauart fast vollständig verwischt. Aber die Sprache, die offenbar schwerer biegsam ist als eiserne Streben, hat die Erinnerung an die Urform bewahrt.

Krane sind heute unentbehrliche Helfer in jeglichem Betrieb. Von der bescheidenen Winde am Ausleger durchlaufen sie alle Formen und Größen bis zur Gestalt des Turms, der einen ganzen Fabrikbezirk überragt. Sie dienen dem Müller, der Getreidesäcke zum Mahlraum hinaufschaffen will, und setzen die fertigen Anker in Riesen-Dynamos ein; sie heben Papierballen und Lokomotiven, entladen Feldbahnwagen und die gewaltigen Bäuche der Ozeanschiffe. Nichts ist so klein, daß sie es nicht packen, nichts so schwer, daß sie es nicht heben könnten. Die Entwicklung dieser wahrhaften Helfer der Menschheit hat in den letzten Jahrzehnten Fortschritte gemacht, die noch vor einem halben Jahrhundert nicht geahnt werden konnten. Ihre Anfänge aber reichen weit, weit zurück.

Aus den nebelgrauen Uranfängen der Menschheitsgeschichte stammen die ägyptischen Pyramiden, die, etwa achtzig an der Zahl, sich in der Libyschen Wüste erheben. Die größte von ihnen ist die Pyramide des Cheops, deren quadratische Grundfläche eine Seitenlänge von 233 Metern hat, deren Spitze 145 Meter über dem Erdboden emporragt. Diese schon von den Griechen der klassischen Zeit als Altertümer bestaunten, ehrfurchtgebietenden Bauten sind aus gewaltigen Steinquadern gefügt. Seit langem sucht man zu ermitteln, auf welche Art die alten Ägypter diese ungeheuren Lasten zu heben vermochten. Verworfen ist heute die Ansicht, daß sie schiefe Ebenen bis zur Höhe der Pyramidenspitze aufgeschüttet hätten, um so die Blöcke hinaufzuschleifen.

Herodot, der alte griechische Geschichtschreiber, behauptet, daß schon damals Hebezeuge angewendet worden wären. Er berichtet hierüber: „Man baute aber diese Pyramide (gemeint ist diejenige des Cheops) mittels einer Art Stufen wie eine Treppe mit Tritten oder Absätzen. Nachdem sie den ersten Absatz gemacht hatten, hoben sie die anderen Steine durch Maschinen mit kurzen hölzernen Armen, indem sie diese zunächst vom Boden auf die erste Stufenreihe setzten. Nachdem der Stein da hinaufgebracht war, übernahm ihn eine andere Maschine, die auf der ersten Stufenreihe stand; durch diese wurde er wieder zur zweiten Stufenreihe emporgezogen. Denn so viel Stufenreihen (oder Absätze) es gab, ebensoviel Maschinen waren vorhanden; oder sie brachten dieselbe Maschine, da sie einfach und leicht zu versetzen war, auf jede andere Stufenreihe, so oft man den Stein wieder heben wollte. Ich gebe hier die beiden Arten an, so wie mir die Sache erzählt worden ist."

Wie die Hebezeuge der Pyramidenbauer ausgesehen haben, meldet Herodot leider mit keinem Wort. Und es gibt Forscher, die ihre Anwendung überhaupt leugnen wollen. Erman sagt, daß „diese Wunder nur durch Eine Kraft vollbracht sind, durch ungezählte und rücksichtslos ausgenutzte Menschenhände". Dies stimmt auch mit einer anderen Angabe Herodots überein, in der er berichtet, daß an der Cheops-



84. Transport des Standbildes des Dhutotep
Ägyptische Darstellung aus dem Alten Reich

Pyramide 100 000 Menschen 20 Jahre lang gearbeitet und hierbei Rettiche, Zwiebeln und Knoblauch im Wert von 1600 Talenten Silber verzehrt hätten. Menschenkräfte standen eben im Altertum in beliebiger Zahl zur Verfügung. Sie kosteten dem Pharao wenig, da er die Massen zu Sklavendiensten zwingen konnte. Merckel berichtet, daß 2000 ägyptische Arbeiter 3 Jahre lang tätig gewesen sind, um einen 5 Millionen Kilogramm schweren Steinblock, der zur Herstellung eines Tempels gebraucht wurde, von der Gewinnungs- zur Gebrauchsstelle zu bewegen.

Eine uns erhaltene Darstellung zeigt, wie das Riesenstandbild des Dhutotep zu seinem Aufstellungsort geschafft wurde (Bild 84). Das Denkmal ruht auf einem hölzernen Schlitten, der auf einer Holzbahn gleitet. Arbeiter ziehen in vier langen Reihen an Seilen. Der Mann, der auf den Knien des Standbilds steht, gibt durch Händeklatschen das Zeichen zum taktmäßigen Arbeiten. Ein anderer, auf den Füßen stehend, gießt Wasser auf die Gleitbahn, um einer Entzündung des Holzes durch die Reibung vorzubeugen.

Die Art und Weise, wie die Ägypter ohne Anwendung verwickelter Maschinen schwere Obelisken aufrichteten, hat

Choisy nach vorhandenen Andeutungen zusammenzustellen versucht (Bild 85). Danach wurde die liegend fertiggestellte Spitzsäule zunächst vom Boden angelüftet. Dies geschah durch eine große Zahl untergeschobener Hebel, deren Kraftarme mit Gewichten belastet waren; diesen gesellten sich dann wohl noch helfende Menschenhände zu. Wenn der Steinblock um ein Stück gehoben war, setzte man ihn auf darunter geschütteten Sand ab, worauf die Drehpunkte der Hebel dadurch emporgehoben wurden, daß man Mauern zu beiden Seiten aufführte. So ging das Heben der immer noch liegenden Säule stufenweis weiter. Eine der Freilagen des Obelisken wurde dazu benutzt, die Unterseite mit einer hölzernen Einrüstung zu versehen.

Wenn eine genügende Höhe erreicht war, wurde unter dem Fuß des Steins eine Mauer mit kurvenförmiger Oberfläche errichtet. Während man die Sandschüttung dann allmählich beseitigte, drehte sich der Obelisk, indem er durch die Mauer geführt wurde, von der wagerechten zur senkrechten Lage. Auf den bereits vorbereiteten Unterbau wurden nun Sandsäcke gelegt, die Holzrüstung durchgesägt und die Säcke langsam entleert. Hierbei sank der Obelisk immer tiefer, bis er auf dem Unterbau aufstand und dort befestigt werden konnte. Es war das eine mühsame, aber in ihrer Wirkung ausgezeichnete und wohldurchdachte Arbeitsweise.

Der gewichtbelastete Hebel findet sich auch in einer Darstellung am Palast zu Ninive, die aus dem siebenten Jahrhundert v. Chr. stammt. Das Bildnis stellt ein Schöpfwerk für Nilwasser dar. Der Eimer hängt an dem einen Hebelarm und kann, wenn er gefüllt ist, leicht emporgehoben werden, da das Gewicht am anderen Arm hierbei mithilft. Vorrichtungen solcher Art (Bild 86), die Schaduf genannt werden, sind noch heute im Nildelta in Gebrauch, wo sie oft stufenweis übereinander angeordnet sind und so beträchtliche Förderhöhen überwinden.

Von den alten Indern wurde die Picota oder Kupila benutzt, gleichfalls ein Hebelwerk, dessen Kraftarm aber durch Menschen belastet wurde (Bild 87). Der kurze Arm hatte die Form einer Treppe, auf die Arbeiter hinaufstiegen, wenn das gefüllte Gefäß gehoben werden sollte. Je weiter sie stiegen, desto größer wurde die Entfernung des Kraftangriffs vom Hebeldrehpunkt, also die Wirkungsfähigkeit des Hebelgewichts.

Aus der Darstellung der Verteidigung einer belagerten Stadt wissen wir, daß den Assyrern bereits die Rolle am Kloben bekannt war. Deutlich ist auf Bild 88 die Rollenführung für den Aufzug erkennbar, mit dem wahrscheinlich Wasser geschöpft wurde.

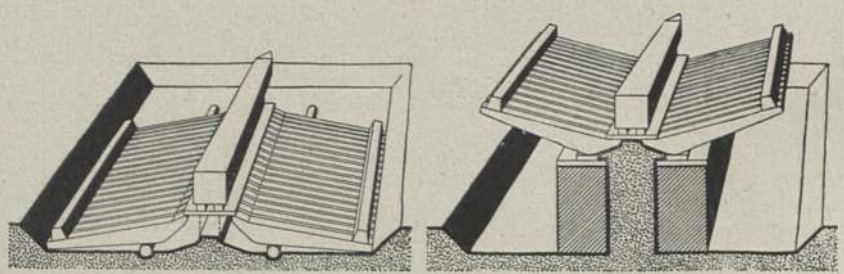
Aristoteles, der von 384 bis 322 v. Chr. lebte, zählt bereits eine erstaunliche Zahl einfacher Maschinen auf, die ihm bekannt waren. So nennt er den Hebel mit Gewichtbelastung für Ziehbrunnen-Betrieb, die Kurbel, Rolle, Flaschenzug und Räder von Erz, die zur Umkehrung der Bewegungen dienten, worunter zweifellos Zahnräder zu verstehen sind. Denn zwei zusammenarbeitende Räder dieser Art laufen stets in entgegengesetzten Richtungen (Bild 72).

Der Tausendkünstler des Altertums, Heron der Ältere, der schon Automaten und selbsttätige Öffner für Tempeltüren zu bauen wußte, schrieb um 120 v. Chr. ein Werk über Hebemaschinen, das den Titel „Barülkon" hatte. Leider ist dieses Werk verlorengegangen. Aber der Alexandriner Pappus, der um 300 n. Chr. lebte, hat es gekannt und uns einen Auszug daraus überliefert.

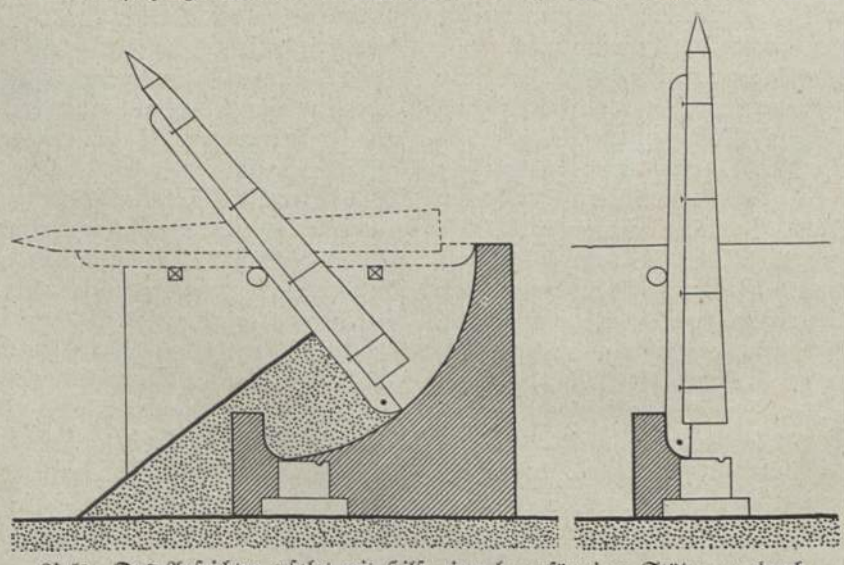
Durch Pappus wissen wir, daß die Griechen zur Zeit des Heron Gestelle mit einem, zwei oder fünf Beinen benutzten, an die Flaschenzüge zum Heben von Lasten befestigt wurden. Es waren Hebezeuge, die ungefähr die Gestalt der heute noch benutzten einfachen Baukrane hatten. Beck gibt in seinem grundlegenden Werk „Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaus" an, wie man sich solche alten Krane vorzustellen habe. Die aus seinem Buch entnommenen Bilder 90 bis 92 zeigen, den Angaben des Pappus folgend, daß die Last entweder durch einfaches Ziehen an Seilen, durch einen Haspel oder durch ein Tretrad emporgehoben wurde.

Die Römer haben die Leistungen der Griechen auf dem Gebiet des Hebezeugbaus gerade so wenig übertroffen, wie es ihnen in der Baukunst möglich wurde, über ihre Lehrmeister hinauszugelangen. Marcus Vitruvius Pollio, der unter Cäsar und Augustus als Baumeister wirkte, schrieb in den Jahren 16 bis 13 v. Chr. ein Handbuch „De architectura", das eine der am reichsten fließenden Quellen für unsere Kenntnisse auch über das Ingenieurwesen der damaligen Zeit ist. Vitruv sagt selbst, daß er den größten Teil seiner Mitteilungen über technische Einrichtungen griechischen Schriftstellern entnommen habe. Wichtig ist unter vielen anderen die Erwähnung eines drehbaren Krans in seinem Buch, dessen Schwenkteil Beck durch die auf Bild 93 wiedergegebene Zeichnung veranschaulicht. Der Drehkranz lief in den vier Auflagern auf Rollen.

Für Vitruv deckt sich der Begriff Maschine



Links: Erstes Anheben des Obelisken. Rechts: Durch allmähliches Aufführen zweier Unterstützungsmauern wird der Obelisk in die erforderliche Höhe gehoben

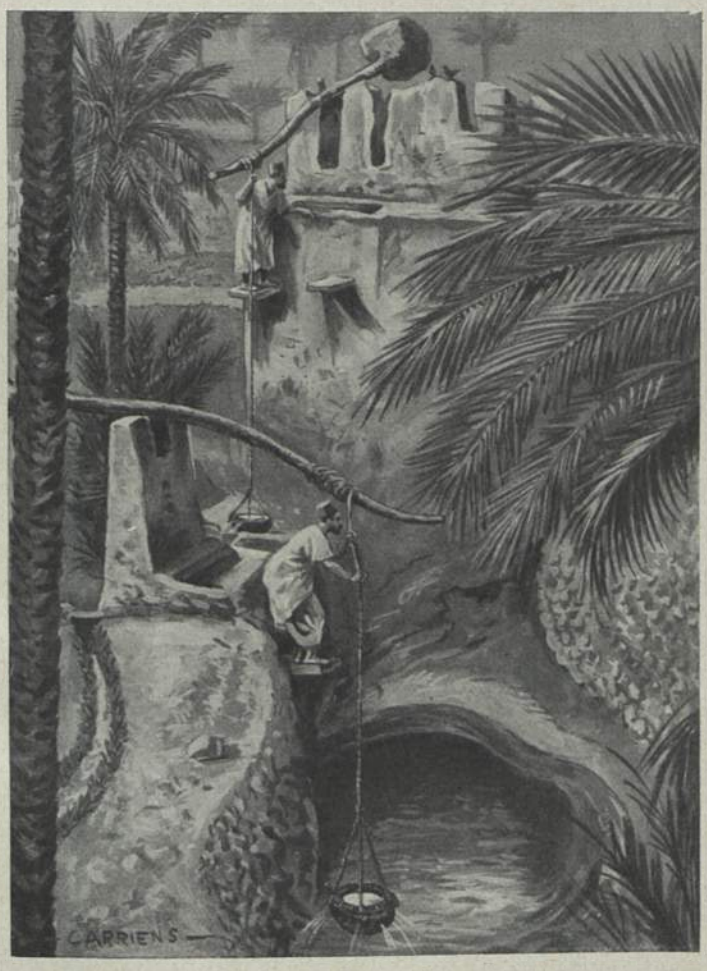


Links: Das Aufrichten erfolgt mit Hilfe einer bogenförmigen Stützmauer durch Abgraben der Sandschüttung. Rechts: Der aufgerichtete Obelisk vor dem Absenken

85. Aufstellung eines Obelisken im alten Ägypten

noch vollständig mit dem Begriff Hebezeug. Er sagt: „Eine Maschine ist eine zusammenhängende Verbindung von Holz, die zur Hebung von Lasten die größten Vorteile gewährt; sie wird auf künstliche Weise in Tätigkeit versetzt, nämlich durch Kreisumdrehung." Aus diesem sehr bemerkenswerten Satz ist zu erkennen, daß, wie schon einleitend gesagt wurde, der Wunsch nach Befreiung vom unmittelbaren Lastenheben zu den frühen und stärksten Antrieben für die Entwicklung einer Technik gehört.

Aus der Zeit vom ersten bis zum fünfzehnten Jahrhundert n. Chr. besitzen wir keine Mitteilung über Vervollkommnungen im Hebezeugbau. Dieser Abschnitt ist überhaupt arm an Fortschritten jeder Art. Der Stillstand ist zurückzuführen auf die schweren gesellschaftlichen Umwälzungen, die sich aus der Abschaffung des Sklaventums, der Zerstörung römischer Kultur durch den Einbruch der Germanen und den kirchlichen Streitigkeiten ergaben. Erst die Zeit der Hussitenkriege um 1430 liefert wieder eine bessere Ausbeute. Wir besitzen Zeichnungen des Italieners Marianus Jacobus, genannt Taccola, eines Erfinders, den seine Zeitgenossen den Archimedes von Siena nannten; wir sind seinem Namen bereits bei der Geschichte der Seilbahn begegnet. In Taccolas Zeit werden Lasten schon mit richtigen Ausleger-Kranen gehoben. Bild 94 zeigt eine feststehende, Bild 95 eine schwenkbare Vorrichtung dieser Art, so wie Beck sie auf Grund von Taccolas Zeichnungen darstellt. Es sind in den Zeichnungen des Italieners neben vielem anderen ferner eine Mühle (Bild 96) mit Sackaufzug angegeben, ein fahrbarer Doppelaufzug (Bild 97), der so eingerichtet ist, daß der eine Eimer emporsteigt, wenn der andere niedergeht, und ein gleichfalls fahrbarer Baukran, dessen Ausleger auch seitliche Bewegungen machen kann (Bild 98).




86. Schaduf
Wasserhebewerk in einem arabischen Dorf

Leonardo da Vinci, der von 1452 bis 1519 lebte, Maler und Bildhauer, Baumeister des Herzogs Ludovico Sforza, Kriegsingenieur Cesare Borgias, eines der größten Genies aller Zeiten, hat eine nahezu unglaubliche Fülle technischer Zeichnungen und Berechnungen hinterlassen. Das gesamte technische Können seiner Zeit ist darin enthalten, und mit vielen seiner Entwürfe gelangt er weit darüber hinaus. In seinen Aufzeichnungen findet man denn auch häufig Hebemaschinen dargestellt, von denen hier nur eine wiedergegeben sei: ein Drehkran mit doppeltem Ausleger (Bild 99). Die Ähnlichkeit der Drehvorrichtung mit der von Vitruv angegebenen ist nicht zu verkennen.

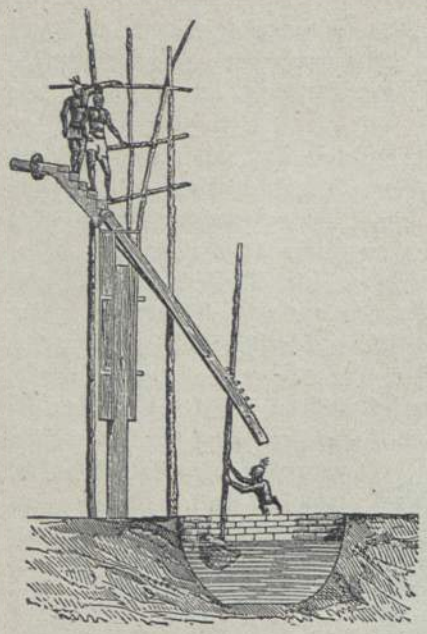
Als großartiger Abschluß der Hebezeugnutzung in früheren Jahrhunderten kann die Leistung gelten, die im Jahre 1586 zu Rom vollbracht wurde. Der Vorgang zeigt, wie auch mit bescheidenen Werkzeugen Ausgezeichnetes geleistet werden kann, wenn nur ein Geist zur Stelle ist, der tausend Hände wohl zu leiten vermag.

Die römischen Kaiser haben eine Anzahl der uralten ägyptischen Obelisken nach Rom bringen lassen. Die größte dieser in der Hauptstadt am Tiber aufgerichteten Spitzsäulen war auf Befehl Caligulas im Jahre 40 n. Chr. aus Heliopolis hinübergeschafft worden; dieser Obelisk ist 23 Meter hoch und hat ein Gewicht von 330 000 Kilogramm. Ihm war zu Ehren Julius Cäsars der Name Julia gegeben worden. Das Mißgeschick wollte es nun, daß dieser kostbare und schöne Riesenstein, der sich einst an vielbesuchtem Platz, im Zirkus des Nero, erhob, durch die Errichtung der Peterskirche einen arg versteckten Standort erhalten hatte. Manch einer der kunstliebenden Päpste hegte den Plan, den Obelisken auf den großartigen Platz vor dem Haupttor von St. Peter schaffen zu lassen. Die Mittel jedoch, mit denen die Römer einst die Säule aufgerichtet hatten, waren vergessen worden; niemand getraute sich, die Arbeit zu übernehmen.

Sixtus V. aber wollte nicht ruhen, bis dieses Werk vollbracht wäre. Er berief Gelehrte, Mathematiker und Architekten aus allen Ländern zusammen, damit sie Vorschläge für die Versetzung der Julia machten. Am 18. September 1585 waren fünfhundert Personen zu diesem Zweck in Rom erschienen. Es wurden die verschiedenartigsten und seltsamsten Vorschläge gemacht. Den Auftrag aber erhielt der Architekt Domenico Fontana. Er hat die Arbeit mit großer Umsicht durchgeführt und die Riesen-Veranstaltung so trefflich geleitet, daß alles plangemäß verlief.

Fontanas Grundgedanke war, den Obelisken innerhalb eines gewaltigen Gerüstes aus Holzbalken mit Hilfe von vierzig Göpeln, das sind Winden mit senkrechter Drehachse, auf eine fahrbare Schleife niederzulegen, den Stein so zum neuen Standort zu fahren und dort mit Hilfe desselben Gerüstes und derselben Göpel wieder aufzurichten. Der römische Architekt hat die Vorgänge selbst geschildert, und es sei ein Auszug aus seinem Bericht, nach der Übersetzung von Beck, hier wiedergegeben. Das außergewöhnliche Geschehnis rechtfertigt wohl den umfangreicheren Platz, welcher der Darstellung Fontanas hier gewährt wird.

„Als meine Erfindung an die Öffentlichkeit kam, zeigte sich, daß fast alle Sachverständigen bezweifelten, daß man so viele Göpel derart in Übereinstimmung bringen könnte, daß sie mit vereinter Kraft wirkten, um ein so großes Gewicht



87. Picota oder Kupila

Schöpfvorrichtung der alten Inder. Aus Curt Merckel „Die Ingenieurkunst im Altertum". Verlag Julius Springer, Berlin

zu heben. Sie sagten, die Göpel könnten nicht gleichmäßig anziehen, der am stärksten angezogene Göpel müsse zerbrechen und dadurch Verwirrung entstehen, die die ganze Maschinerie in Unordnung bringen würde. Ich aber, obgleich ich noch nie so viele Kräfte hatte zusammenwirken lassen, noch etwas dergleichen gesehen hatte, noch durch irgendeine Vergleichung darüber klar werden konnte, fühlte mich doch sicher, daß ich es tun könnte, weil ich wußte, daß vier Pferde, die an einem jener Seile ziehen, wie ich sie angeordnet hatte, wenn sie sich auch noch so sehr anstrengten, doch niemals imstande sein würden, es zu zerreißen, sondern wenn irgendein Göpel zu viel von der Last zu tragen bekommen würde, könnte er sich nicht mehr drehen, aber ebensowenig, wie gesagt, das Seil zerreißen; die anderen, zurückgebliebenen Göpel würden inzwischen nachgedreht werden, bis jeder wieder seinen richtigen Teil von der Last auf sich genommen habe. Dann würde jener erste, der zu sehr belastet war, auch wieder anfangen können, sich zu drehen, und alle Kräfte sich vereinigen.

„Außerdem hatte ich angeordnet, daß nach je drei oder vier Umdrehungen der Göpel angehalten werden sollte, und daß die Leute, wenn sie die Seile dann berührten und eines zu stark gespannt fänden, es nachließen. (Die Seile wurden nämlich nicht an den Göpelwellen befestigt, sondern nur mehrmals darum geschlungen und ihr freies Ende von einem Arbeiter angezogen. Es waren also gewissermaßen Friktionswinden, und eine übermäßige Spannung des Seils konnte der Arbeiter, der das freie Ende desselben anzog, leicht korrigieren.) Alle diese Anordnungen waren mir nicht neu, und ich vermied mit ihnen alle Gefahren und war sicher, daß kein Seil brechen werde.

„Um das Gerüst herzustellen, richtete man acht hölzerne Säulen oder Pfosten auf, vier auf der einen und vier auf der gegenüberliegenden Seite des Obelisken, je 1,08 Meter voneinander entfernt. Jede Säule bestand im Querschnitt aus 4 Balken von je 49 Zentimetern Dicke, so daß jede Säule nahezu 1 Meter dick war. Die Balken waren so miteinander verbunden, daß die Stoßfugen nicht zusammentrafen. Sie waren an vielen Stellen durch eiserne Bolzen mit Schließen verbunden, so daß man sie leicht wieder auseinandernehmen konnte.

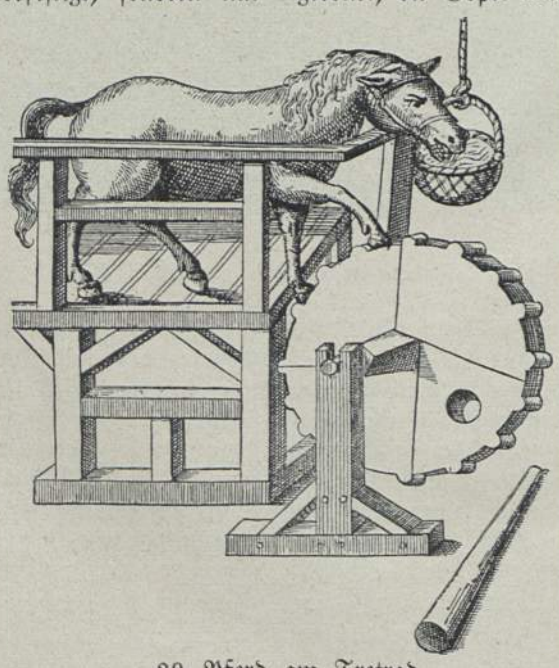
„Dieses Gerüst war so fest, daß man das größte Gebäude darauf hätte stellen können. An seinem oberen Ende wurde es aber noch durch vier Spannseile (die schräg nach der Erde herabliefen, wo sie verankert wurden, und die durch Flaschenzüge gespannt wurden) gehalten. Auf die Träger (oben auf den Säulen) wurden 5 starke Balken gelegt, jeder 6,51 Meter lang und nach jeder Richtung mehr als 65 Zentimeter dick, an welchen zwischen den Trägern 40 Flaschenzüge aufgehängt wurden, die man durch die 40 Göpel bewegte.

88. Die Rolle am Kloben

wurde schon von den alten Assyrern zum Wasserschöpfen benutzt. Aus Curt Merckel „Die Ingenieurkunst im Altertum". Verlag Julius Springer, Berlin

„Den Obelisken bedeckte man zunächst mit doppelten Binsenmatten, damit er nicht verletzt würde. Darüber wurden Bohlen von 54 Millimetern Dicke gelegt. Über diese legte man auf jeder Seite des Obelisken drei eiserne Längsstäbe (linkes Bild, Tafel III) von 108 Millimetern Breite und 54 Millimetern Dicke, deren untere, umgebogene Enden unter den Obelisken faßten, da er auf bronzenen Knäufen stand. Diese Eisenstäbe reichten bis zum oberen Drittel der Höhe an dem Obelisken hinauf, indem sie aus mehreren scharnierartig verbundenen Stücken zusammengesetzt waren. Sie wurden von 9 auf ihre Länge ungefähr gleichmäßig verteilten Bändern aus demselben Eisen umschlossen.

„Während man den Obelisken armierte, wurde der Platz geebnet, die Göpel wurden aufgestellt, die Flaschenzüge aufgehängt und mit den Göpeln verbunden. Und damit diejenigen, welche mit der Überwachung des Gerüstes beauftragt waren, sofort erkennen könnten, welcher Göpel zurückgeblieben oder vorausgeeilt war, ließ ich alle Göpel mit Nummern zeichnen und ebenso die zugehörigen Leitrollen und Flaschenzüge, so daß man jedesmal, wenn es nötig war, von der Spitze des Gerüstes aus einen Wink geben konnte, welcher Göpel nachgelassen oder mehr angezogen werden müsse, und daß die Aufseher der Göpel ohne die geringste Verwirrung in jedem Moment diesen Befehlen entsprechen konnten. Wegen der Enge des Platzes aber war es notwendig, drei Göpel in der Sakristei aufzustellen und die Seile an vielen Stellen durch Leitrollen in gebrochenen Linien zu führen, wie man es auf dem Bild in der Mitte der Tafel III sieht.

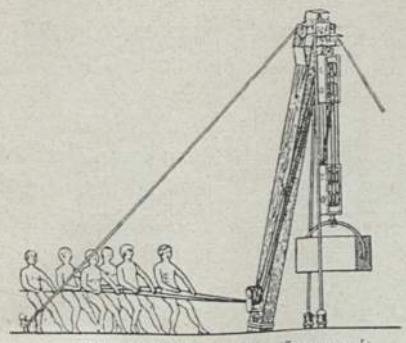


89. Pferd am Tretrad

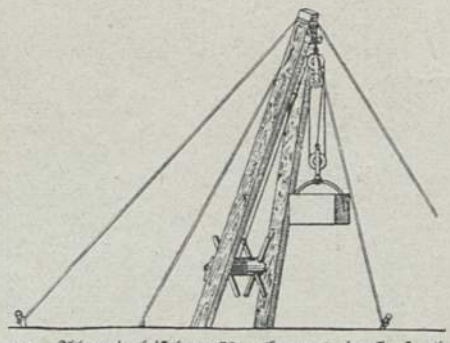
Aus Jacob Leupold „Theatrum machinarum generale" Leipzig 1724

Alter Hafen-Drehkran mit Tretradantrieb

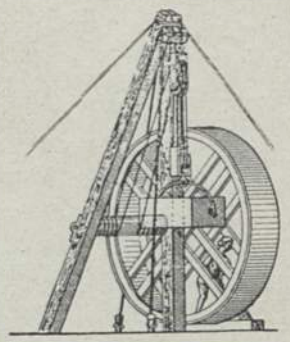
Nach dem Flämischen Festkalender (erstes Drittel des 16. Jahrhunderts) in der Staatsbibliothek zu München



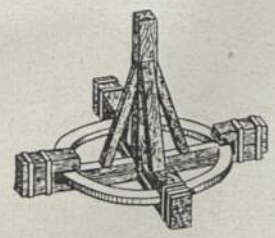
90. Altgriechischer Baukran mit einfachem Seilzug



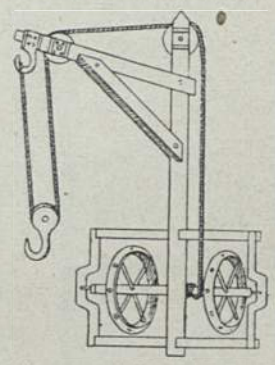
91. Altgriechischer Baukran mit Haspel



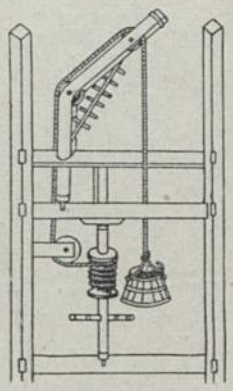
92. Altgriechischer Baukran mit Tretrad



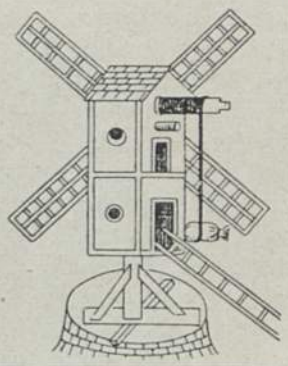
93. Drehbarer Kran nach Vitruvius



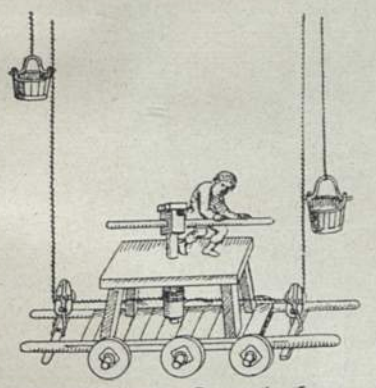
94. Feststehender Kran nach Taccola



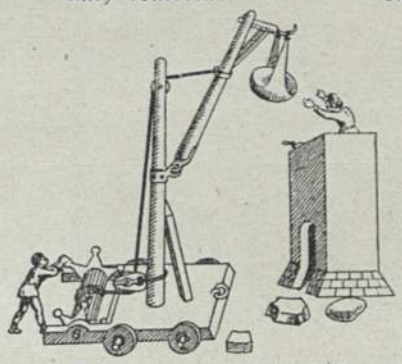
95. Schwenkbarer Kran nach Taccola



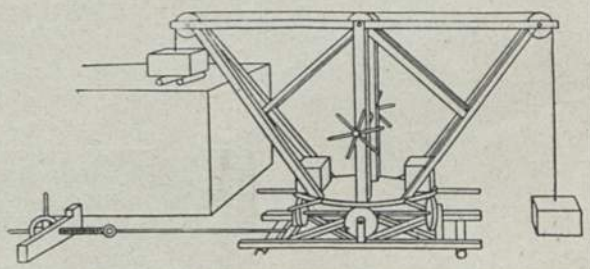
96. Mühlenwinde nach Taccola



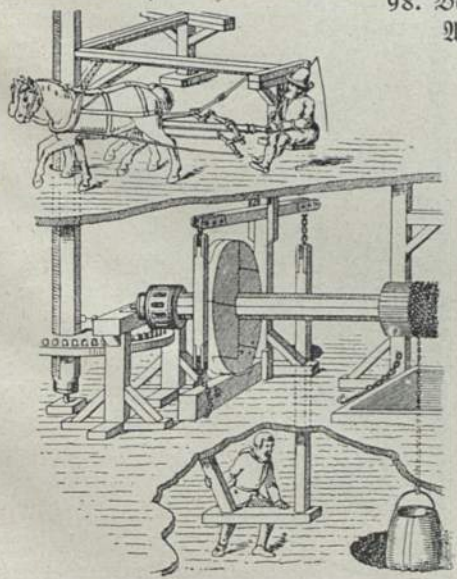
97. Fahrbarer Doppelaufzug nach Taccola



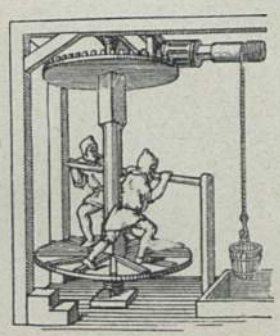
98. Baukran mit schwenkbarem Ausleger nach Taccola



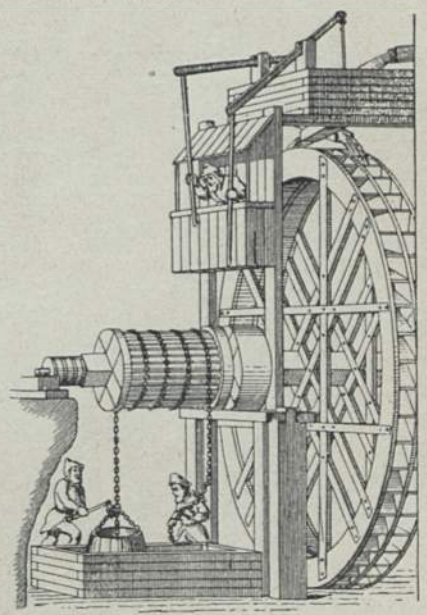
99. Drehkran mit doppeltem Ausleger nach Leonardo



100. Göpelaufzug mit Bremsrad nach Agricola

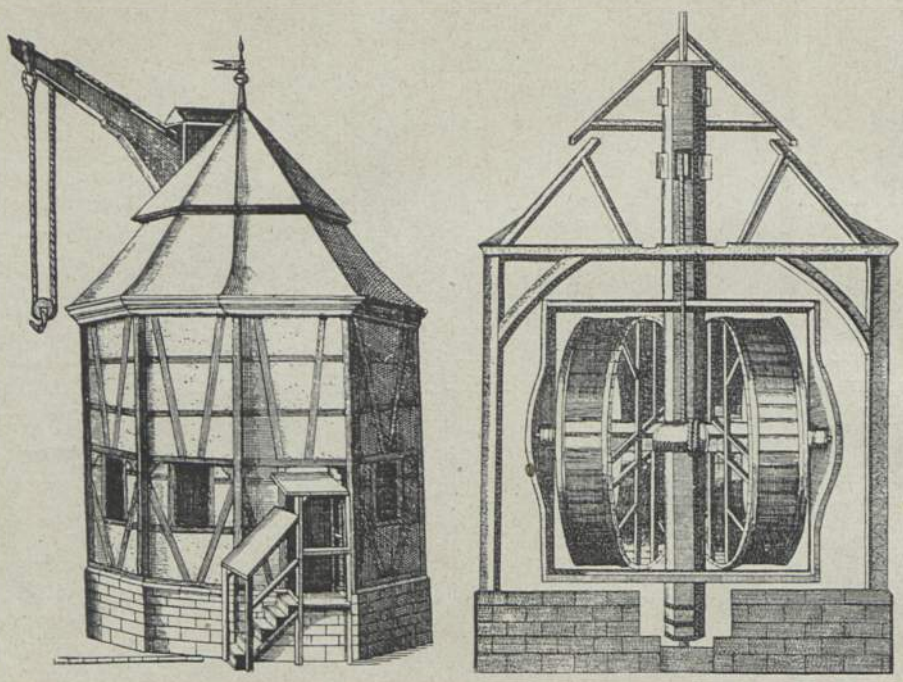


101. Aufzug mit Tretrad nach Agricola



102. Fördermaschine mit Wasserkehrrad

Aus Th. Beck „Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaus". Verlag Julius Springer, Berlin



103. Alter Drehkran mit Tretrad-Antrieb
Links: Äußere Ansicht. Rechts: Innere Einrichtung
Aus Jacob Leupold „Theatrum machinarum generale". Leipzig 1724

„Da unendlich viel Volk zusammenlief, um ein so merkwürdiges Unternehmen anzusehen, wurden, um Unordnung zu vermeiden, die Straßen abgesperrt, die über den Platz führten, und eine Bekanntmachung erlassen, daß an dem zur Hebung des Obelisken bestimmten Tag außer den Arbeitern niemand in die Schranken eintreten dürfe. Wer mit Gewalt eindränge, würde mit dem Tode bestraft. Ferner dürfe keiner bei schwerer Strafe die Arbeiter hindern, keiner dürfe sprechen, disputieren oder irgendeinen Lärm machen, bei schwerer Strafe, damit die prompte Ausführung der Befehle der Bediensteten nicht gehindert werde. Zur sofortigen Vollstreckung dieser Verordnung wurde der Hauptmann der Häscher mit seinem Korps innerhalb der Umschließung aufgestellt, so daß, teils wegen der Neuheit der Arbeit, teils wegen der angedrohten Strafen, in der Volksmenge, welche zusammenlief, die größte Stille herrschte.

„Am 30. April, zwei Stunden vor Tagesanbruch, wurden zwei Messen in der Heiligengeistkirche gelesen, damit Gott, zu dessen und des heiligen Kreuzes Ehre dieses merkwürdige Unternehmen ausgeführt werden sollte, ihm seine Gunst schenken und es gelingen lassen möge. Und damit Er die Bitten aller erhöre, gingen sämtliche Arbeiter, Aufseher und Fuhrleute, die bei dem großen Werk zu tun hatten und nach meiner Anordnung tags zuvor gebeichtet hatten, zur Kommunion. Auch hatte unser Herr (der Papst) mir den Tag vorher seinen Segen gegeben und mir anempfohlen, was ich zu tun habe. Nachdem alle kommuniziert hatten und angemessene Reden gehalten worden waren, trat er aus der Kirche in die Umzäunung, und alle Arbeiter wurden an ihre Plätze beordert.

„Jeder Göpel erhielt zwei Aufseher, deren Anweisung besagte, daß jedesmal, wenn das Signal eines Trompeters gehört würde, den ich auf einem erhöhten Platz aufstellte, so daß er allen sichtbar war, die Göpel in Gang zu setzen seien und er ein scharfes Auge darauf haben müsse, daß richtig gearbeitet werde; wenn aber der Ton einer Glocke erklinge, die oben an dem Gerüst aufgehangen war, müsse er sofort haltmachen lassen. Innerhalb einer Umzäunung am Ende des Platzes stand der Chef der Fuhrleute mit 20 starken Reservepferden und 20 Mann zu ihrer Bedienung. Außerdem hatte ich noch acht bis zehn tüchtige Männer auf dem Platz verteilt, die herumgingen und überall nachsahen, daß während der Arbeit keinerlei Unordnung vorkäme.

„Ferner hatte ich eine Abteilung von 12 Mann angewiesen, die nötigen Reserveseile, Flaschenzüge, Rollen usw. nach Bedarf hin und her zu tragen. Diese waren vor dem Vorratshause auf einem erhöhten Platz aufgestellt, wo sie auf jeden Wink oder Befehl das auszuführen hatten, was ihnen aufgetragen wurde, so daß kein Göpelaufseher seinen Platz zu verlassen brauchte. An jeden Göpel aber hatte ich sowohl Menschen als Pferde gestellt, um ihn zu bewegen, damit die ersten ihn mit mehr Vernunft nach den Befehlen der Aufseher regierten, da Pferde allein manchmal stehenbleiben oder sich zu rasch bewegen.

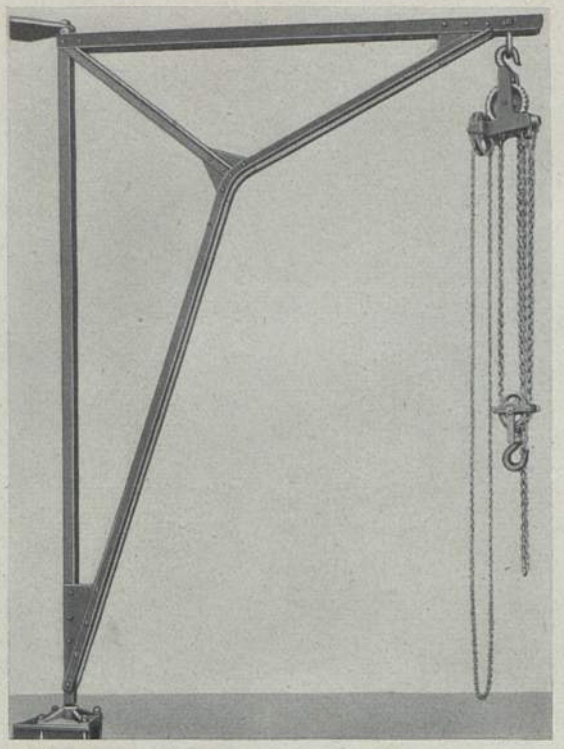
104. Zwei Treträder aus dem Krantor zu Danzig
Phot. Gottheil & Sohn, Danzig

„Unter dem Gerüst waren 12 Zimmerleute aufgestellt, welche fortwährend hölzerne und eiserne Keile unter den Obelisken zu schlagen hatten, einesteils, um damit heben zu helfen, anderenteils, um ihn fortwährend zu unterstützen, so daß er niemals frei hing. Diese Zimmerleute trugen eiserne Helme auf den Köpfen, um sie zu schützen, wenn ein Gegenstand von

105. Krantor zu Danzig. Erbaut 1411 bis 1442
Phot. Gottheil & Sohn, Danzig

dem Gerüst herabfiel. Zur Beobachtung des Gerüsts, der Flaschenzüge und Verschnürungen daran bestimmte ich 30 Mann. An die drei Hebel gegen Westen (nach der Sakristei hin) stellte ich 35 Mann zur Bedienung und an die gegenüberliegenden zwei Hebel 18 Mann mit einem kleinen Handgöpel.

„Nachdem von allen ein Paternoster und ein Ave Maria gesprochen war, gab ich dem Trompeter das Zeichen, und sobald sein Signal ertönte, begannen die 5 Hebel und 40 Göpel mit 907 Menschen und 75 Pferden zu arbeiten. Bei der ersten Bewegung schien es, als ob die Erde zittere, und das Gerüst krachte laut, indem sich alle Hölzer durch das Gewicht zusammendrückten, und der Obelisk, welcher um 44 Zentimeter gegen den Chor von St. Peter hin geneigt gewesen war, stellte sich senkrecht.



106. Wandschwenkkran
Bauart AEG, Berlin

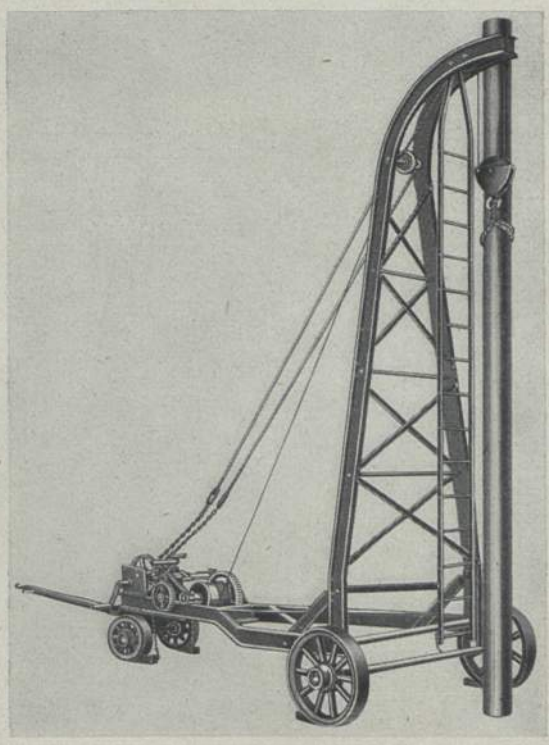
„Als man sah, daß das Gerüst, trotz dem Krachen, in keinem Teile nachgab und niemandem etwas zugestoßen war, faßte jeder Mut, und nachdem die Glocke das Zeichen zum Anhalten gegeben hatte, fand sich, daß die oberste der eisernen Bandagen, die die Längsstäbe am Obelisken zusammenhielten (und an der mehrere Flaschenzüge angriffen), zerbrochen war. Man half dem dadurch ab, daß man 4 Flaschenzüge auf jeder Seite an einer Seilumschlingung befestigte, deren Enden mehrmals unter dem Obelisken durch und auf der anderen Seite wieder zu der Umschlingung hinauf geführt wurden.

„Alsdann fuhr man fort und hob den Obelisken in 12 Bewegungen (Hitzen) um 60 Zentimeter, was genügte, um die Schleife darunterzuschieben und die metallenen Knäufe, worauf der Obelisk gestanden hatte, wegzunehmen. In dieser Höhe wurde daher angehalten, und es wurden die vier Ecken des Obelisken mit sehr starken Unterlaghölzern, hölzernen und eisernen Keilen unterschlagen. Und als dies um 22 Uhr (die Uhren in Italien hatten schon damals Zifferblätter für 24 Stunden) desselben Tags geschehen war, wurde mit einigen Mörsern auf dem Gerüst das Signal gegeben, und die ganze Artillerie gab mit lautem Donner das Zeichen der Freude. Und man brachte dem Befehl gemäß das Mittagessen in Körben zu jedem Göpel, damit keiner seinen Posten verlasse.

„Der Obelisk war nun umzulegen, was wegen der Größe der Bewegung und der Länge des Steins eine schwierigere Arbeit war als die erste. Zu diesem Zweck ordnete man die Flaschenzüge und Seile anders an, so daß die Westseite, womit sich der Obelisk auf die Schleife legen sollte, frei blieb. Auch wurden die Göpel anders angeordnet, weil sie nun auf andere Weise wirkten. Und weil ich voraussah, daß es manchmal nötig werden würde, anzuhalten, während der Obelisk schräg stand, um Flaschenzüge, Umschnürungen und andere Dinge nach Bedarf zu ordnen, ließ ich, damit der Obelisk niemals an den Seilen hängend ruhe, sondern unterstützt sei, vier Balken von je 13 Metern Länge herrichten, die an den Enden mit starken Scharnierköpfen versehen waren, welche sich zu beiden Seiten dicht an dem Obelisken um eine 108 Millimeter dicke Eisenstange drehten, welche die untere Seite des Obelisken berührte und durch eine eiserne Umgürtung an ihm befestigt war.

„Um 22 Uhr (nach mehreren Tagen) lag er wohlbehalten, und ohne daß irgend jemand verletzt worden wäre, auf der Schleife, welche unter ihn gezogen worden war. Dies erfuhr unser Herr mit größter Befriedigung, und das ganze Volk empfand eine solche Freude darüber, daß der Architekt mit Trommel- und Trompetenschall nach Hause geleitet wurde.

„Da man den Obelisken von dieser Stelle bis zu seinem neuen Standort auf eine Entfernung von 300 Ellen transportieren mußte und man durch Nivellement fand, daß der neue Standort um 8,68 Meter tiefer lag als der Platz, wo er seither gestanden (also in gleicher Höhe mit der Oberfläche des alten Fundaments), machte man einen ebenen Damm (d. h. einen Damm mit wagerechter Krone) von dem alten bis zu dem neuen Standort, indem man die Erde dazu hinter den Gebäuden von St. Peter aus dem Monte Vaticano entnahm.



107. Fahrbarer Handkran
Bauart AEG, Berlin

„Nachdem das Gerüst (an dem neuen Aufstellungsort) vollendet war, zog man den Obelisken so weit vorwärts, daß seine Spitze auf der anderen Seite des Gerüstes herauskam, armierte ihn an zwei oder drei Stellen und befestigte die Flaschenzüge an den drei freien Seiten. Dann verteilte man die Göpel auf dem Platze.

„Am 10. September 1586, da alles an seiner Stelle stand, vor Tagesanbruch, wurden in der Kirche im Palast des Priorats zwei Messen gelesen, und jeder, der zu arbeiten hatte, ging zur Kommunion, wie bei

der Niederlegung geschehen war, und bat Gott um guten Erfolg. Man stellte jeden an seinen Platz. Bei Tagesanbruch war alles in Ordnung, und man begann mit 40 Göpeln, 140 Pferden und 800 Mann zu arbeiten, mit denselben Trompeten- und Glockensignalen zum Arbeiten und Stillehalten wie zuvor. Während die Spitze des Obelisken sich hob, wurde sein Fuß durch vier Göpel, die auf der gegenüberliegenden Seite standen, angezogen, so daß die Seile, die die Spitze aufzogen, immer senkrecht blieben.

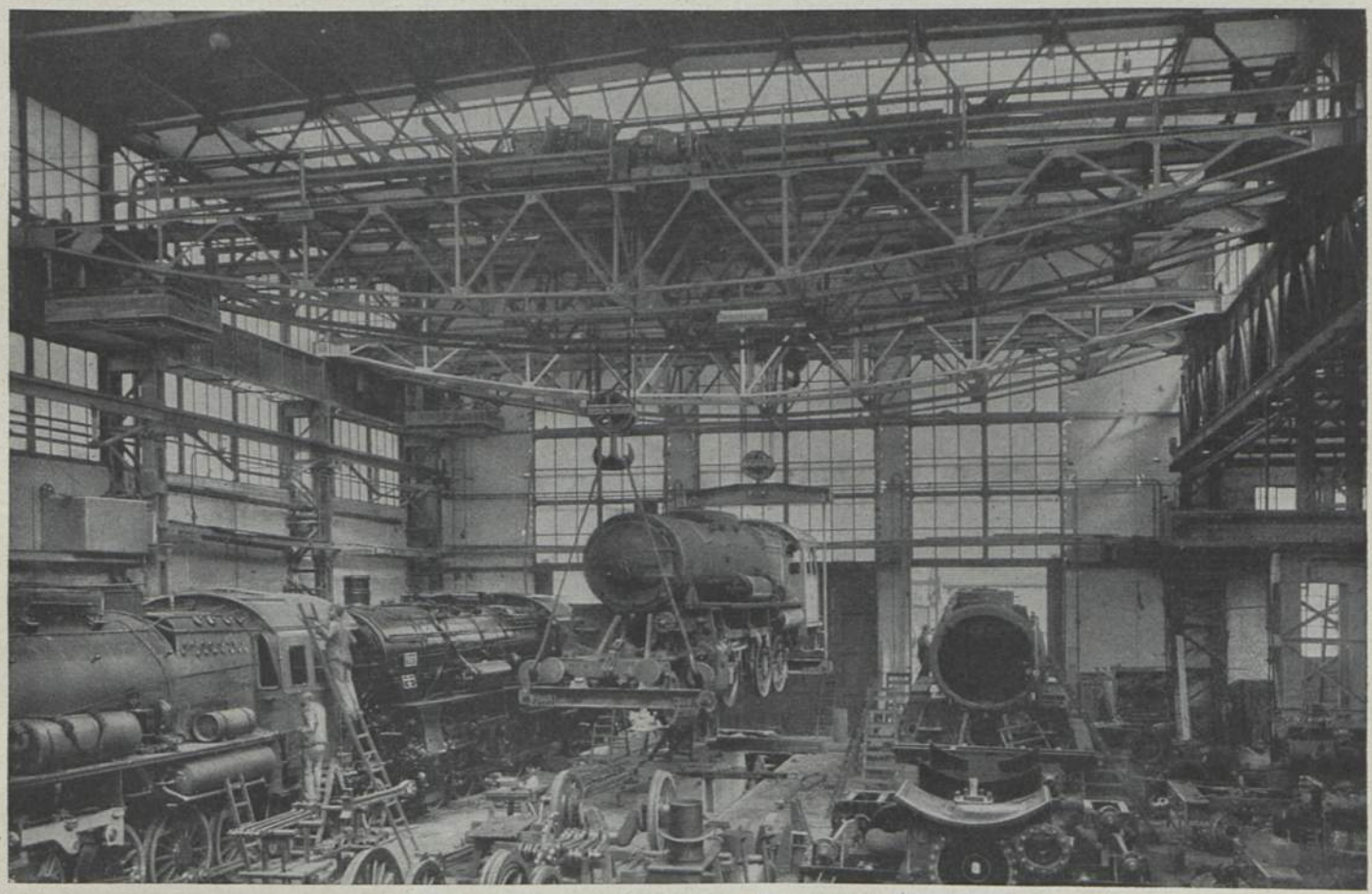
„Die zu hebende Last verminderte sich immer mehr, je mehr die Spitze sich hob und der Fuß daruntergezogen wurde. Als der Obelisk halb aufgerichtet war, hielt man inne und unterstützte ihn, um die Arbeiter zu Mittag essen zu lassen. Nach dem Essen begab sich jeder wieder mit großem Eifer an die Arbeit. In 52 Bewegungen (Hitzen) wurde der Obelisk aufgerichtet, und es war ein sehr schönes Schauspiel in vielen Beziehungen. Unzählig viel Volk war zusammengelaufen, und viele blieben, um ihren Platz zum Sehen nicht zu verlieren, ohne Mittagessen bis zum Abend stehen. Andere machten Tribünen für die Leute, die zusammenströmten, und gewannen viel Geld.

„Bei Sonnenuntergang stand der Obelisk aufrecht, aber die Schleife, welche, während er sich hob, daruntergezogen worden war, war noch darunter. Sofort gab man mit den Böllern auf dem Gerüste das Signal hiervon, was durch viele Geschütze beantwortet wurde, und die ganze Stadt war in großer Freude. Bei dem Haus des Architekten liefen wieder alle Trommler und Trompeter von Rom zusammen und ließen ihren Applaus erschallen.

„Als von dem Gerüst die Freude verkündet wurde, befand sich Se. Heiligkeit in einer Sitzung, da er sich von Monte Cavallo nach St. Pietro begeben hatte, um den Gesandten von Frankreich in öffentlichem Konsistorium zu empfangen. Hier wurde Sr. Heiligkeit die Nachricht überbracht, daß die Julia aufgerichtet sei, was ihn mit großer Freude erfüllte."

*

Alle im Altertum, im Mittelalter und auch noch in den nächstfolgenden Jahrhunderten gebrauchten Hebezeuge befreiten, wie wir beobachtet haben, den Menschen noch nicht ganz von der Bürde des Lastenhebens. Sie gestatteten nur



108. Elektrischer Decken-Laufkran in einer Maschinenbauanstalt
Ausgeführt von der Maschinenfabrik Eßlingen

ein bequemeres Aufhissen durch Benutzung von Rädern und Kurbeln und verringerten die Gewichte infolge der zwischengeschalteten Rollenübersetzungen. Immer aber war es noch die Menschenkraft selbst, die letzten Endes das Emporheben vollführen mußte. Erst um die Zeit, da Fontana wirkte, also im sechzehnten Jahrhundert, begann man, den Pferdegöpel zu gebrauchen, und nur wenig später wurde schon eine unbelebte Naturkraft, nämlich das fallende Wasser, zum Antrieb von Hebemaschinen benutzt.

Den Anlaß hierzu gab insbesondere der in Deutschland weit vorgeschrittene Bergbau. Um die Eisenerzlager genügend ausbeuten zu können, hatte man hier allmählich in beträchtliche Tiefen, bis zu 200 Metern, hinabsteigen müssen. Dadurch war man gezwungen, vom Tagebau, bei dem die Grube offen dalag und an vielen Orten zugänglich war, zum

109. Elektrischer Kraftwagen-Kran
Bauart AEG, Berlin

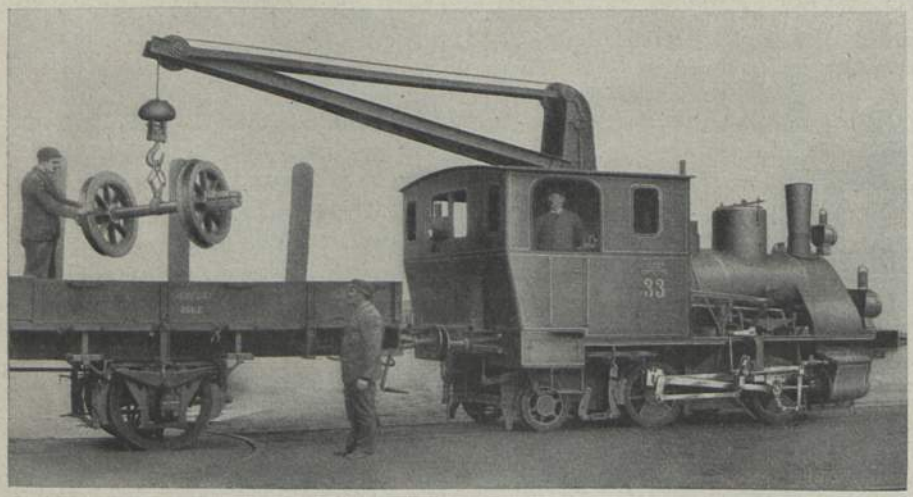
Schachtbetrieb überzugehen. Alles, was in das Bergwerk hinein- und aus diesem herausgeschafft werden mußte, hatte die eine enge Schachtöffnung zu durchfahren, so daß sich der Wunsch nach möglichst schneller Förderung den schärferen Ansprüchen des Tiefbaus hinzugesellte.

Georg Bauer, geboren 1490 zu Glauchau, der sich als Schriftsteller, der damaligen Zeitsitte folgend, Georgius Agricola nannte, hat ein Werk hinterlassen, das vortrefflichen Aufschluß über die damaligen Formen des Bergwerkbetriebs gibt. Wir kennen diesen Bauer-Agricola bereits aus der Geschichte der Eisenbahn, denn er ist es, der die erste Nachricht über die Benutzung von Gleisen gibt (Band II, Seite 188). Sein Werk „Bermannus sive de re metallica“ (Bermannus oder über die Metallkunde), erschienen 1528, zeigt in mancherlei bildlichen und textlichen Darstellungen auch, wie die Erze und das in die Tiefbauten dringende Wasser emporgefördert wurden. Auf Bild 101 sehen wir noch die Menschenkraft am Werk. Die Arbeiter bewegen mit ihren Füßen ein wagerechtes Tretrad. Beachtenswert ist die Form des Getriebes, durch das die Kraft um 90 Grad umgelenkt wird. Mit Hilfe solcher eingepflockten Zähne, die in Vertiefungen eingriffen, führte man lange Zeit Winkel-Übersetzungen aus, die wir heute durch Kegelräder bewirken.

Die Hebevorrichtung auf Bild 100, die zum Hinaufschaffen des Wassers in ledernen Eimern diente, ist bereits eine recht umfängliche Maschine. Der Antrieb erfolgt zu ebener Erde durch einen Pferdegöpel, auf dem der Lenker mitfährt. In dem Stockwerk darunter sind die Winkelübersetzung, die Kettenwelle und ein Bremsrad untergebracht. Wenn der Arbeiter im zweiten Tiefstockwerk sieht, daß der Eimer genügend hoch emporgehoben worden ist, setzt er sich auf das wagerechte Holzscheit, wodurch er die Bremsvorrichtung an die Scheibe drückt. Die schwere Maschine wird hierdurch geschwind stillgesetzt.

Als kleine spaßhafte Zwischenschaltung sei Bild 89 hier eingefügt. Es zeigt, in welcher Form die Pferdekraft damals auch zur Betätigung von Treträdern verwendet wurde. Man sieht eine Art Zirkuskunststück: das Pferdchen trabt mit den Vorderfüßen auf dem sich drehenden Rad. Damit das Tier nicht von seinem Arbeitsplatz zurücktritt, ist an geeigneter Stelle ein Futterkorb aufgehängt. Die Einrichtung diente zum Betrieb von Blasbälgen für eine Schmiede.

In geistvoller Weise wird die Wasserkraft mit Hilfe des auf Bild 102 dargestellten Kehrrads ausgenutzt. Die Förderkette, an deren beiden Enden Wassereimer hängen, ist so um die Welle geschlungen, daß der eine Eimer steigt, während der andere hinuntergeht. Das vom Gebirge kommende Wasser strömt in einen Hochbehälter, aus dem man es durch Aufziehen von Klappen weiter hinabfließen lassen kann. Ein Arbeiter steht, gleich dem neuzeitlichen Kranführer, auf erhöhtem Gerüst und bedient die Steuervorrichtung. Zieht er das Schütz zu seiner Rechten auf, dann strömt das Wasser auf die Schaufeln der vorderen Radhälfte und dreht das Rad entgegengesetzt der Uhrzeigerrichtung. Beim Aufziehen der andern Klappe kehrt sich die Drehrichtung um. Auf diese Weise kann der Aufzug hin und her spielen.



110. Lokomotiv-Kran
Bauart A. Borsig, Berlin

Jedes dieser Bergwerk-Hebezeuge übte seine Tätigkeit ein für allemal am gleichen Ort aus. Die Vorrichtungen waren fest aufgestellt, wodurch sie sich grundsätzlich von den in älterer Zeit benutzten Hebezeugen unterschieden, die immer nur vorübergehend zu gelegentlicher Benutzung errichtet wurden.

Mit einer Ausnahme freilich. Denn noch früher als im Bergbau verwendete man fest aufgestellte Krane auf Bollwerken zum Be- und Entladen von Schiffen. Man darf ja nicht vergessen, daß die Schiffe ehemals die einzigen Fahrzeuge waren, denen man schwere Lasten aufbürden konnte. Die Landfuhrwerke, die auf den sehr schlecht ausgebildeten Straßen dahinrollten, konnten nur geringe Nutzgewichte fortschaffen, so daß man zu ihrer Beladung

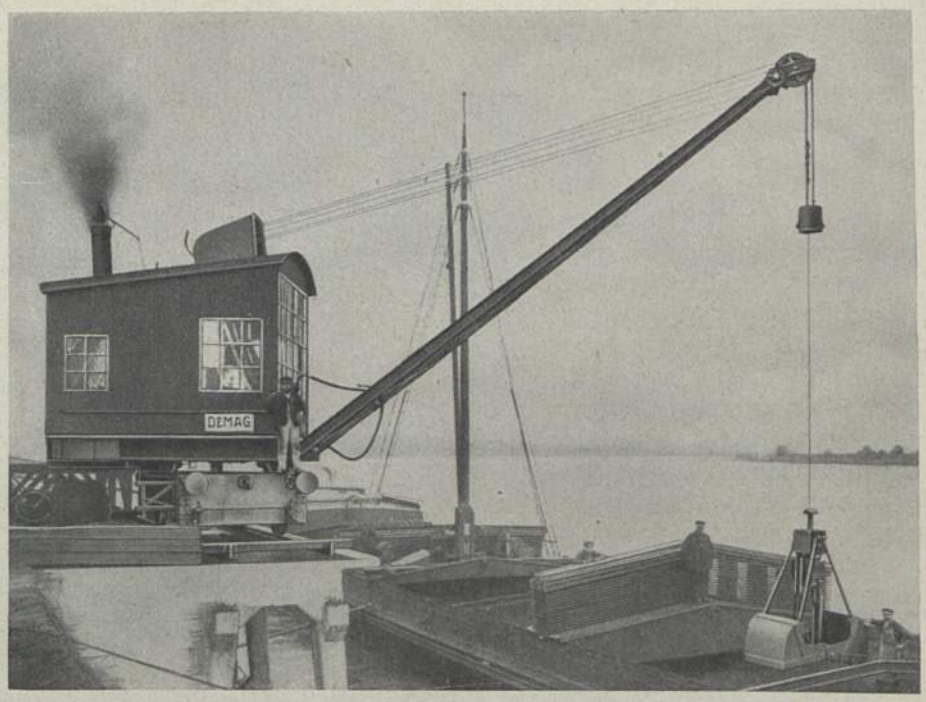
keine mechanischen Hilfswerkzeuge nötig hatte.

Aus dem fünfzehnten Jahrhundert stammt der massige, um eine Mittelsäule drehbare Kran mit Tretradantrieb, den Tafel IV zeigt. Er ist gerade im Begriff, ein Faß auf das am Bollwerk liegende Schiff zu laden. An deutschen Flußufern finden wir heute noch eine größere Zahl solcher schwer gebauten Hebevorrichtungen aus jener Zeit, für deren vortreffliche Anlage es spricht, daß sie auch jetzt noch benutzt werden können.

Der schöne Drehkran im Hafen von Andernach am Rhein, der gleichfalls noch im Betrieb ist, stammt aus dem Jahre 1554. Sein Unterbau steht fest, das Dach allein dreht sich mit dem Ausleger und der Antriebvorrichtung. Wie diese ursprünglich eingerichtet war, ist aus einem Bild in dem berühmten Werk von Leupold „Theatrum Machinarum" zu schließen, das 1724 erschien (Bild 103). Die Darstellung Leupolds bezieht sich auf einen Kran, der etwa ebenso alt wie der Andernacher und diesem sehr ähnlich ist. Das Dach ruht auf einer drehbaren Mittelsäule, an der auch die Treträder angebracht sind. Durch Drehen des Rahmens, in dem die beiden Treträder ruhen, nach rechts oder links wird das Ganze geschwenkt.

In den Jahren 1411 bis 1442 wurde am Ufer der Mottlau das Wahrzeichen Danzigs, das Krantor, errichtet, das heute wie damals Träger einer kräftigen, aber nicht schwenkbaren Winde ist (Bild 105). Es schließt mit seinem mächtigen Bau die Breitgasse vor der Langen Brücke torartig ab. Das Hebezeug, das wohl das älteste aller noch im Betrieb befindlichen ist, diente zum Einsetzen von Schiffsmasten, wozu es auch noch jetzt öfter benutzt wird. Gewaltige eichene Balken tragen und stützen den 26 Meter hohen Ausleger; von ihnen ist noch heute kaum einer vermorscht. Zum Antrieb dienten vier Treträder von 7 Metern Durchmesser und 1,4 Metern Breite, von denen Bild 104 eines zeigt. Sie sind erhalten, aber heute längst stillgesetzt.

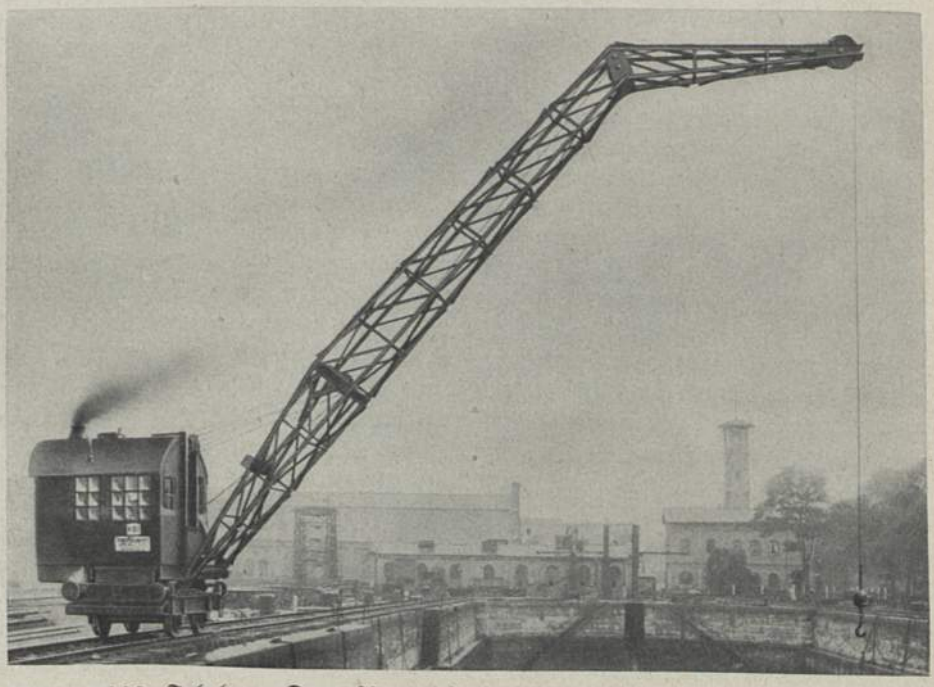
„Die Leistung dieser Tretradkrane", so sagt Kammerer, „war naturgemäß gering, da selbst bei gleichzeitiger Verwendung von sechs Arbeitern in den Treträdern eine Gesamtleistung von nur etwa einer halben Pferdestärke zur Verfügung stand. Immerhin boten die Treträder die Möglichkeit, sechs Mann, in besonderen Fällen sogar acht Mann gleichzeitig angreifen zu lassen. Der Antrieb durch Handkurbeln ist weniger geeignet, eine gleichmäßige Kraftäußerung von mehreren Arbeitern auf die Last zu übertragen. Erst als der ohnehin beschränkte Raum auf dem Rad immer mehr ausgenutzt werden mußte, machte das Tretrad der Kurbel Platz. Nicholson berichtet im Jahre 1826 von der Einführung der Kurbel an Stelle des Tretrads in England."




111. Fahrbarer Dampfkran mit einziehbarem, geradem Ausleger
Bauart Demag, Duisburg

Drei Jahrhunderte lang blieb Holz der Baustoff für Krane. Eisen wurde nur zum Verbinden der Balken benutzt. Dann führt die Entwicklung weiter zum gußeisernen Kran, der auch noch sehr schwerfällige Formen zeigt, aber den heutigen Bauarten doch schon sehr viel näher steht. Die Ausgestaltung der Krane zu Formen, die jeglicher Verwendungsart sich anzupassen vermögen, wurde erst möglich, als man zu ihrer Errichtung das zarte Geflecht stählerner Bänder zu verwenden begann.

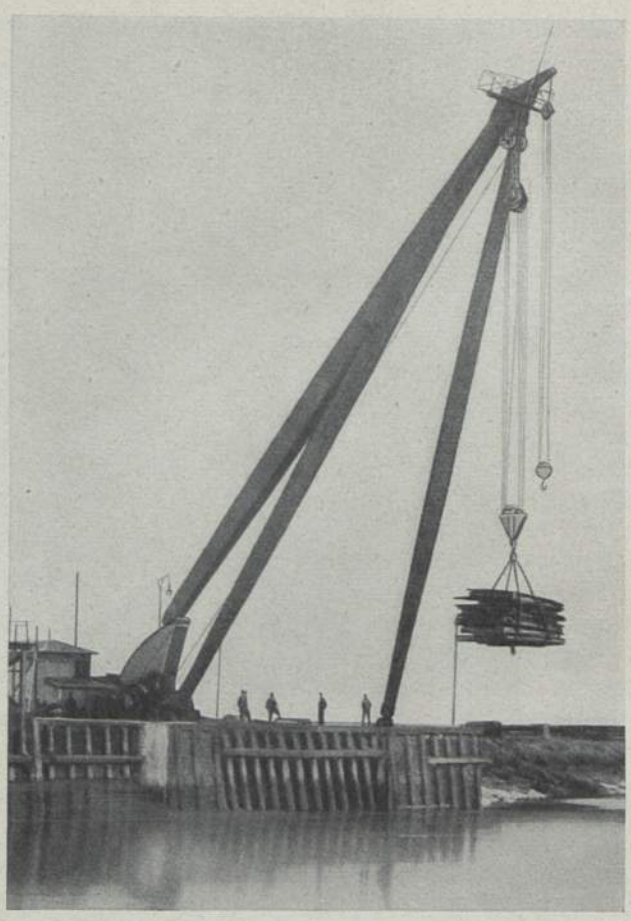
Als die zu hebenden Lasten immer schwerer wurden und die Menschenkraft für das Drehen der Getriebe durchaus nicht mehr zureichte, begann die endgültige Einführung mechanischer Kraftmittel in den Kranbetrieb. Man versuchte



112. Fahrbarer Dampfkran mit einziehbarem, geknicktem Ausleger
Bauart Demag, Duisburg

zunächst Druckwasser- und Druckluft-Antrieb, die jedoch nur vereinzelt wirklichen Erfolg hatten. Auch der Dampf, sonst ein Helfer von trefflicher Nutzbarkeit, brachte nicht die Erfüllung, seit er im Jahre 1820 den Hebezeugen dienstbar gemacht worden ist. Sein Gebiet blieben zunächst die ortfesten Krane; denn es entstanden zu viel Verluste durch Niederschlagen des Kraftmittels in den Rohrleitungen, wenn man fahrbaren Hebezeugen den Dampf von einem ortfesten Kessel zuführte. Erst als es gelungen war, die Dampf-Antriebmaschine mit allem Zubehör durch Anwendung höherer Kesselspannung so eng zusammengedrängt und leicht zu bauen, daß sie auf dem Krangerüst selbst aufgestellt werden konnte, wurden auch bewegliche Dampfkrane möglich. Sie sind noch in unseren Tagen keine seltenen Erscheinungen, aber ihr Anwendungsgebiet ist beschränkt.

Die neuzeitlichen Kranbauten, ebenso ausgezeichnet durch große Hebekraft wie durch Fördergeschwindigkeit und Anpassungsfähigkeit, konnten sich erst entwickeln, als der Elektromotor fähig geworden war, seine Hurtigkeit und seine gedrange Kraft den Hebezeugen zur Verfügung zu stellen. Das ist seit dem Beginn dieses Jahrhunderts der Fall. Wie auf den Schienen der Straßenbahn hat die Elektrizität auch im Hebezeugbau eine vollständige Umwälzung und eine nicht vorauszuahnende Entwicklung hervorgerufen.



113. Großer Scherenkran
mit zwei Lasthaken von 50 000 und 150 000 Kilogramm Tragfähigkeit. Demag, Duisburg

*

Aus der Überfülle der heute verwendeten Kranarten sei eine Reihe kennzeichnender Vertreter herausgegriffen. Wir sehen uns zunächst die Hebezeuge in der Werkstatt an.

Da finden wir den Wandschwenkkran, ein bescheidenes, an Wandstützen drehbar befestigtes Gerät, dessen Lasthaken einen Halbkreis bestreicht (Bild 106). Das Fördergut kann nur an Punkten aufgenommen und abgesetzt werden, die auf diesem Kreisabschnitt liegen. Die Bestreichungslinie wird zu einer halbkreisförmigen Fläche erweitert, wenn man den Schwenkarm mit einem Wagen ausrüstet, der auf seinem Rücken fahren kann. Man nennt eine solche Vorrichtung Laufkatze oder kurz Katze, und wir werden sie, wie hier bei dem kleinen Gießerei-Schwenkkran, auch noch bei dem Riesen-Turmkran antreffen.

Wenn das Bedürfnis besteht, den Kranhaken nach allen Richtungen hin schwenken zu können, dann geht man zu der freistehenden Säulenbauart über. Da der Kopf der Kranstütze nun nicht mehr gehalten wird, so muß die Festigung im Boden sehr kräftig sein.

Jede größere Fabrik ist heute bemüht, ihre Arbeiter vom Heben und Bewegen schwerer Lasten gänzlich zu befreien. Aus diesem Grund werden überall in den Werkstätten Hebezeuge angeordnet, die jeden Punkt im Raum erreichen können. Durch kräftige Bauart schafft man zugleich die Möglichkeit, Umsetzungen auch der schwersten Arbeitsmaschinen mit solchen Kranen leicht vornehmen zu können.

In Fabriken, die sehr gewichtige Gegenstände herstellen, zum Beispiel Laufräder für Dampfturbinen oder Anker für Riesendynamos, ist es heute üblich geworden, nicht mehr den Propheten zum Berg, sondern den Berg zum Propheten kommen zu lassen, das heißt, das Arbeitsstück auf dem Platz, an dem es in rohem Zustand niedergelegt worden ist, völlig fertig zu machen, indem man eine der hierfür notwendigen Maschinen nach der anderen zu ihm schafft und auf einer großen Aufspannplatte befestigt. Da sieht man denn gewaltige Bohrmaschinen oder Fräsbänke durch die Luft ziehen, die früher so fest in den Boden gewurzelt schienen wie Kirchtürme.

Zur Fortbewegung der Lasten in den Werkstätten werden ausschließlich Decken-Laufkrane verwendet (Bild 108). Auf Vorsprünge an den beiden Längswänden des Raums sind Schienen verlegt, auf denen ein starker Brückenträger läuft. Infolge der großen Spannweite muß er oft so kräftig gefügt sein, daß ein D-Zug bequem darüberfahren könnte.

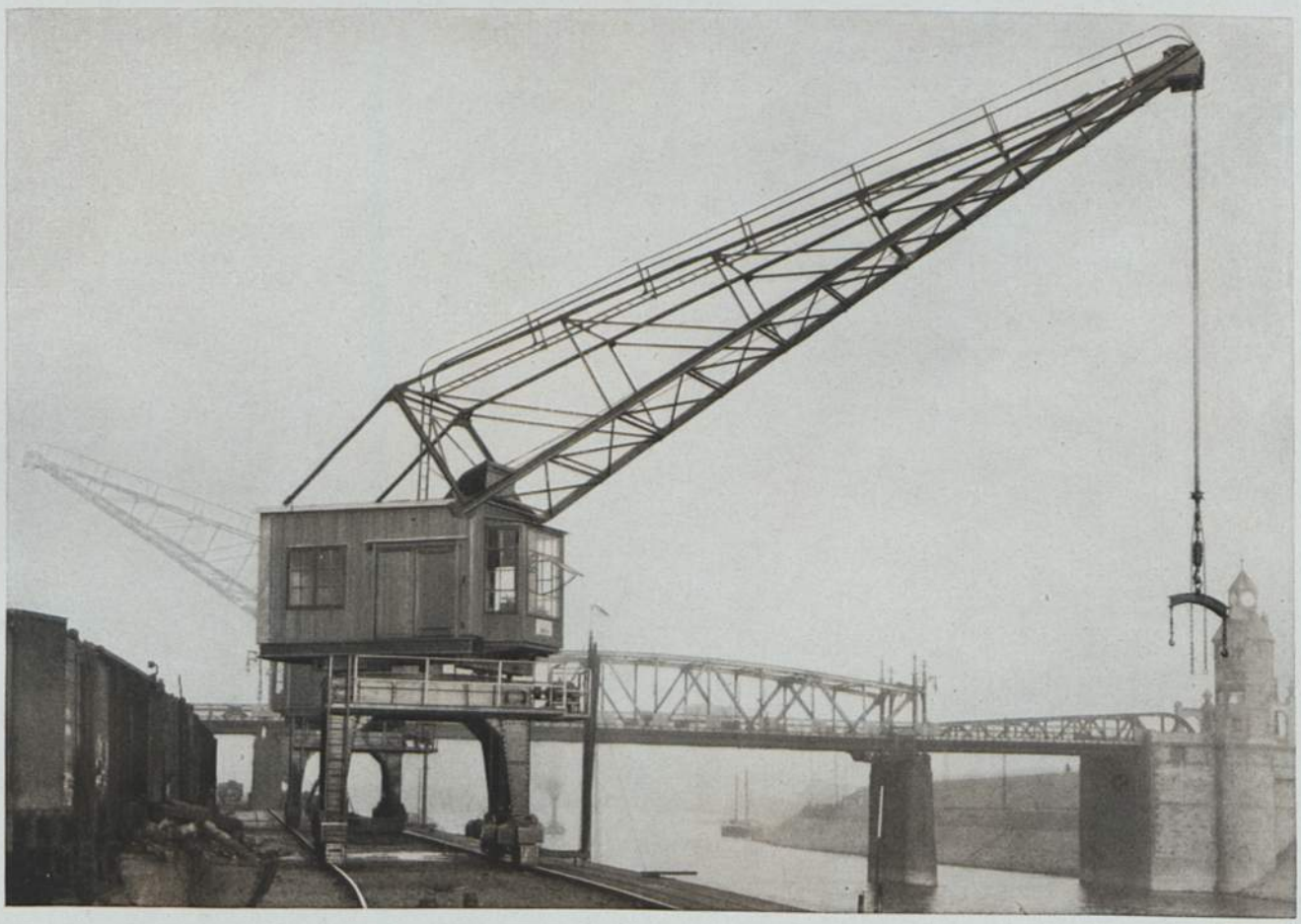
Die Brücke vollführt die Längsbewegung. Zum Querverfahren des Hakens ist eine Laufkatze daraufgesetzt. Meistens ordnet man das Führerhaus so an, daß es mit der Katze fährt, damit der Kranführer die Last stets vor Augen hat. Bei sehr großen Kranen dieser Art ist die Katze nicht selten mit zwei Hub-Werken ausgerüstet: das eine dient zum Emporheben der schweren Lasten und hat nur eine geringe Geschwindigkeit; für das Bewegen von leichten Stücken wird das geschwinder arbeitende, aber minder tragfähige zweite Hubwerk benutzt.

Ein hilfreiches Gerät zum Hinüberschaffen kleiner Lasten von einer Arbeitsmaschine zur anderen ist der Handkran. Die Last kann während der Fortbewegung am Haken hängenbleiben, da das Kurbelgetriebe sich selbsttätig festklemmt (Bild 107). Für das Absenken muß die Bremse von Hand gelöst werden.

Wenn weitere Strecken zu durchmessen sind, also etwa für Fahrten von einem Fabrikgebäude über den Werkhof zum anderen, benutzt man immer häufiger die sehr hübschen elektrischen Kraftwagen-Krane (Bild 109). Die eingebaute, durch eine Akkumulatorenbatterie mit Strom versorgte Maschine kann für den Antrieb der Laufräder und, nach Vornahme einer Umschaltung, zum Bewegen des Hubwerks verwendet werden.

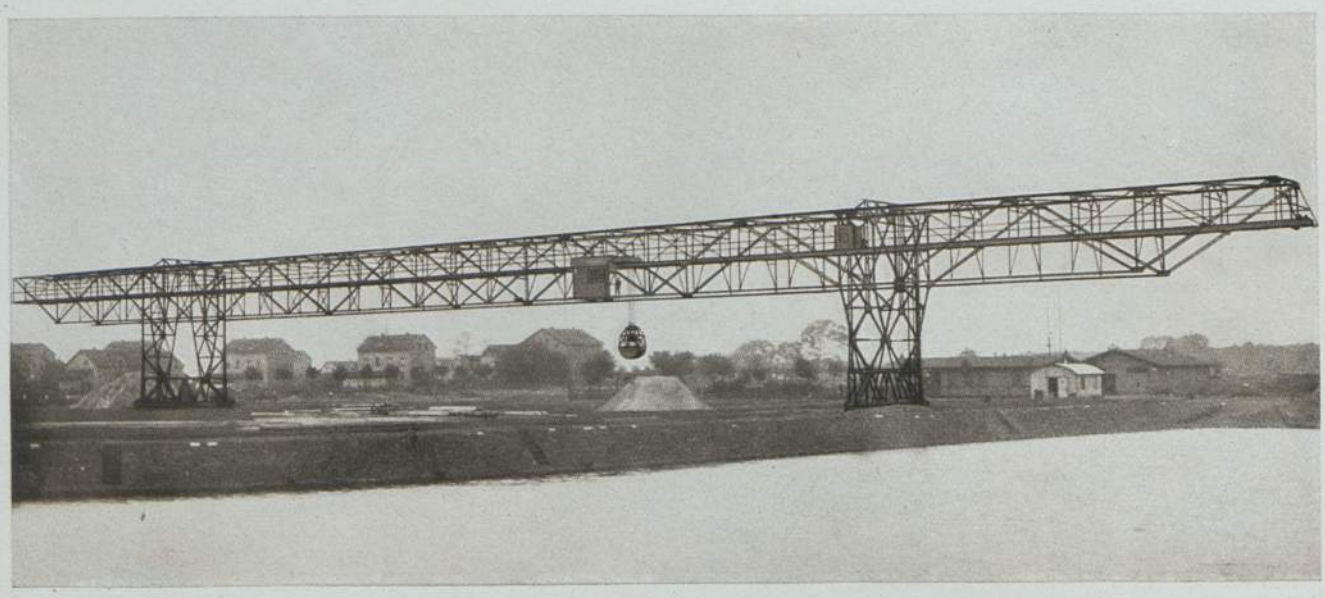
Umladungen schwerer Stücke können überall da, wo Gleis liegt, mit dem tragfähigeren Lokomotiv-Kran vorgenommen werden (Bild 110).

1. Fahrbarer Halbtor- oder Winkeltorkran. Demag, Duisburg

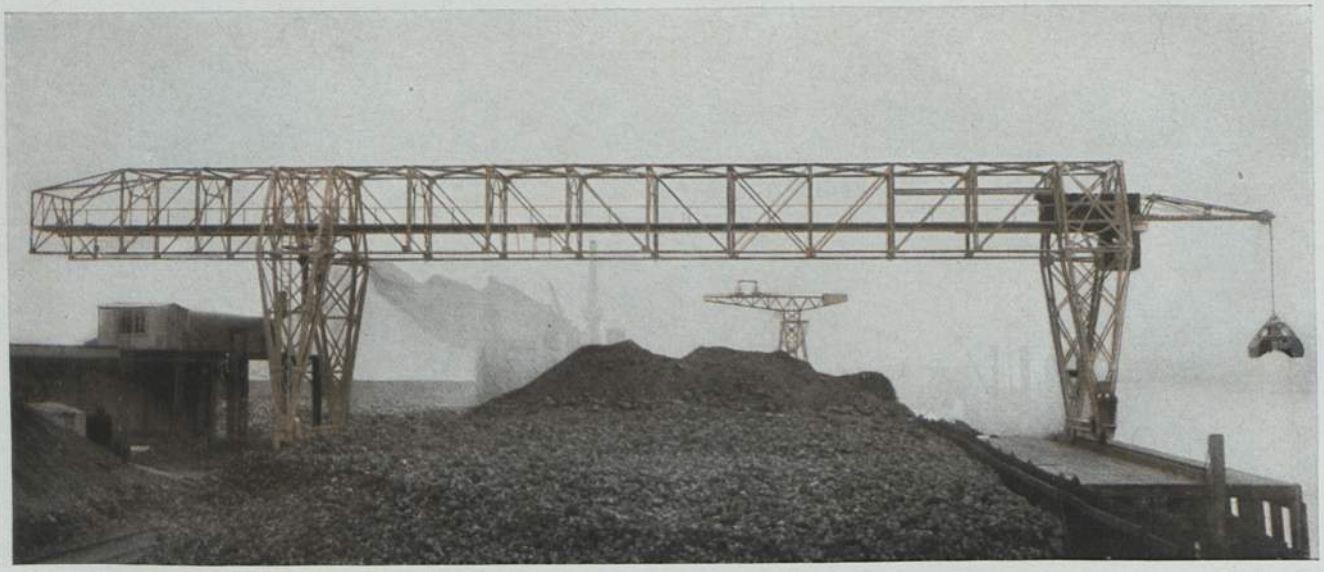


2. Fahrbarer Torkran. Demag, Duisburg

Die Anpassung des Krans an Arbeitsart und Arbeitsort



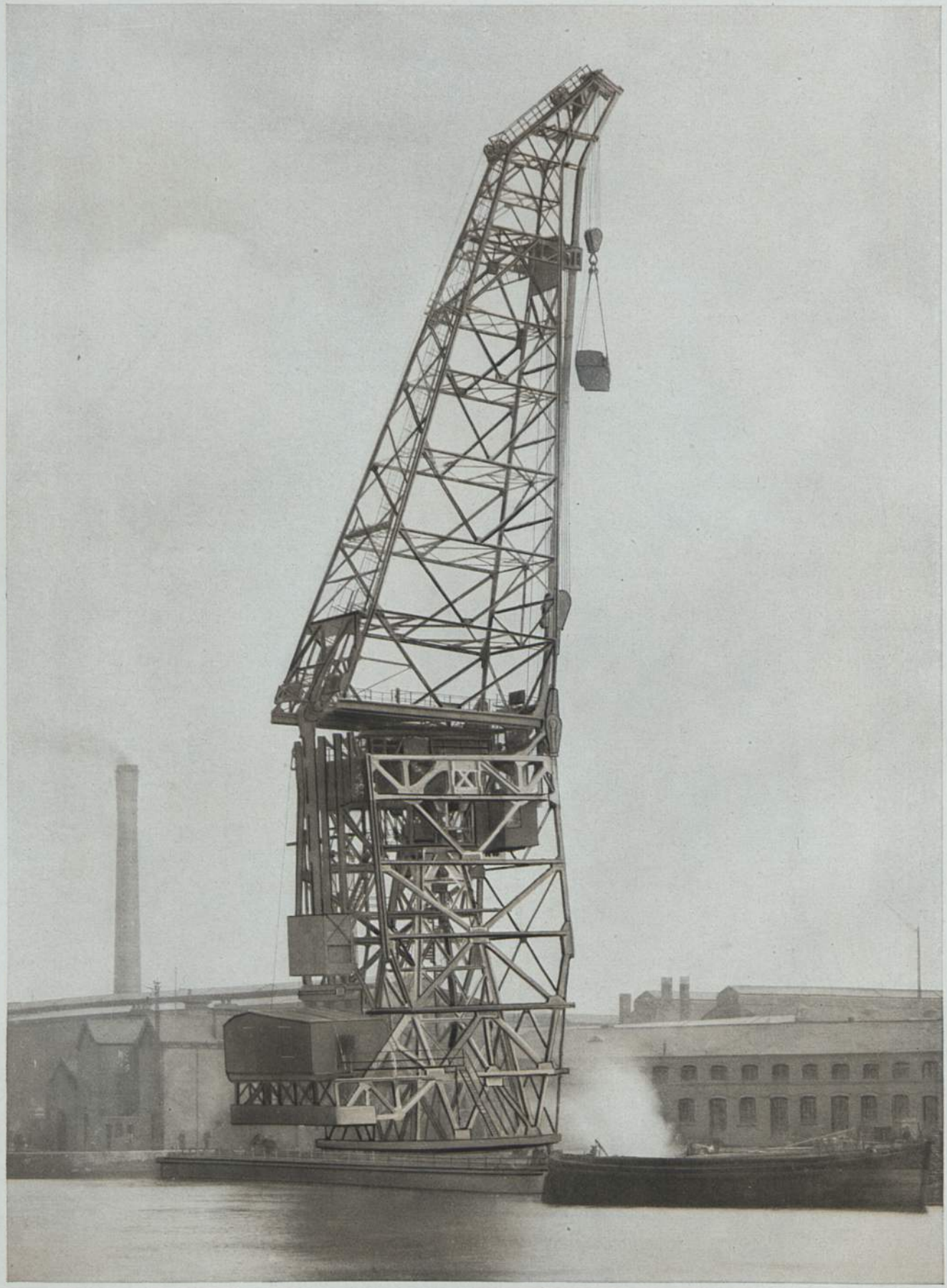
3. Fahrbare Brücke mit Auskragung. Demag, Duisburg



4. Fahrbare Brücke mit Ausleger. Demag, Duisburg.

5. Kabelkran. Adolf Bleichert & Co., Leipzig

6. Hammer-Wippkran auf der Werft von Blohm & Voß in Hamburg. Oben mit wagerechtem, unten mit gewipptem Ausleger. Tragfähigkeit: 250 000 Kilogramm. Erbaut von der Demag, Duisburg



7. Schwimmender Riesenkran der Schiffswerft Harland und Wolff zu Belfast in England. Tragfähigkeit: 152 400 Kilogramm
Erbaut von der Demag, Duisburg

Tiefgreifende Wirkung haben die Hebezeuge auf die Gestaltung des Betriebs in Hütten- und Stahlwerken geübt. Ohne die hierfür entwickelten Sonderbauarten der Krane und Aufzüge sind die heute dort üblichen Arbeitsverfahren nicht denkbar. Bei den Hebezeugen, die für den Hafenbetrieb ausgebildet wurden, finden wir alle grundsätzlich wichtigen Formen und Gattungen in größter Mannigfaltigkeit vor.

Da ist das altehrwürdige Gerät des ortfesten Dampf-Drehkrans, dessen Arbeit dem Wirken des vorhin erwähnten Säulen-Drehkrans entspricht; doch der Dampfantrieb stellt nun eine größere Kraft zur Verfügung als die einfache Handkurbel. Die eingebaute Dampfmaschine treibt das Hubwerk und bewirkt zugleich auch das Schwenken des ganzen Krangehäuses, indem sie ein kleines Zahnrad dreht, das in eine kreisförmige, fest auf dem Unterbau gelagerte Zahnstange eingreift. Dampfkrane gleicher Größe werden häufig fahrbar eingerichtet, so daß der Maschine noch eine dritte Aufgabe erwächst: das Bewegen der Laufräder.

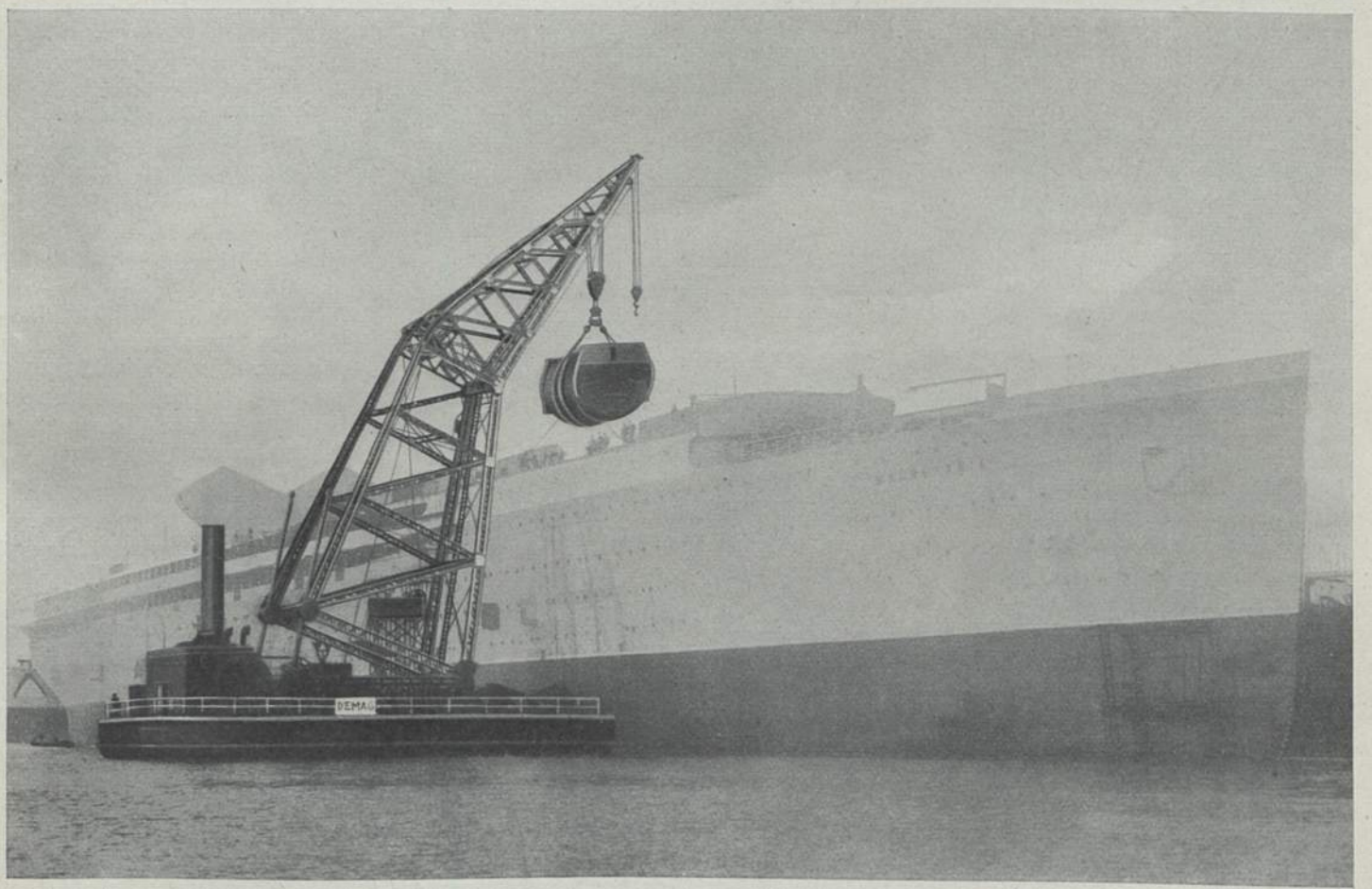
Da die Ladeluken in den Schiffsdecks, aus denen Gut hinauszuschaffen ist, wechselnde Entfernung von der Bollwerkkante haben, macht man den Ausleger beweglich (Bild 111). Indem man ihn einzieht oder sich neigen läßt, kann man alsdann durch jede Luke im Auslegerbereich Ladung ein- und ausbringen.

Wenn der Schiffsbord hoch liegt, stößt der geradlinige Ausleger beim Senken rasch an dessen Kante. Um dies zu vermeiden, gibt man dem Kranschnabel geknickte Form, so daß er schon bei geringer Neigung weit hinübergreifen kann (Bild 112).

Ein bequemes Bedienen von Schiffen jeglicher Bordhöhe ist auch möglich, wenn man den Ausleger zwar glatt läßt, den gesamten Kranbau aber erhöht auf einen Untersatz stellt. Es macht der heutigen Technik keine Mühe, auch einen solchen, doch schon recht weitläufigen Bau fahrbar auszubilden. Dann empfiehlt es sich aber, dem Unterbau die Form eines Tors zu geben. Wenn ein kastenförmiger Unterbau an der Bollwerkkante entlangführe, würde er einen Streifen von etwa $2\frac{1}{2}$ Metern, gleich der Spurweite des Kranfahrgleises, für sich allein beanspruchen. Das Gebiet wäre jeglicher anderen Nutzung entzogen. Unter dem freien Torbau des Krans auf Bild 2, Tafel V aber können eine Straße oder ein Eisenbahngleis durchgeführt werden.

Noch bescheidener in ihren Platzansprüchen sind die Halbtor- oder Winkeltorkrane (Bild 1, Tafel V), deren Unterstützung nur Einen Fuß auf den Boden setzt, während sie auf der anderen Seite auf einem Vorsprung der Lagerhausmauer ruht. Solche Halbtor-Krane sind sehr beliebt. Zu beiden Seiten des Kaiser-Wilhelm-Hafens in Hamburg stehen allein 135 derartige Hebezeuge.

Soll der Kran nicht bloß einen Uferstreifen bedienen, hat er die ihm aufgebürdeten Lasten auch weiter landeinwärts zu schaffen, indem zum Beispiel ein großer Erz- oder Kohle-Lagerplatz gleichmäßig zu beschütten ist, dann genügen Drehfähigkeit und Fahrbarkeit in nur Einer Richtung nicht mehr. Es muß außer der Seiten-Verschiebung auch Längsverschiebung möglich sein. In solchen Fällen erweitert man das Tor, auf dem der eigentliche Kran ruht, zu einer Brücke; sie wird senkrecht zur Bollwerkkante angeordnet und durchmißt die ganze Tiefe des oft recht weitläufigen Lagerplatzes.




114. Schwimmkran mit geknicktem Ausleger an der Mauretania
Tragfähigkeit: 140 000 Kilogramm. Demag, Duisburg

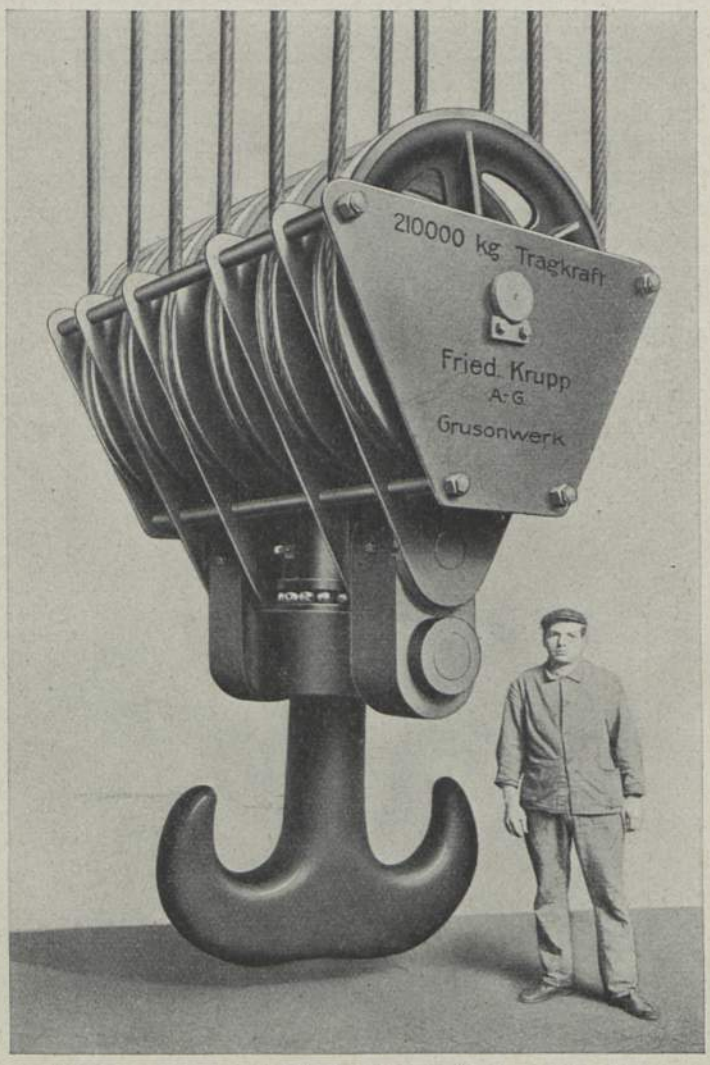
Die auf den Obergurten solcher Brücken laufenden oder daruntergehängten Drehkrane gestatten, wenn die Traggerüste selbst feststehend sind, das Abwerfen des Guts auf einen Streifen, dessen Breite gleich dem Durchmesser des von der Spitze des Kranauslegers beschriebenen Kreises ist. Auf großen Plätzen aber begnügt man sich damit nicht, sondern macht die Brücken selbst fahrbar; ihre Zahl kann dann geringer gehalten werden. Die Antriebvorrichtung für die langen Krangerüste muß mit großer Kunst so gebaut sein, daß die Tragrollen sämtlicher Füße mit gleicher Geschwindigkeit angetrieben werden, da bei der geringsten Abweichung ein Klemmen der Laufräder in den weit auseinanderliegenden Gleisen eintreten würde.

Um bequem aus Schiffen laden zu können, läßt man die Brücke ein Stück über den Uferrand hinauskragen (Bild 3, Tafel V). Man kann jedoch diesen freihängenden Teil, der besonders starke Gurtungen erfordert, kürzer halten, wenn man der Laufkatze die auf Bild 4, Tafel V dargestellte Auslegerform gibt.

Auch fahrbare Brücken werden öfter mit Drehkranen ausgerüstet, damit man bei jeder Brückenstellung einen breiten Streifen beherrscht, also nicht nötig hat, fortwährend das schwere Gerüst in Bewegung zu setzen.

Die Herstellung der Hochbrücken für Krankatzen heischt erhebliche Ausgaben. Die Länge, in der sie ausgeführt werden können, ist deshalb aus wirtschaftlichen Gründen beschränkt. Über 125 Meter geht man kaum jemals hinaus. Wenn also ein Gebiet von größerer Ausdehnung versorgt werden soll, muß man eine andere Bauart anwenden. Sie ist gegeben durch die Kabelkrane, die nichts anderes darstellen als Seilbahnen von geringer Länge und besonderer Art der Tragseilaufhängung (Bild 5, Tafel V).

Türme werden zu beiden Seiten des Arbeitsgebiets aufgestellt; über ihre Spitzen ist das Tragseil geführt, das ja, wie wir wissen, sehr weite Entfernungen freitragend zu überbrücken vermag. Der eine Turm steht fest im Boden, während der andere beweglich ist. Falls nur ein schmaler Streifen bestrichen werden soll, genügt es, den Gegenturm schwenkbar zu machen. Sein Fuß ruht auf einem Kugellager, so daß die Spitze durch Verstellen der Halteseile nach rechts und links gekippt werden kann. Wo das nicht ausreicht, legt man ein kreisförmig gebogenes Gleisstück an, auf dem der bewegliche Turm ein Stück nach beiden Richtungen zur Seite fahren kann.




115. Großer Kranhaken

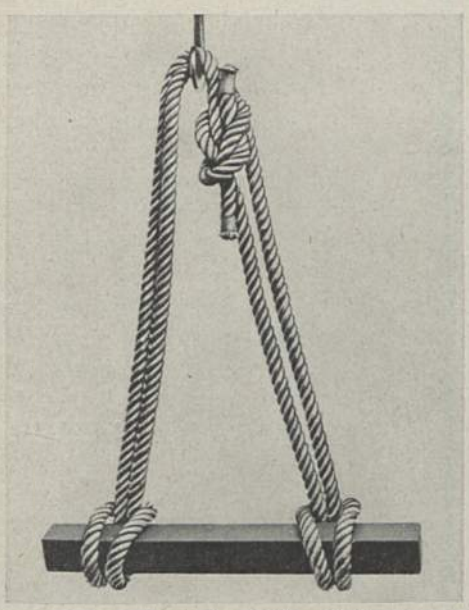
Die Krankatze hat recht erhebliche Abmessungen. Denn sie trägt außer der Hubvorrichtung meist auch das Führerhaus, damit der Steuermann die Arbeit des Krans genau beobachten kann. Die Antriebmaschinen für die Zugseile müssen sehr kräftig ausgebildet sein, weil die Katze ja wegen des Seildurchhangs bei jeder Fahrt aus der Mitte eine Steigung zu überwinden hat.

Die mächtigsten Kranbauten sind durch die Bedürfnisse des Werftbetriebs entstanden. Die Herstellung der gewaltigen Ozeanschiffe, deren Abmessungen in den letzten Jahrzehnten außerordentlich gewachsen sind, erfordert die Bewältigung sehr schwerer Lasten. Zum größten Teil sind die Schwerlasten vom Bollwerk auf das bereits im Wasser liegende Schiff zu überführen. Denn auf der Helling stellt man nur den eigentlichen Rumpfbau her, damit das Schiff während des immer ein wenig gefährlichen Stapellaufs möglichst leicht ist.

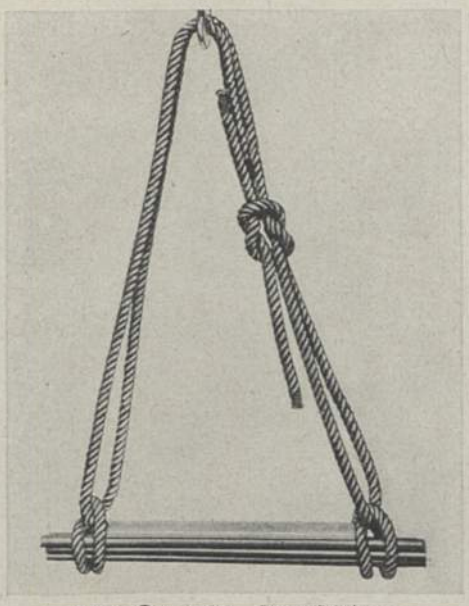
In früheren Zeiten, als die Schiffe noch längst nicht so hochbordig waren wie heute, bevorzugte man für die schweren Werftkrane die Scheren-Bauart (Bild 113). Das dreibeinige Krangerüst wippte durch Nachlassen oder Anziehen der hinteren Strebe um die beiden Vorderfüße, so daß der an dem hohen Vereinigungspunkt der Streben angebrachte Flaschenzug bald über dem Wasser, bald über dem Land hing. Die scherenförmige Spreizung war notwendig, da ein solcher Kran, dem die Schwenkfähigkeit fehlt, seine Last auf dem Land nur zwischen den Vorderstreben niederlegen kann. Zum Bedienen sehr hoher Schiffsbauten läßt sich der Scherenkran nicht mehr verwenden, weil er schon bei geringer Neigung an die Bordkante stößt.

Man ging deshalb zur Turm-Bauart mit drehbarem Ausleger über. Die Gerüststützen dürfen dann eng stehen, da die Last seitwärts abgesetzt werden kann. Der auf Bild 113 dargestellte Kran besitzt zwei Lasthaken. Der an der Auslegerspitze hängende kann 50 000 Kilogramm, der andere 150 000 Kilogramm heben. Der Arm selbst ist in der senkrechten Ebene beweglich, so daß jeder der Haken ein breites Arbeitsfeld zu bestreichen vermag.

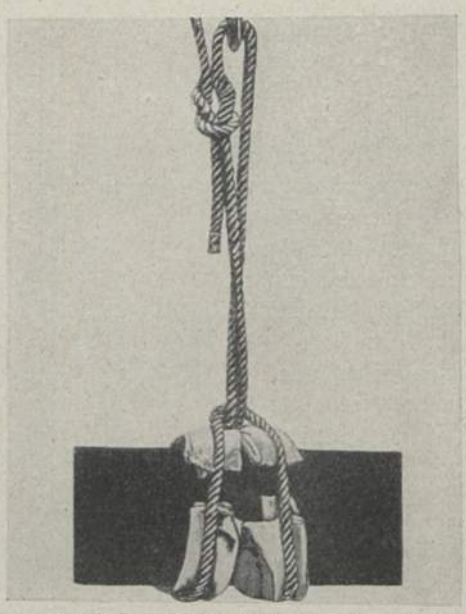
Sämtliche Krane mit schrägen Auslegern haben den Nachteil, daß jede Verschiebung des Lasthakens in der wagerechten Ebene zugleich eine Hebung oder Senkung der Last mit sich bringt. Wenn also bei den Einrichtungsarbeiten im Schiffsinneren ein schwerer Gegenstand nur wagerecht verschoben werden soll, dann ist immer auch Ingangsetzen des Hubwerks notwendig, wodurch die Genauigkeit der Kranarbeit



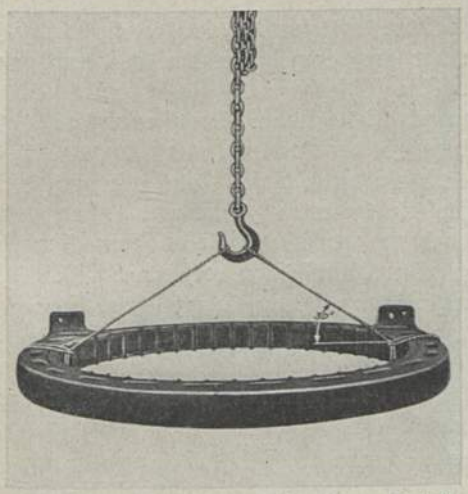
116. Doppelte Würgeschlinge
Die Schlingen legen sich fest um die Last



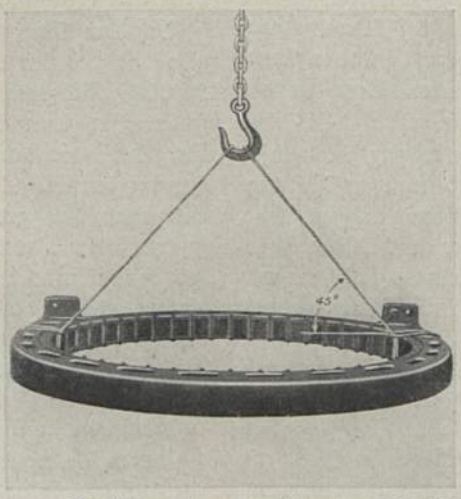
117. Doppelte Kreuzschlinge
Ein eingelegtes Holz verhindert ein Zusammenrutschen der Schlingen



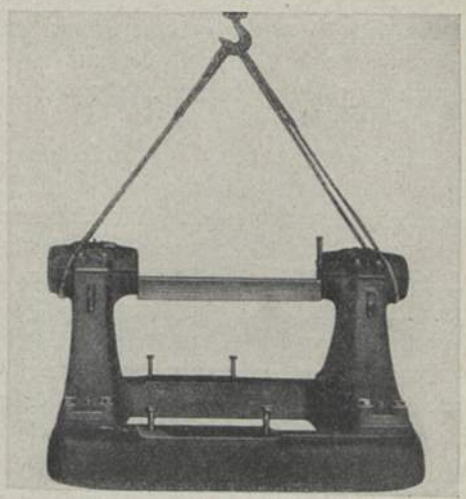
118. Einfache Würgeschlinge mit Seilschutz
Zwischenlegen von Tüchern ist ein besonders guter Seilschutz



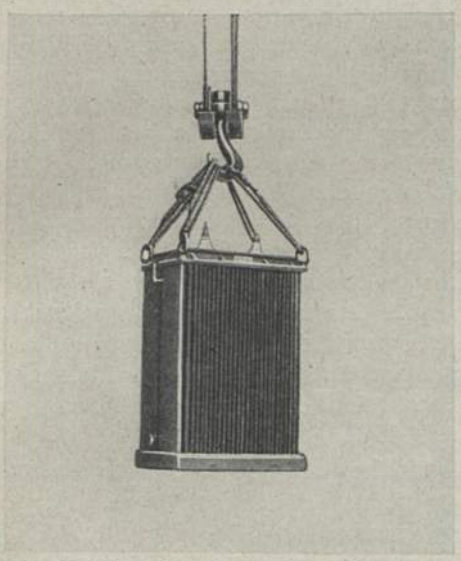
119. Anbinden eines ringförmigen Stücks
Bei einem Winkel von 30° wird das Seil ungünstig beansprucht



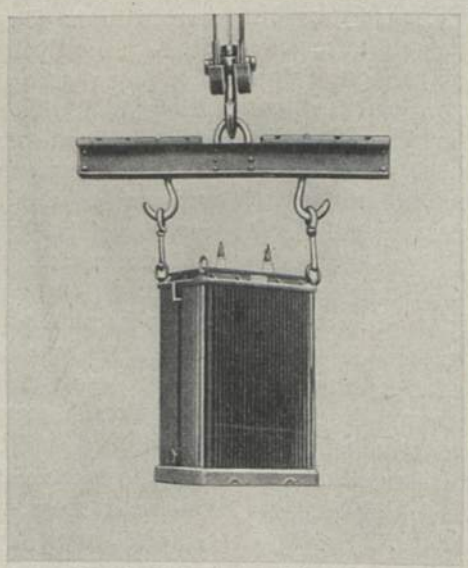
120. Anbinden eines ringförmigen Stücks
Der Winkel sollte nie kleiner als 45° sein



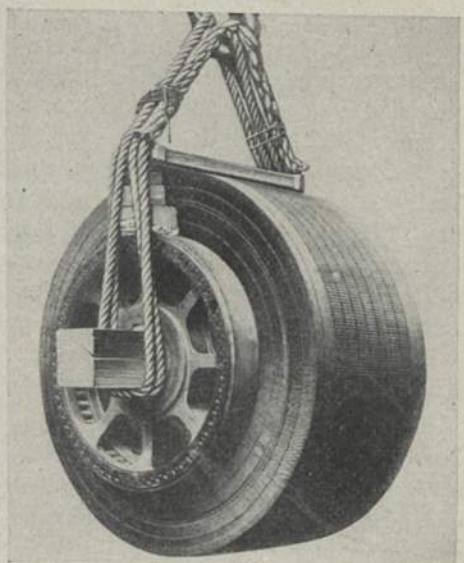
121. Aufhängung eines Lagerbocks
Zwischen die Köpfe ist eine Bohle gesetzt, um das Zusammendrücken zu verhindern



122. Falsch aufgehängter Transformator



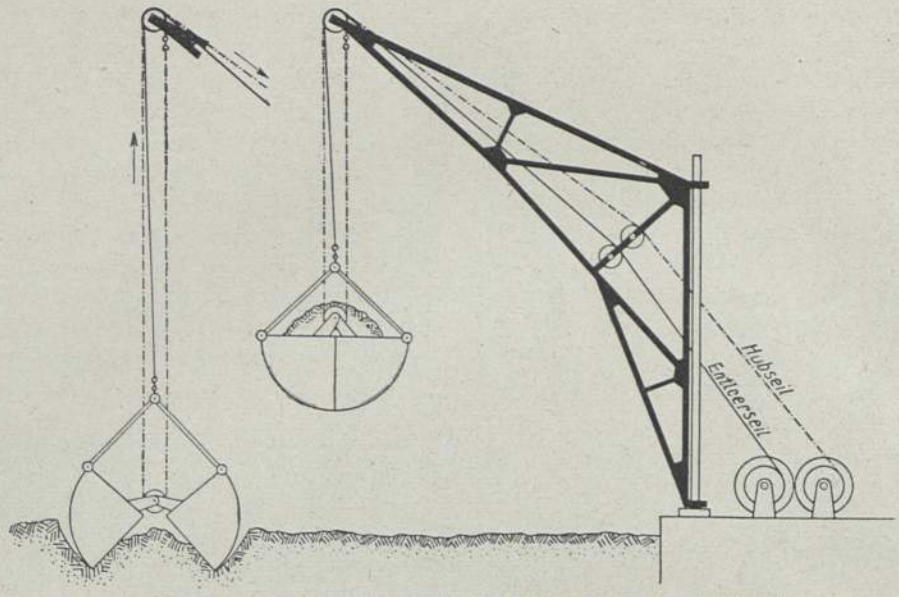
123. Richtig aufgehängter Transformator



124. Aufhängen eines Ankers

Aus den Vorschriften der AEG, Berlin, für die Befestigung von Lasten

stark beeinträchtigt wird. Das wird häufig als sehr störend empfunden. Es ist deshalb eine Kranbauart ausgebildet worden, die Wippbewegungen vollständig vermeidet. Seitdem die Deutsche Maschinenfabrik im Jahr 1900 einen Drehkran in Hammerform für die Hafenbau-Verwaltung in Bremerhaven errichtete, hat diese Bauart sich die Welt erobert.




125. Schematische Darstellung der Einrichtung des Zweiseilgreifers

Hammerkrane nennt man die ragenden Gestalten, weil der nach beiden Seiten des Unterbaus auskragende Ausleger sich diesem gegenüber in gleicher Lage befindet wie der Hammerkopf zum Stiel. Der Ausleger ist drehbar und trägt bei älteren Ausführungen eine Laufkatze, die nur auf dem längeren Auslegerteil zu laufen vermag. Auf der anderen Seite ist ein Gegengewicht angeordnet.

Die wagerechte und die senkrechte Bewegung des Lasthakens, Katzenfahren also und Hub, sind nun vollständig unabhängig voneinander. Die Hammerkrane müssen sehr hoch gebaut werden, damit ihre Ausleger auch über hohe Schiffsmasten hinweggeschwenkt werden können, falls einmal eine Schwerlast in dem Raum zwischen zwei Masten abzusetzen ist.

Eine Vervollkommnung wird erreicht, wenn man auf jeden der beiden Auslegerteile eine Katze setzt. Die auf dem kürzeren Arm fahrende hat dann etwa eine Tragfähigkeit von 150 000 Kilogramm, die andere hebt Lasten bis zu 50 000 Kilogramm Gewicht. Die eine Katze muß stets am Ende ihres Auslegers stehen, wenn die andere arbeitet. Auf diese Weise ist die Anbringung eines toten Gegengewichts vermieden.

Die Ausleger so großer Krane sind sehr schwer; die Schwenkbewegung kann daher nur mit geringer Geschwindigkeit vorgenommen werden. Man möchte aber geringere Lasten geschwinder vom Land über Wasser bringen oder in umgekehrter Richtung befördern können. Diesen Wunsch erfüllt die Hebezeug-Technik dadurch, daß auf den oberen Gurt des Auslegers ein Drehkran gesetzt wird, der über den ganzen Bau hinwegfahren kann und durch Schwenken seines Arms ein ziemlich großes Arbeitsfeld zu beiden Seiten des Hauptauslegers bestreicht. Auf dem Untergurt fährt nach wie vor die Laufkatze, welche die Schwerlasten zu heben hat.

Alle bisher beschriebenen Riesenkrane werden an Größe und Leistungsfähigkeit weit in den Schatten gestellt durch eine Hebevorrichtung von 250 000 Kilogramm Tragfähigkeit, die einen der größten Krane auf der Erde darstellt (Bild 6, Tafel V). Er wurde von der Deutschen Maschinenfabrik (Demag) in Duisburg für die Werft von Blohm & Voß in Hamburg erbaut und im Anfang des Jahres 1913 in Betrieb genommen. Die Hammerform ist hier dadurch weitergebildet, daß der große Auslegerteil außer der Drehbewegung noch eine Wippbewegung auszuführen vermag.

Die Werft wollte die Sicherheit haben, daß ihr Hauptkran auch bei weiterem starken Anwachsen der Schiffsabmessungen über die höchsten Mastspitzen hinweg geschwenkt werden könnte. Darum wurde der 55,4 Meter lange Lastarm aufklappbar eingerichtet. In dieser Stellung erreicht die Spitze des Auslegers die gewaltige Höhe von 104 Metern über dem Wasser. Der Obergurt des Auslegers liegt 55 Meter über dem Boden. Zum Vergleich sei bemerkt, daß die Berliner Siegessäule 61,5 Meter hoch ist.

Auf dem Obergurt beider Auslegerteile, des langen hebbaren also wie des kurzen nur drehbaren, fährt ein Drehkran von 20 000 Kilogramm Tragfähigkeit mit einziehbarem Ausleger. In dem langen Auslegerarm kann unterhalb des Drehkrans die Laufkatze mit der Hubkraft von 250 000 Kilogramm laufen. Die Hubmotoren dieser Katze, die auch das Aufziehen des großen Auslegerarms bewirken, leisten 190 Pferdestärken, während je 76 Pferdestärken zum Drehen des Hauptkrans und zum Katzenfahren verfügbar sind. Die Gesamtleistung aller auf dem Kran befindlichen Motoren beträgt 524 Pferdestärken. Das Heben des unbelasteten Auslegers von der wagerechten bis zur höchsten Stellung dauert 30 bis 35 Minuten, eine vollständige Drehung nimmt 12 Minuten in Anspruch.

Sollen Bewegungen in senkrechter Richtung mit dem wippbaren Ausleger vorgenommen werden, dann wird der Drehkran auf den kurzen Ausleger gefahren, um als Gegengewicht zu dienen, und die Laufkatze in der Spitze des langen Auslegers festgestellt, was in wenigen Minuten ausgeführt werden kann. Bevor dieses Verriegeln der Laufkatze erfolgt ist, kann der Ausleger nicht emporgezogen werden. Die Hebevorrichtung arbeitet nun als Wippkran; mittels des Einziehwerks können der Wippe auch bei angehängter Last sämtliche Ausladungen gegeben werden. Da das Verfahren der Laufkatze aber rascher geht und noch dazu weniger Kraftaufwand erfordert, so wird natürlich zur Veränderung der Ausladung des großen Hakens das Verfahren der Katze auf dem wagerecht stehenden Ausleger bevorzugt. Das Aufwippen ist aber unumgänglich notwendig, wenn ein Schiff mit so hohen Masten unter dem Kran liegt, daß der Arm bei wagerechter Lage nicht in den Raum zwischen diesen gebracht werden kann, um dort eine Last abzusetzen. Zur Bedienung aller Vorrichtungen des Krans sind nur drei Mann erforderlich.

Mit Hilfe dieses gewaltigen Hebezeugs, das alle anderen Bauten im Hamburger Hafen weit überragt, sind die Riesendampfer der Hamburg-Amerika-Linie „Vaterland" und „Bismarck" hergestellt worden, während das erste Fahrzeug dieser größten Schiffsklasse der Erde, der „Imperator", auf der Vulkanwerft in Hamburg gebaut wurde. Niemand konnte

in der Zeit, als Blohm & Voß den Eisenkran bestellten, auch nur im entferntesten ahnen, daß schon ein Jahr nach Inbetriebnahme der Hamburger Hafen nahezu stillgelegt werden, seine Werften sich in den folgenden Zeiten mit sehr viel geringeren Aufgaben zu beschäftigen haben würden. Als ein Wahrzeichen deutscher Kraft, des zukunftsfrohen Wagemuts der deutschen Ingenieure in der Vorkriegszeit, stand der größte Kran auf der Erde am Rand eines der größten Häfen, und es blieb nur zu wünschen, daß das mächtige Hebezeug in nicht allzuferner Zeit wieder Gelegenheit haben werde, seine volle Arbeitskraft bei der Herstellung neuer Riesenbauten zu betätigen. Heute ist sie wieder gegeben.

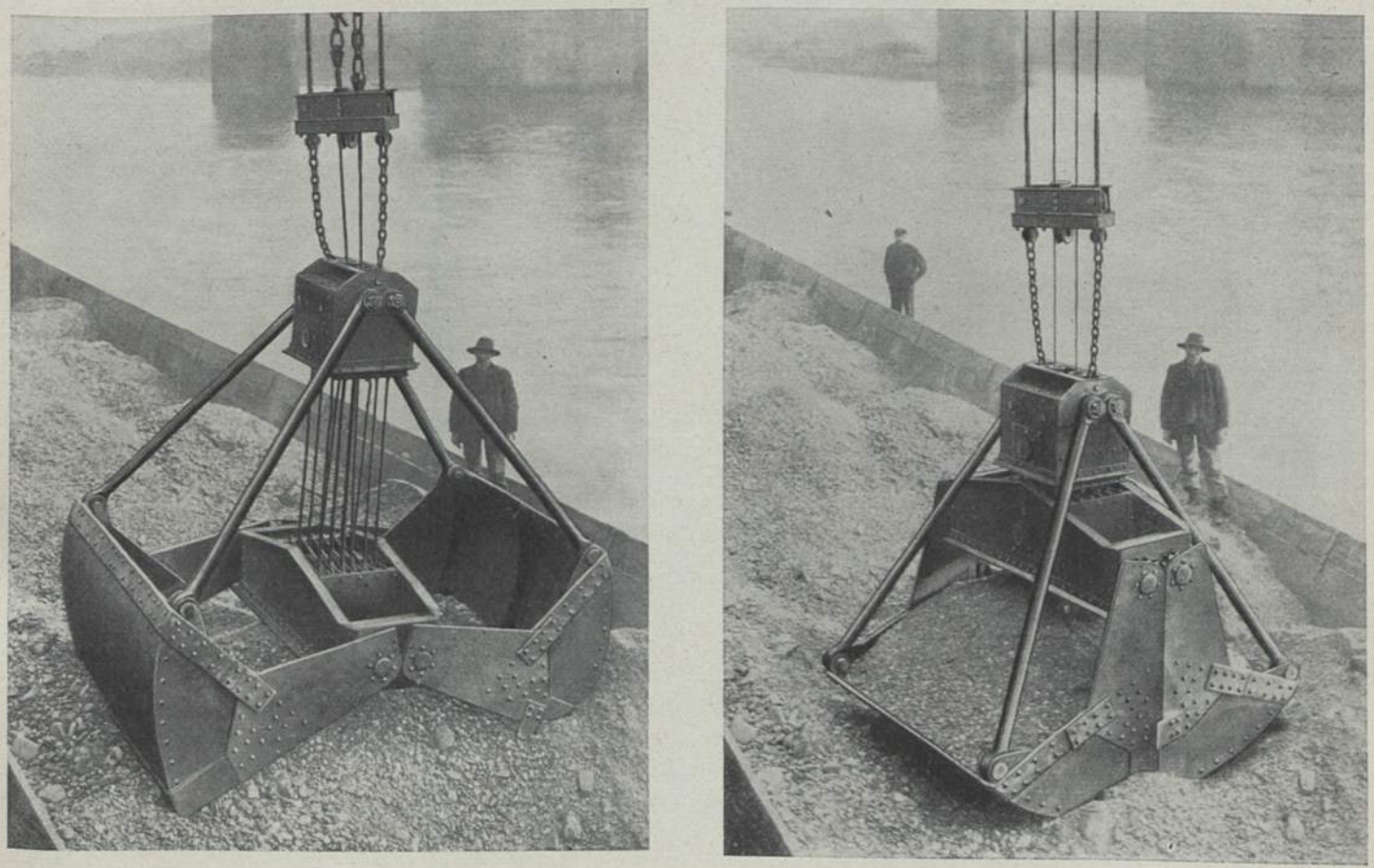
Zum nicht geringen Teil werden die Ladungen, welche mit den großen Ozeandampfern in den Seehäfen ankommen, nicht an Land gebracht, sondern auf Binnenschiffe übergeführt; dies geschieht unter Benutzung von Schwimmkranen. Die Hebezeuge dieser besonderen Art haben aber auch häufig sehr viel schwierigere Arbeit zu verrichten, nämlich das Überbringen umfangreicher Ausrüstungsstücke von den Werften zu solchen erst halbfertigen Schiffbauten, die aus irgendeinem Grund im tiefen Wasser liegen müssen. Diese Anforderung hat zur Ausbildung von schwimmenden Riesenkranen geführt.

Vor Jahrzehnten wendete man auch in diesem Bezirk den Scherenkran an, der aber, wie seine Kameraden am Land, nur ein beschränktes Anwendungsgebiet hatte. Es wurde daher auch hier bald die Bauart mit einziehbarem Ausleger bevorzugt. Besonders günstig erwies sich die geknickte Form zur Bedienung hochbordiger Schiffe.

Der auf Bild 114 dargestellte Schwimmkran, der von der Deutschen Maschinenfabrik für die Schiffswerft Swan, Hunter and Wigham Richardson zu Wallsend in England erbaut wurde und unter anderem zur Ausrüstung der Riesendampfer „Mauretania" und „Lusitania" diente, hat eine Tragfähigkeit von 140 000 Kilogramm. Das Fahrzeug vermag mit eigener Kraft zu fahren. An dem Prahm, auf dem der Kran ruht, sind sechs Schrauben angebracht, zwei vorn, zwei hinten zum Vorwärts- und Rückwärtsfahren und eine an jeder Seite. Die Beweglichkeit nach allen Seiten, die das Hebezeug hierdurch erhält, macht das Verschieben des zu bedienenden Schiffs während der Herstellungsarbeiten unnötig; das ist sehr erwünscht, denn das Verholen großer Schiffe kann nur unter erheblichem Aufwand von Zeit und Mühe geschehen. Der Wippausleger besitzt drei Haken, deren kräftigster die schon genannte Tragfähigkeit hat und bis zu 27,5 Metern über dem Wasser emporgezogen werden kann. Der Haken an der Auslegerspitze bewältigt noch 20 000 Kilogramm, und ein dritter, der an einer auf dem Untergurt des Auslegers fahrenden Laufkatze hängt, trägt 5000 Kilogramm.

Ein anderer schwimmender Riesenkran wurde von derselben deutschen Firma für die Schiffswerft Harland and Wolff zu Belfast in England geliefert (Bild 7, Tafel V). Hier ist der Wippausleger auf einen Turm gesetzt, so daß er selbst das Deck des höchstbordigen Schiffs vollständig zu übergreifen vermag. Die Tragfähigkeit des Haupthakens beträgt 152 400 Kilogramm; der Drehpunkt des Auslegers liegt 25 Meter über dem Prahm-Deck. Die im Untergurt fahrende Katze kann 5000 Kilogramm emporziehen.

Bei den Schwimmkranen muß dafür gesorgt sein, daß kein Kippen durch die angehängte Last eintritt. Das wird durch Bewegen eines Gegengewichts bewirkt, das im Prahm



126. Selbstgreifer, links: offen, rechts: geschlossen
Bauart Demag, Duisburg

wagerecht verschoben werden kann, oder durch Einpumpen von Wasser in hierzu vorgesehene Behälter. Der Kranführer hat die Gesamtsteuerung so einzurichten, daß eine im Führerhaus aufgestellte Wasserwage stets richtig einspielt.

*

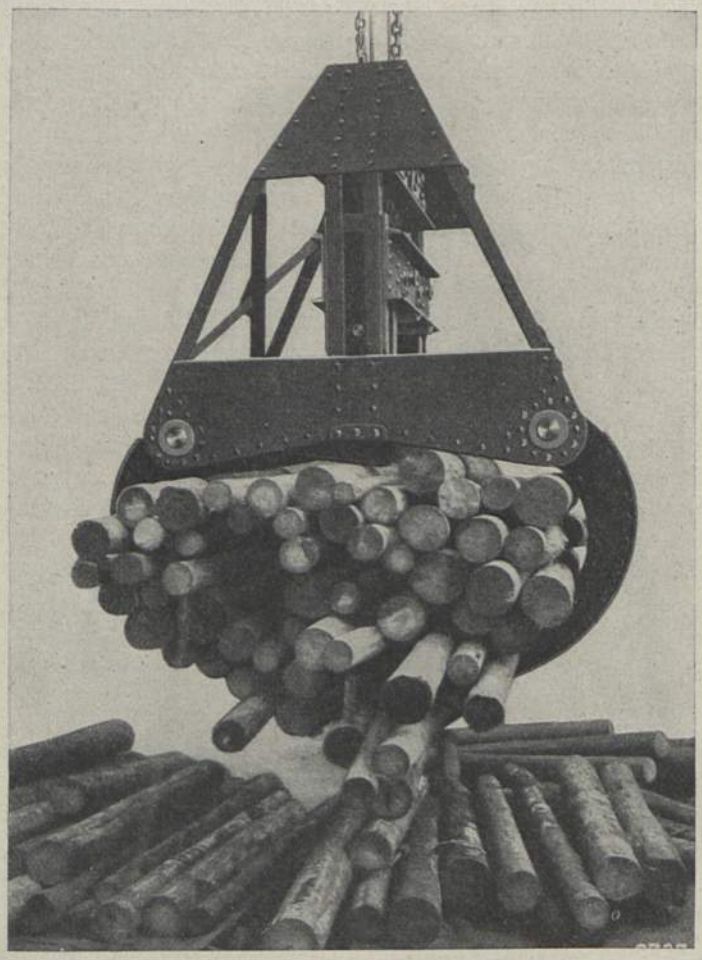
Die Krane haben je nach der Art des Betriebs, dem sie dienen, Lasten der verschiedensten Arten und Formen zu fördern. Bald sind es Einzelstücke, bald schüttbare Massen, die aufgenommen, gehoben, geschwenkt und wieder abgesetzt werden müssen. Die Tragvorrichtung, die an die Unterflasche des Hubwerks gehängt wird, muß jedesmal zweckentsprechende Gestalt haben.

Zur Förderung von Einzellasten dient hauptsächlich der Haken, in dessen Öffnung die Last gehängt wird (Bild 115). Bei Kranen von hoher Tragfähigkeit erhält solch ein Haken sehr erhebliche Abmessungen. Das Anbinden der Lasten ist oft nicht leicht, da unbedingte Sicherheit gegen Abrutschen geschaffen, zugleich aber auch Rücksicht auf die Form des zu fördernden Gegenstands selbst genommen werden muß; denn dieser wird bei dem Weg durch die Luft in ganz anderer Weise beansprucht, als wenn er auf dem Boden ruht. Eine sehr gute Zusammenstellung aller Gesichtspunkte, die bei der Förderung von Einzellasten an Kranhaken zu beachten sind, geben die Vorschriften, welche die AEG für die in ihren Werken beschäftigten Anbinder erlassen hat. Dort heißt es:

„Die Befestigung der Last an dem Kranhaken wird durch Hanfseile, in besonderen Fällen auch durch Gurte, Drahtseilschlingen und vereinzelt durch Ketten bewerkstelligt. Zur Vermeidung von Unfällen müssen vor allem drei Dinge beachtet werden: richtige Auswahl des dem Gewicht der Last entsprechenden Tragseils; sachgemäße Ausführung der Schlingen und Verknotungen; ordnungsmäßiges Aufhängen und Absetzen der Lasten. Die Knoten müssen so geschlungen sein, daß sie sich durch das Gewicht der angehängten Last nicht auseinanderziehen. Es ist aber auch durch geeignete Maßregeln dafür zu sorgen, daß die fest zusammengezogenen Knoten nach Beendigung der Förderbewegung sich leicht wieder lösen lassen." Einige für das Anbinden der Lasten empfohlene Knoten und Schlingen, welche die Vorschriften im Bild zeigen, sind hier wiedergegeben (Bild 116—118).

„Das Anbinden der Lasten", so heißt es weiter, „muß unter sorgfältiger Ausbalancierung und sachgemäßer Aufhängung am Kranhaken erfolgen. Die Seile müssen so befestigt werden, daß ein Herausgleiten, ein Bruch oder eine Verbiegung der Last unmöglich gemacht sind."

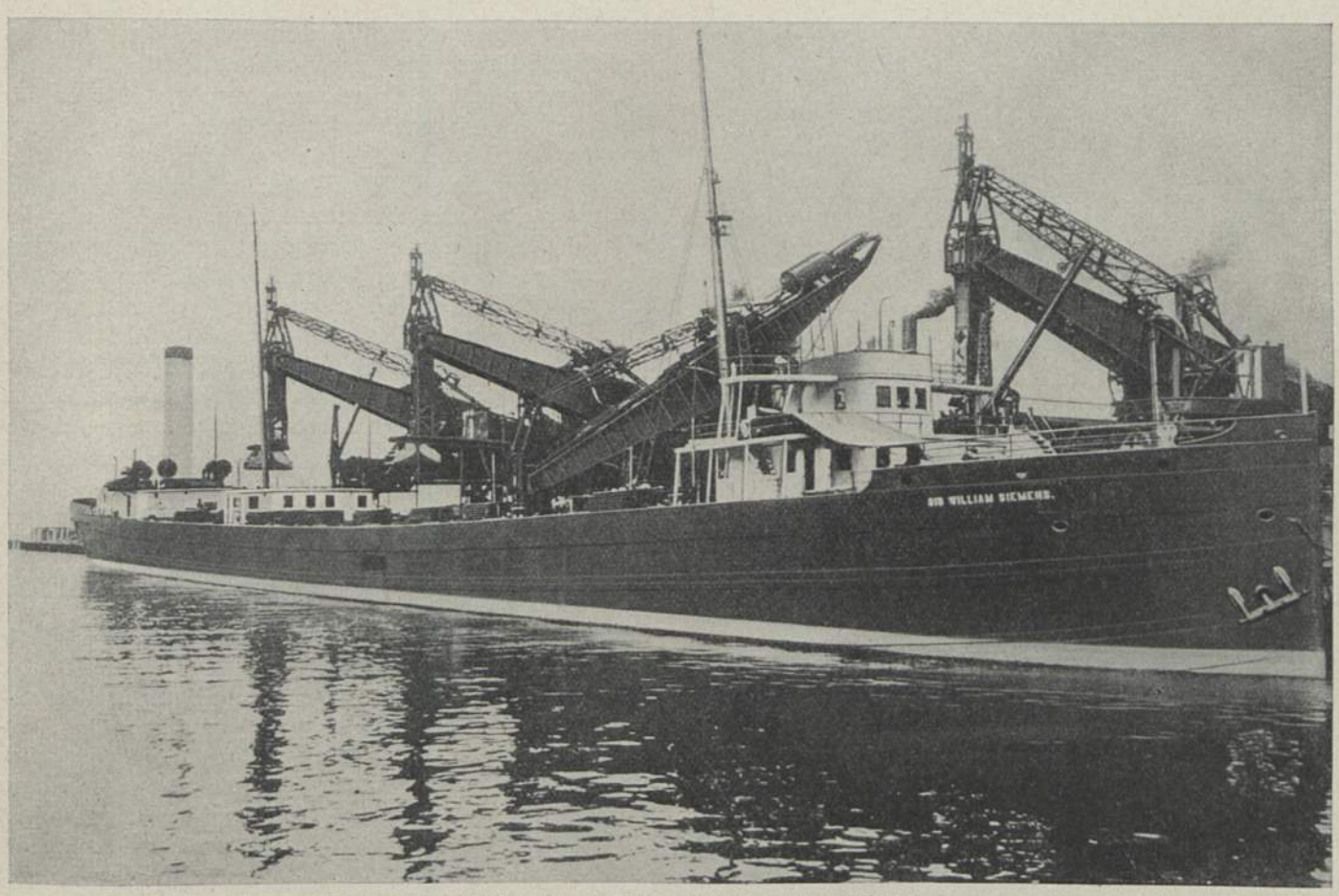
Es werden dann Beispiele von Lasten-Befestigungen am Kranhaken aufgeführt, wie sie hergestellt und nicht hergestellt werden sollen. Besonders beachtenswert sind die Angaben für die Winkelung der Seile beim Anbinden eines ringförmigen Stücks auf Bild 119 und 120, das Beispiel der zwischen die Lagerköpfe gesetzten Bohle auf Bild 121 und das Aufhängen eines Ankers (Bild 124). Die äußerst ungünstige Beanspruchung der Hängeösen des Transformators auf Bild 122 ist ohne weiteres zu erkennen. Aufhängungen dieser Art werden aber dennoch vielfach ausgeführt. Ausgezeichnet ist die Anbringung desselben Gegenstands an einem Querbalken (Bild 123). Wenn nach solchen Anweisungen verfahren wird, scheint die überall angebrachte Vorschrift beinahe überflüssig: „Der Aufenthalt unter der am Kran hängenden Last ist verboten!"



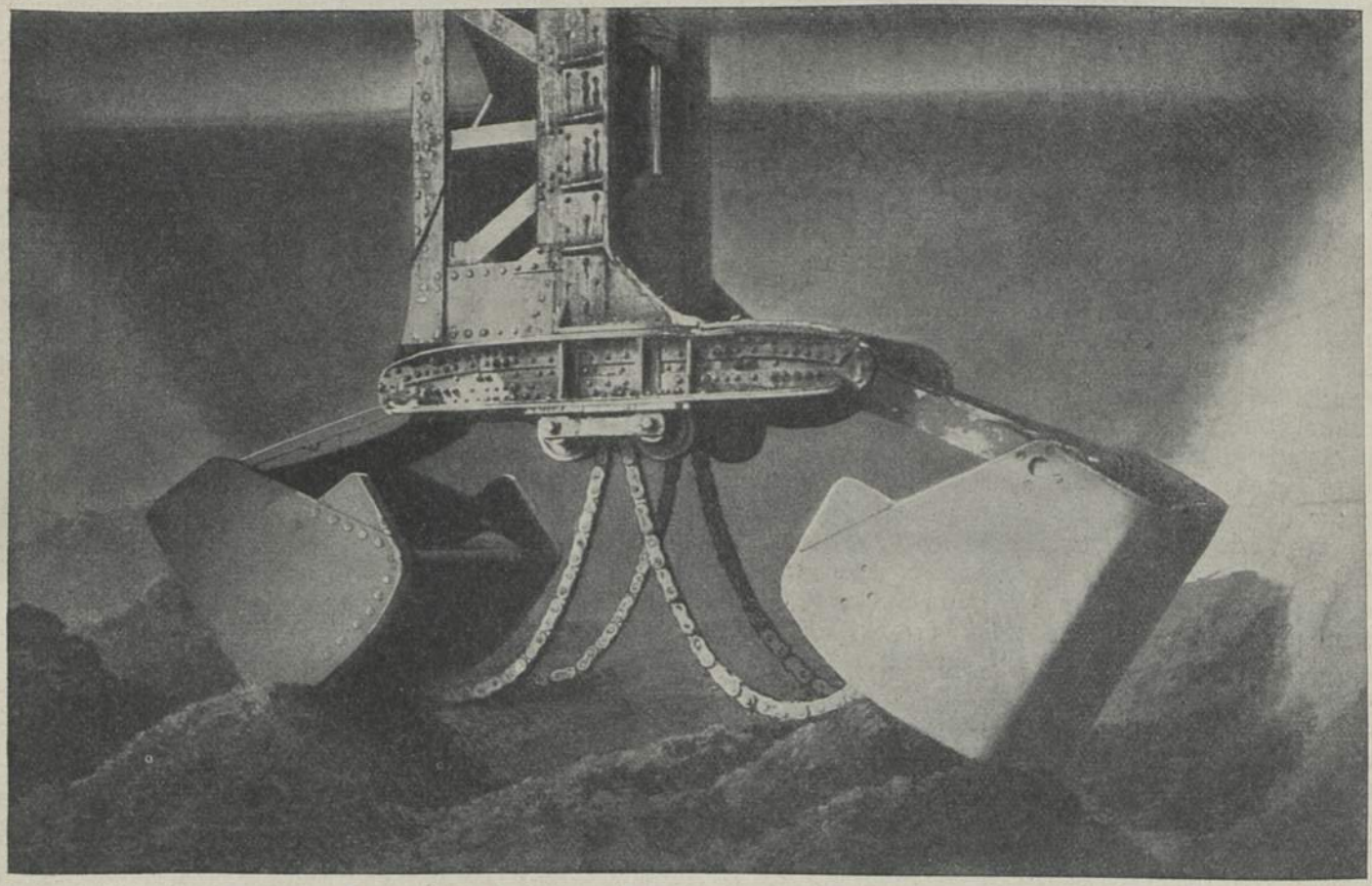
127. Selbstgreifer für Rundholz
Ausführung Demag, Duisburg

Die Förderung von schüttbaren Massengütern erfolgte früher mittels Kübel, die zuerst einfache Gefäßform hatten, so daß sie mit der Schaufel gefüllt werden mußten, dann aber so ausgebildet wurden, daß sie bei seitlichem Zug des Kranseils selbst das Gut aufschürften. Während der Kranbewegung wurden die Kübel am Gehänge festgeriegelt, so daß sie nicht kippen konnten. Heute sind die Kübel wohl überall durch die Selbstgreifer verdrängt, die erst einen neuzeitlichen Schnellbetrieb bei den Kranen möglich gemacht haben. Sie verbilligen die Massenförderung nicht bloß durch die Beschleunigung des Aufnehmens und Ausschüttens, sondern hauptsächlich auch dadurch, daß sie die Zahl der für das Laden notwendigen Arbeiter sehr stark verringern.

Es ist ein großartiges Schauspiel, das ein mit Selbstgreifer ausgerüsteter Kran bei seiner Tätigkeit bietet, wenn er zum Beispiel Kohle vom Schiff auf den Lagerplatz fördert. Der Greifer stürzt sich, einem hungrigen Ungeheuer gleich, mit weit geöffnetem Maul auf das Schiff hinab, während die Motoren und Zahnräder des Hubwerks ihr Geheul ertönen lassen. Drunten angekommen, schließen sich die Kinnbacken mit ungeheurer Gewalt und dröhnendem Knirschen zusammen, alles zermalmend, was zwischen die harten Kiefer gerät. Nach wenigen Augenblicken steigt das Ungeheuer gesättigt wieder empor, da es ein paar hundert Kilogramm seines Nahrungsstoffs eingeschlungen hat, schwebt ruhig an der landeinwärtsfahrenden Katze oder dem sich drehenden Ausleger durch die Luft, um dann die Beute wieder auszuspeien — was nun allerdings nicht mehr zu dem Bild des gefräßigen Ungeheuers paßt.



128. Hulett-Krane beim Entladen eines Schiffes



129. Offener Greifer eines Hulett-Krans im Schiffsrumpf
Der Greifer vermag eine Ladung von 10 000 bis 15 000 Kilogramm zu fassen

130. Kranhaken mit Lade-Elektromagnet für Eisenschrott
Bauart Demag, Duisburg

Die Selbstgreifer bestehen größtenteils aus zwei viertelkreisförmigen Schaufeln, die zumeist mit Hilfe eines besonderen, neben dem Hubseil herlaufenden Entleerseils in jeder beliebigen Stellung geöffnet und geschlossen werden können (Bild 125, 126). Wenn der geöffnete Greifer sich mit den scharfen Schaufelkanten auf das zu fördernde Gut aufgesetzt hat, wird das Hubseil angezogen. Es ist an den Greiferauslegern, welche die Drehung der Schaufeln bewirken, zu einem Flaschenzug ausgebildet, so daß die Schließkraft um ein Mehrfaches vergrößert ist. Die Schaufeln graben sich nun, ohne daß der Greifer angehoben wird, durch das Gewicht der gesamten Vorrichtung in das Fördergut ein und raffen einen Teil davon auf, bis die Schaufelränder aneinanderstoßen. Dann steigt der Greifer durch Anziehen des Hubseils geschlossen empor, worauf er über die Entladungsstelle geführt wird. Wenn nunmehr das Entleerseil festgehalten, das Hubseil dagegen nachgelassen wird, dann öffnen sich die Schaufeln wieder und lassen das eingeschlossene Gut hinunterfallen. Das Spiel kann darauf von neuem beginnen.

Die gesamte Selbstgreifer-Einrichtung muß ein bestimmtes hohes Gewicht haben, damit sie beim Anziehen des Schließseils nicht gehoben wird, sondern dessen Kraft auf die Schließ-Vorrichtung für die Schaufeln überträgt.

Es werden auch Selbstgreifer gebaut, die nicht an zwei Seilen hängen, sondern einseilige Bauart haben. Hierbei kann das Öffnen der Schaufeln nur beim Anschlagen einer Knagge gegen einen Ring geschehen, also nicht in jeder beliebigen Stellung vorgenommen werden. Einseilgreifer sind daher im Betrieb weniger schmiegsam, sie vermögen meistens nur aus großer Höhe zu schütten, was für manche Güter, wie zum Beispiel Kohle, wegen der Zertrümmerung der Einzelstücke ungünstig ist.

Man kann die Vorteile, welche die Selbstgreifer bieten, auch für sperriges Gut ausnutzen. Bild 127 zeigt eine Bauart, die sich zum Aufnehmen von Rundhölzern eignet.

Sehr weit ist man in Amerika gegangen, indem man dort gewaltige Greifer an starren Stielen angebracht hat. Sie werden hierdurch verhindert, sich zu drehen und beim Aufsetzen auf die Last zu kippen, was sie unter Seilen nur allzugern tun; es müssen dann immer noch Arbeiter im Laderaum weilen, die den Greifer richtig einstellen. Der Stiel bringt das Gefäß stets genau an die gewünschte Stelle, worauf der eingebaute Motor von 50 Pferdestärken das Schließen bewirkt (Bild 128, 129). Diese Hebezeuge, die nach ihrem ersten Erbauer Hulett-Krane genannt werden, haben nach amerikanischer Art so gewaltige Abmessungen, daß sie mit jedem Griff 10 000, in neuerer Zeit sogar 15 000 Kilogramm zu fassen vermögen, also mehr als die Ladung eines unserer Eisenbahnwagen. Der Führer steht in einer geräumigen Stube, die sich am Ende des Stiels dicht über dem Greifer befindet, so daß er alle Bewegungen genau übersehen und steuern kann.

Da der Stiel um einen wagerechten Zapfen zu schwingen vermag, kann noch der letzte Winkel des zu entladenden Schiffraums von dem Greifer erreicht werden. Das Heben wird durch das auf dem Gegenarm angebrachte Gewicht erleichtert. Der Anblick einer Reihe solcher Hulett-Krane ist sehr eigenartig; sie sehen wahrhaft aus wie ungeheure Vögel, die die Hälse neigen, um drunten Nahrung aufzupicken.

Wer in einem Martin-Stahl-Werk die gewaltigen Berge alten Eisens sieht, die auf den Höfen aufgeschüttet sind, und sich überlegt, wie die tausende scharfkantiger, ineinander verhakter, wirr gestapelter Stücke wohl zum Schmelzofen befördert werden können, muß die Lösung dieser Aufgabe für äußerst schwierig halten. An einen Kranhaken ist das Eisen wahrlich nicht zu hängen, man kann es auch nicht in Gefäße schaufeln, und ebensowenig vermag der Selbstgreifer hier erfolgreich zu arbeiten. Da aber bringt die heranfahrende Krankatze die Aufklärung. Ein dickes, rundes Eisenstück senkt sich auf den Schrottberg, und wenn es wieder aufgezogen wird, hängt, wie durch Zauberkraft festgebannt, eine große Zahl der Eisenstücke daran. Die Katze trägt sie ein Stück durch die Luft, bleibt stehen, und nun fallen die Stücke wieder von selbst mit Donnerkrachen in die drunten stehende Mulde, die zum Beschicken der Martin-Ofen dient. Es reizt unwiderstehlich zum Lachen, wenn man den Eifer sieht, mit dem die Schrottstücke sich an die Fördereinrichtung hängen, manche nach dem Anfahren der Katze noch nachzuspringen versuchen, und wie gehorsam sie alle dann bald darauf hinabspazieren.

Das Wunder wird durch den Lade-Elektromagneten vollbracht (Bild 130). Sobald er auf dem Schrottberg liegt, schaltet der Kranführer den Strom ein, und die Anziehungskraft des Magneten bewirkt das Anhaften des Eisens. Nach

dem Abschalten des Stroms müssen die Stücke natürlich sofort hinunterfallen. Mit demselben Gerät werden vorteilhaft Roheisen-Masseln gefördert; es sind das brotförmige Stücke, die durch Erstarren des aus dem Hochofen fließenden Eisens entstehen. Da das flüssige Eisen in Sandmulden erkaltet, erhält es eine unregelmäßige Oberfläche, die stachlig ist wie die Haut des Igels. Es geht nicht an, Masseln mit ungeschützten Händen zu packen. Darum ist der unempfindliche Magnet auch hier unentbehrlich.

Seine Bauart ist einfach. Wicklungen von isoliertem Kupferdraht umgeben einen eisernen Kern, der beim Stromdurchfluß magnetisch werden muß. Durch geeignete Bauart der Spulen ist es möglich, auch glühendes Eisen mit dem Magneten zu fördern. Freilich darf die Wärme nicht über 400 Grad hinausgehen, da sonst doch die Isolation der geschützt gelagerten Spule zerstört werden würde. Der Betrieb in Eisenhüttenwerken wird lebhaft beschleunigt, wenn man mit dem Zuführen halbfertiger Stücke zu den weiter bearbeitenden Maschinen nicht jedesmal zu warten braucht, bis sie erkaltet sind. Nur der Magnet vermag heißes Eisen aufzugreifen.

Der Aufenthalt unter einem Kran, der einen solchen „Greifer" besitzt, ist allerdings besonders gefährlich. Denn wenn aus irgendeinem Grund während des Fördervorgangs der Strom ausbleibt, dann stürzt die Last sogleich hinab. Hierdurch wird die Verwendung der Kran-Magnete eingeschränkt. Sie dürfen niemals über solche Stellen im Werk hinüberfahren, auf denen Menschen verkehren. Sicherheitsvorkehrungen sind ersonnen worden, die aber alle den Fehler haben, daß sie den Betrieb erschweren.

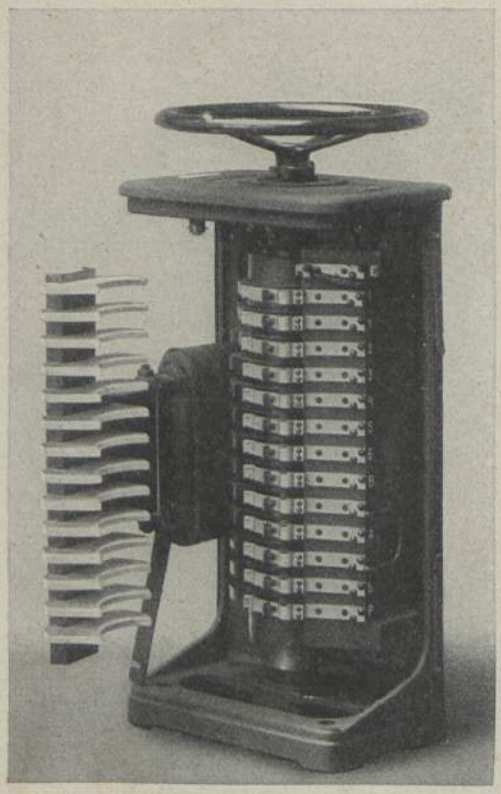
Wir werden an die Elektro-Hängebahn erinnert, wenn wir das auf Bild 131 dargestellte elektrische Hebezeug betrachten. Es ist ein kleiner Kran, der ebensogut auf einer Doppelkopfschiene fahren könnte wie hier auf dem Unterflansch eines Trägers. So bescheiden die Abmessungen des Geräts sind, ist es doch imstande, 800 Kilogramm zu heben und den Führer auf seinem Weg mitzunehmen.

Dieser Klein-Kran soll veranschaulichen, wie einfach die Maschinen zum Lastenheben gestaltet werden können, seit die Elektrizität hierfür dienstbar gemacht worden ist. Es leuchtet ohne weiteres ein, daß gleich kräftige Hebezeuge mit Dampf- oder Druckwasser-Betrieb sehr viel gewaltigere Abmessungen haben und ihre Freizügigkeit zum größten Teil einbüßen müßten. Die ausgezeichneten Leistungen der neuzeitlichen, fahrbaren Krane sind, wie schon einmal erwähnt wurde, eben erst seit Einführung des elektrischen Betriebs im Bereich der Hebezeuge möglich geworden.

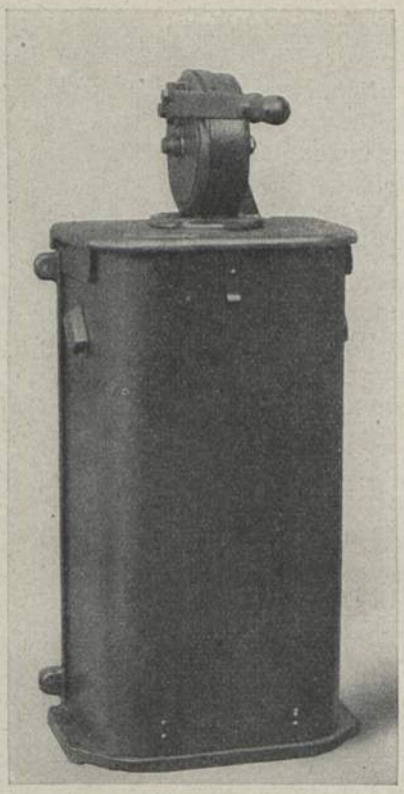
Die Einfachheit, Zuverlässigkeit und Wetterbeständigkeit der elektrischen Leitung, der Wegfall jeglicher Unterhaltungskosten für die unbeweglich daliegenden Drähte, die Möglichkeit, den Strom in einfacher Weise den fahrbaren Maschinen zuführen zu können, die leichte Teilbarkeit der elektrischen Energie für den Antrieb von Motoren verschiedener Leistung und Drehzahl sowie das geringe Gewicht der Maschinen kennzeichnen die Überlegenheit der jetzt allgemein angewendeten Antriebart. Hinzu kommt, daß der Elektromotor, der sich in seinem Energieverbrauch selbsttätig stets der jeweiligen Last anpaßt, bei allen Beanspruchungen wirtschaftlich arbeitet. Verluste während der Betriebspausen, wie sie zum Beispiel beim Dampfbetrieb unvermeidlich sind, treten nicht ein. Die Bedienung der Maschinen ist so bequem und sicher wie möglich. Die feine Regelbarkeit der Motoren gestattet ein haargenaues Steuern. Die Einstellung der verschiedenen Schnelligkeiten beim Heben und Senken, die Regelung der Fahrgeschwindigkeit für die Katze und endlich das genaue Anhalten lassen sich bei keiner andern Antriebart so vollkommen erreichen. Eine Reihe von Aufgaben des neuzeitlichen Kranbetriebs konnte nur auf diese Weise gelöst werden.

131. Elektrisches Hebezeug mit Führerhaus

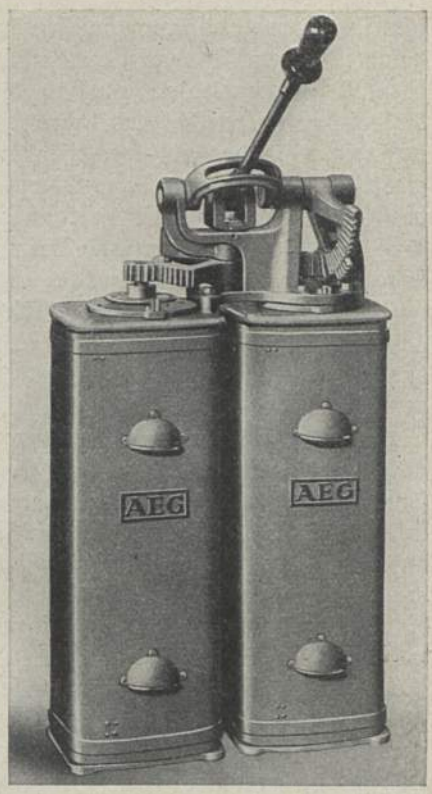
Der Elektromotor wurde zum erstenmal im Jahr 1880 für ein Hebezeug benutzt. Es war dies ein Personen-Aufzug, dessen Bauart wir bei Besprechung der Fahrstühle näher betrachten werden. Der erste elektrische Kran wurde im Jahr 1885 in einer Werkstatt der Helios-Elektrizitäts-Gesellschaft zu Köln aufgestellt. Die Erfolge waren im Anfang, wie immer bei der ersten Verwirklichung eines großen neuen Gedankens, nicht überwältigend. Man mußte erst einsehen lernen, daß der Kranbetrieb besondere Anforderungen an die elektrischen Maschinen und Apparate stellte. Nachdem man sich zunächst der für Straßenbahnen gebauten Maschinen bedient hatte, weil dort die Beanspruchungen ähnlicher Art sind, ging man zu Sonderbauarten über, die nach mancherlei Fehlschlägen zu den vollendeten Durchbildungen der heutigen Zeit führten. Notwendig war insbesondere, daß die Motoren das häufige Stillsetzen und Wiederanfahren aushielten, daß die Steuerapparate kräftig genug gebaut wurden,



132a. Steuerapparat für Kran-Motoren mit Lenkrad
AEG, Berlin



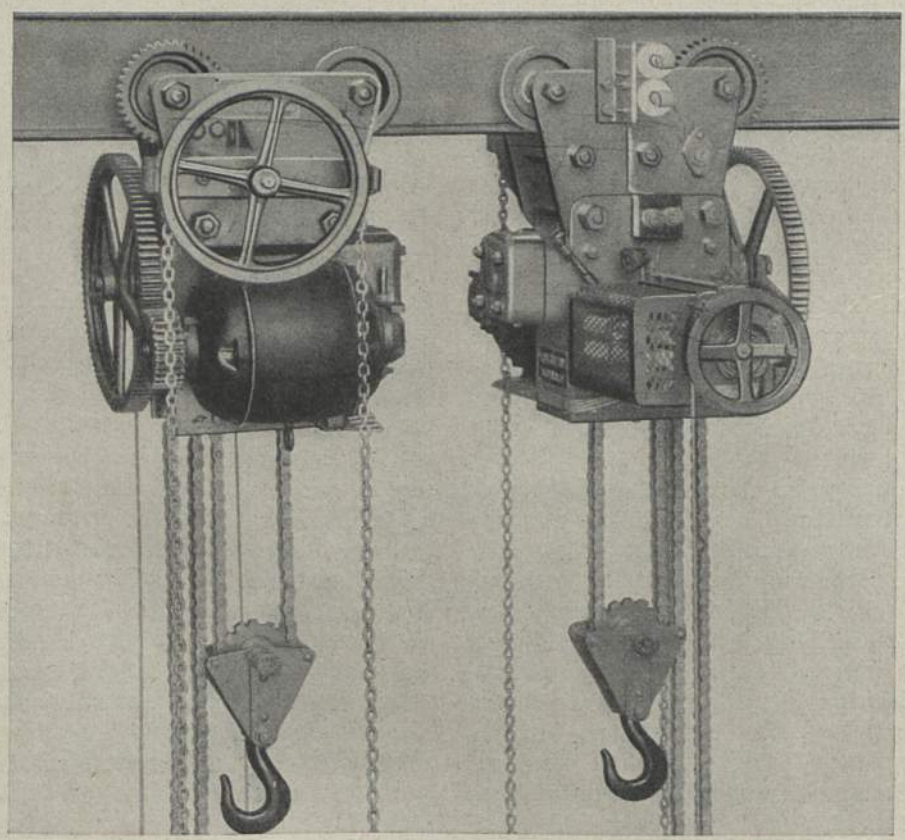
132b. Steuerapparat für Kran-Motoren mit Steuerhebel
AEG, Berlin




132c. Steuerapparat für Katzenfahren und Hubwerk
AEG, Berlin

um das häufige Ausschalten unter vollem Strom zu ertragen. Man leitete im Anfang die drei verschiedenen Antriebe, die Energie also für das Verfahren des Krangerüsts, den Antrieb der Laufkatze und die Bewegung des Hubwerks von Einem Motor ab, indem man ihn wechselnd mit drei verschiedenen Getrieben mechanisch kuppelte. Heute besitzen alle fahrbaren Krane drei Motoren, von denen jeder ständig einen der drei Antriebe versorgt. Diese in der Anschaffung kostspielige, im Betrieb aber sparsam wirkende Teilung hat sehr viel zur Erringung des endgültigen Sieges beigetragen.

Die Steuerung der Kran-Motoren geschieht durch Schaltwalzen, wie wir sie beim Fahrschalter der Straßenbahn kennengelernt haben (Bild 132a und b). Der Bau ist jedoch hier einfacher, da es sich bei den Hebezeugen immer nur um Regelung innerhalb der gleichen Spannung handelt. Für jeden der Motoren genügt eine drehbare Walze nebst den zugehörigen Kontaktfingern. Die magnetische Funkenlöschung und der schützende Asbestfächer (Band II, Seite 467) sind gleichfalls angebracht. Die Bewegung der Steuerwalze erfolgt entweder durch ein wagerecht angebrachtes Handrad oder mit Hilfe eines drehbaren Hebels.



133. Elektrisches Hebezeug für 1000 Kilogramm
Diese Laufkatze wird mittels einer Haspel von Hand in Bewegung gesetzt und ist imstande, mit einem Elektromotor von 1¼ PS 1000 Kilogramm in 100 Sekunden 5 Meter hoch zu heben. Siemens-Schuckert-Werke, Berlin

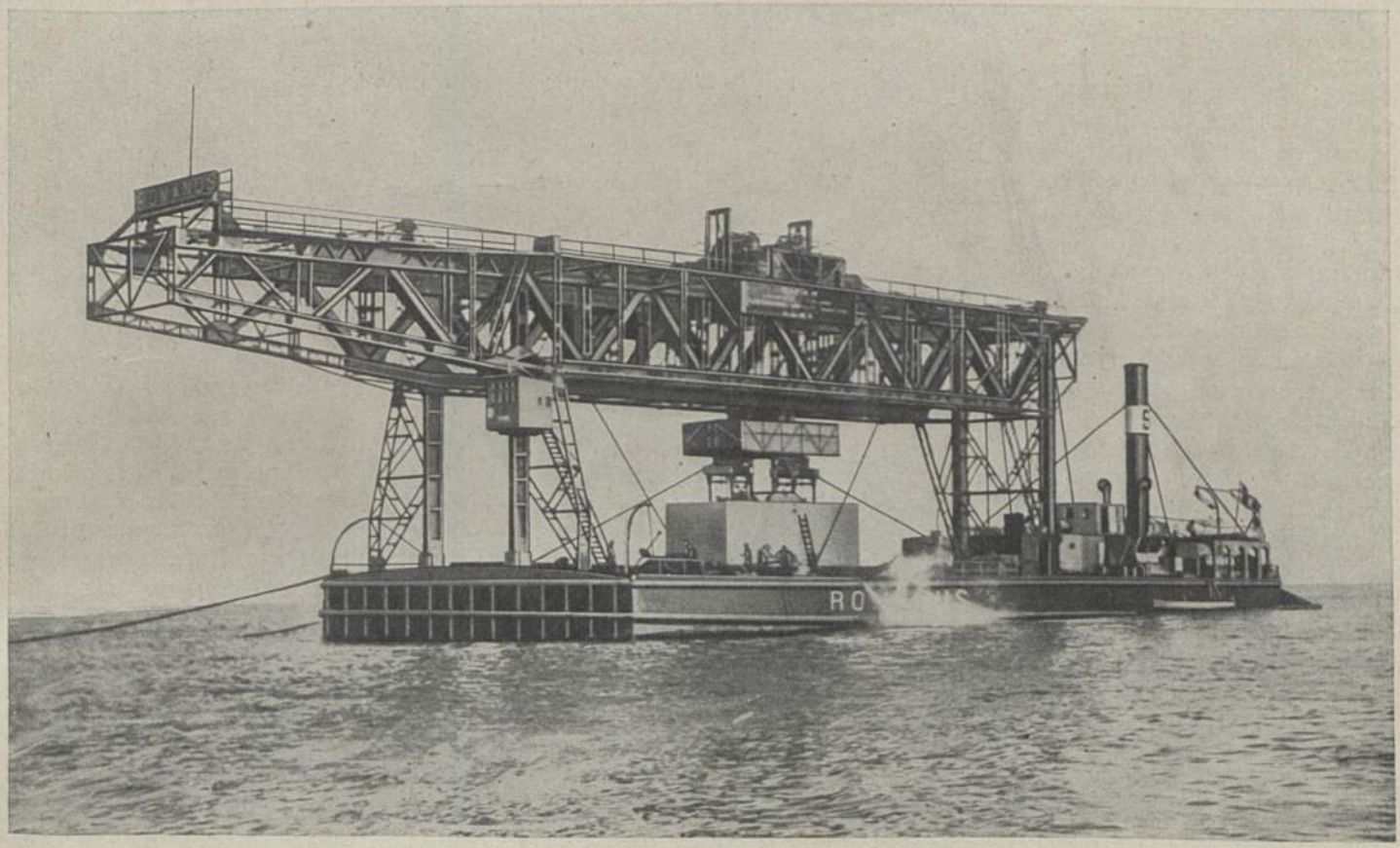
Ungemein bequem ist die Vereinigung der Steuer-Einrichtung für Katzenfahren und Hubwerk in Einem zusammengesetzten Apparat (Bild 132c). Es ist dann nur Ein Hebel zum Hervorrufen beider Bewegungen vorhanden; er kann

sowohl in der wagerechten wie in der senkrechten Ebene bewegt werden. Durch Übertragungen mittels Stangen und Zahnkränze wird bewirkt, daß Verschiebung des Hebels in der Wagerechten den Katzen-Motor beeinflußt, Heben und Senken aber das Hubwerk betätigt. Schiebt der Führer den Steuerhebel nach rechts, so fährt die Katze nach rechts, beim Hinüberdrücken nach links folgt die Katze dieser Richtung. Anheben des Steuerhebels bedeutet auch Heben der Last, Niederdrücken ein Absinken der Hubvorrichtung. Auf diese Weise hat der Führer das Gefühl, daß er mit seiner Hand unmittelbar die Last bewege; sie verändert ihre Stellung im Raum genau nach den Bewegungen, die er am Steuerapparat vollführt. Das Katzenfahren kann auch gleichzeitig mit dem Heben und Senken stattfinden; der Führer braucht zu diesem Zweck den Hebelgriff nur in schräger Linie zu bewegen.

Diese äußerliche Vereinfachung der Steuerung ist nur dadurch zu erreichen, daß der elektrische Kranantrieb den Einbau einer großen Zahl von Sicherheits-Einrichtungen gestattet. Selbsttätige Endausschalter hindern die Katze daran, ihren Bereich zu überschreiten, indem sie den Strom so rechtzeitig abschalten, daß der schwere Wagen schadlos auslaufen kann. Die Senkgeschwindigkeit wird ebenfalls selbsttätig begrenzt, oder es wird ein Fliehkraftschalter eingefügt, der bei zu hoher Umdrehungszahl eine Klingel im Führerhaus ertönen läßt. Selbsttätige Ausschalter sorgen wie bei der Straßenbahn dafür, daß die Maschinen nicht durch zu rasches Schalten beschädigt werden. Sie verhindern auch die Beanspruchung des Krans durch eine zu schwere Last, da sie unter dem Einfluß der dann auftretenden zu hohen Stromstärke gleichfalls ansprechen. Daß auf solche Art eine große Reihe von Unfallquellen im Kranbetrieb verstopft wird, leuchtet ohne weiteres ein.

Überwältigend groß fast ist die Zahl der stetigen und unstetigen Förderer, die wir nun bereits kennengelernt haben. Man sollte meinen, daß die eisernen Helfer imstande sind, allen Bedürfnissen der Menschheit zu genügen. Das ist aber keineswegs der Fall. Immer noch gibt es zahlreiche Bezirke, in denen der Mensch Lastenknecht ist, wo er es noch nicht verstanden hat, die Schwergewichte dem seelenlosen Arbeiter aufzubürden. Kammerer gibt folgenden Hinweis:

„Noch werden alle Lastkraftwagen von Hand beladen und entladen, obgleich sich die Maschine des Wagens sehr gut dafür verwenden ließe. Noch immer wird nur ein winziger Bruchteil der Eisenbahnwagen mit Maschinenkraft gefüllt und entleert, obwohl elektrischer Strom überall verfügbar ist. Noch werden bei Umzügen alle Hausgeräte von Hand die Treppen herunter- und wieder hinaufgeschleppt. Noch wird auf allen Bahnhöfen das Gepäck auf Rollwagen mitten durch den Strom der Fahrgäste hindurchgezerrt, obwohl über dem Zug reichlich Raum frei ist. Wohin man blickt, auf die Straße, auf Fabrikhöfe, auf Bauplätze, auf Bahnhöfe: überall sieht man Lasten von Hand schleppen und tragen. Alle diese Handlangerarbeit durch Maschinenarbeit zu ersetzen, und zwar mit einem Aufwand von weniger als 10 Tonnen Eisen für einen ersparten Handlanger: das ist die Zukunftsaufgabe des Förder-Ingenieurs."



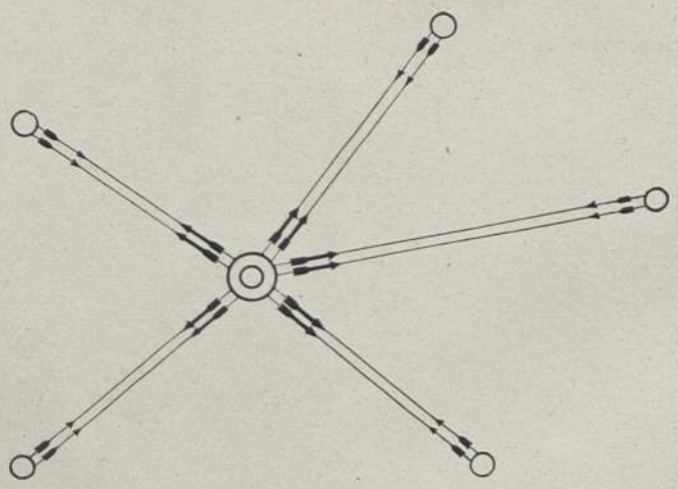
134. Blockschwimmkran für Hafenbauarbeiten

Der Kran besitzt eine Tragfähigkeit von 400 000 Kilogramm und dient in der Hauptsache zum Versenken von Betonblöcken bei Hafenbauten. Der Prahm, worauf der Kran ruht, vermag drei Blöcke von 10 Meter Länge, 5 Meter Breite und 4,6 Meter Höhe im Gewichte von je 380 000 Kilogramm zu tragen. Auf unserem Bilde ist die Laufkatze eben im Begriff, einen solchen Block aufzunehmen. Erbaut von der Demag, Duisburg

# 24. Rohr- und Seilpost

Es gibt Lasten, die äußerst geringes Gewicht haben und doch von schwerstwiegender Bedeutung sind.

Tagtäglich entströmen unzähligen Telegraphenämtern auf der Erde Blätter, auf denen Nachrichten niedergeschrieben sind. Die Mitteilungen kommen von weither und bringen Freude oder Leid, Aufregung oder Beruhigung in die Häuser der Empfänger. Die Anwendung der Elektrizität bewirkt, daß die Übermittlung der Nachrichten von einer menschlichen Siedlung zur andern fast ohne Zeitverlust vor sich geht. In kleinen Orten besteht auch keine Schwierigkeit, die Telegramme, die durch das Niederschreiben auf Papier aus den unstofflichen elektrischen Schwingungen in Stoff verwandelt sind, rasch zu bestellen. In den ganz großen Städten aber kommen in jeder Minute so viele telegraphische Mitteilungen an, daß die Formblätter, auf denen sie niedergeschrieben werden, sich im wahren Sinn des Worts zu Bergen häufen. Dabei ist es in jeder Stadt immer nur ein einziges Haus, in dem alle Fernleitungen enden: das Haupt-Telegraphenamt. Nur von dieser einzigen Stelle aus kann das Abtragen des Bergs vorgenommen werden.



135. Schema einer Rohrpostanlage mit strahlenförmigem Netz

Das Haupt-Telegraphenamt liegt im Mittelpunkt der Großstadt. Die Telegramm-Empfänger wohnen bald in unmittelbarer Nähe, bald in einem viele Kilometer weit entfernten Viertel. Überall in der Stadt verstreut liegen zwar Postämter, die mit dem Haupt-Telegraphenamt in drahtlicher Verbindung stehen; es würde jedoch eine sehr erhebliche Verzögerung der Nachrichtenbeförderung bedeuten, wollte man mit Hilfe dieser örtlichen Drahtleitungen die Unzahl der aus der Ferne einströmenden telegraphischen Mitteilungen zu den Stadtteilen senden. Müßte doch zu diesem Zweck der Inhalt jeder einzelnen Depesche wieder Buchstabe für Buchstabe übertragen werden.

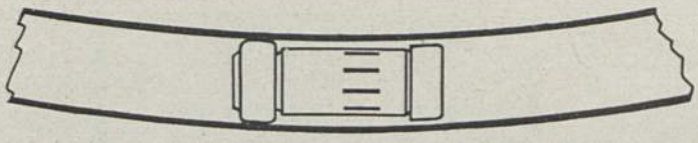
Da greift nun helfend eine Förderanlage ein, die mit kräftigeren Aufnahme-Werkzeugen ausgerüstet ist als der Telegraph; sie vermag die ganze Depesche, ja sogar eine Vielzahl davon, auf einmal zu packen. Die Geschwindigkeit, mit der diese Einrichtung arbeitet, ist unendlich viel geringer als die Schnelligkeit des elektrischen Funkens, die Möglichkeit der Massenförderung aber, die sie gewährt, macht sie geeigneter zur Abtragung des Blätterbergs, als es der sonst weit überlegene Telegraph ist. Federleicht wiegt die Einzellast, die der Förderanlage aufgebürdet wird, jedoch das innere Schwergewicht der fortzuschaffenden Gegenstände und die Massenhaftigkeit, in der sie auftreten, erzwingen die Schaffung eines sorgfältig ausgebildeten und mit recht erheblichem Kraftaufwand arbeitenden Förderbetriebs.

Es gibt auf der Erde etwa sechzig Großstädte, die eine Rohrpost besitzen. Im Bezirk der deutschen Reichspost sind acht Städte mit dieser Einrichtung versehen: Berlin, Hamburg, München, Köln, Frankfurt a. M., Leipzig, Düsseldorf und Bremen. Überall in Deutschland wird die Rohrpost nur im inneren Postverkehr, nämlich ausschließlich zur Verteilung der Telegramme über das Stadtgebiet, benutzt. Nur in Berlin und München dient sie auch der Öffentlichkeit, indem sie besonders geschwind Briefe und Postkarten befördert.

Es ist eine Eigentümlichkeit der Rohrpost, daß sie nur über kurze Strecken nützlich zu arbeiten vermag. In ihrer heutigen Art wird sie niemals fähig sein, Fernstrecken zu überwinden. Das Gebiet einer Großstadt schließt schon die Grenze ihrer Wirkungsfähigkeit in sich. Denn die Erzeugung der fördernden Kraft ist an einen feststehenden Ort gebunden, und die Kraft wird schon durch sehr geringe Wegstrecken, die sie fördernd durcheilen muß, arg geschwächt, im Gegensatz zur elektrischen Energie, die meist ebenfalls zentral hervorgebracht wird, aber in ihrer Leistungsfähigkeit durch die Fortleitung vergleichsweise nur sehr wenig absinkt.

Vorbild der Rohrpost ist das Blasrohr, das wilde Völkerschaften noch heute als Waffe benutzen, indem sie leichte Pfeile hinausblasen. Gepreßte Luft, die in ein enges

Rohr hineingeschickt wird, hat den Trieb, vorwärts zu eilen, wobei sie leichte Gegenstände, die ihr den Weg versperren, durch Reibung mitnimmt. Ruft man vor dem sperrenden Gegenstand eine Luftverdünnung hervor, so wird die dahinterliegende Luftsäule von Atmosphärendruck zur Druckluft und wirkt wiederum treibend. Die neuzeitliche Rohrpost arbeitet teils mit Preß-, teils mit Dünnluft.



136. Der Krümmungshalbmesser des Fahrrohrs wird durch die Büchsenlänge bestimmt

Als der Fernsprecher aufkam, glaubte man, daß für die Rohrpostanlagen das letzte Stündlein geschlagen habe. Denn dieser neuere elektrische Apparat zur Nachrichten-Übermittlung ist ja gerade für den Stadt- und Hausverkehr besonders geeignet. Die Rohrpost besitzt aber so viele Vorzüge, daß sie doch am Leben geblieben ist, ja sich gerade in den letzten Jahrzehnten besonders kräftig entfaltet hat. Und das geschah, obgleich der Rohrpostbetrieb sehr wenig schmiegsam ist. Er gestattet ununterbrochenen Verkehr immer nur zwischen zwei Stellen. Sobald über einen Empfangsort hinaus zu einem weiteren gefördert werden muß, ist jedesmal ein Umladen von Hand notwendig. Das führte zur Ausbildung der Rohrpostnetze in einer Form, die der Anlage von Fernsprechnetzen sehr ähnlich ist.

Die Leitungen werden in Form von Strahlen geführt, die sämtlich in einem Mittelpunkt zusammenlaufen; von diesem Vereinigungspunkt geht die größte Zahl der Sendungen ab, hierhin streben die meisten von ihnen (Bild 135). Unmittelbarer Verkehr zwischen Einzelstellen, die nicht auf demselben Strahl liegen, ist seltener. Wo er dennoch vorkommt, muß meist auf die Verbindung über die kürzeste Linie verzichtet, der Umweg über den Netzmittelpunkt gemacht werden. Nur ganz besonders lebhafter Verkehr zwischen zwei Außenstellen rechtfertigt den Bau einer Nebenlinie. Die spätere Betrachtung der Berliner Rohrpostanlage wird uns die Netzgestaltung nach diesen Grundsätzen deutlich vor Augen führen.

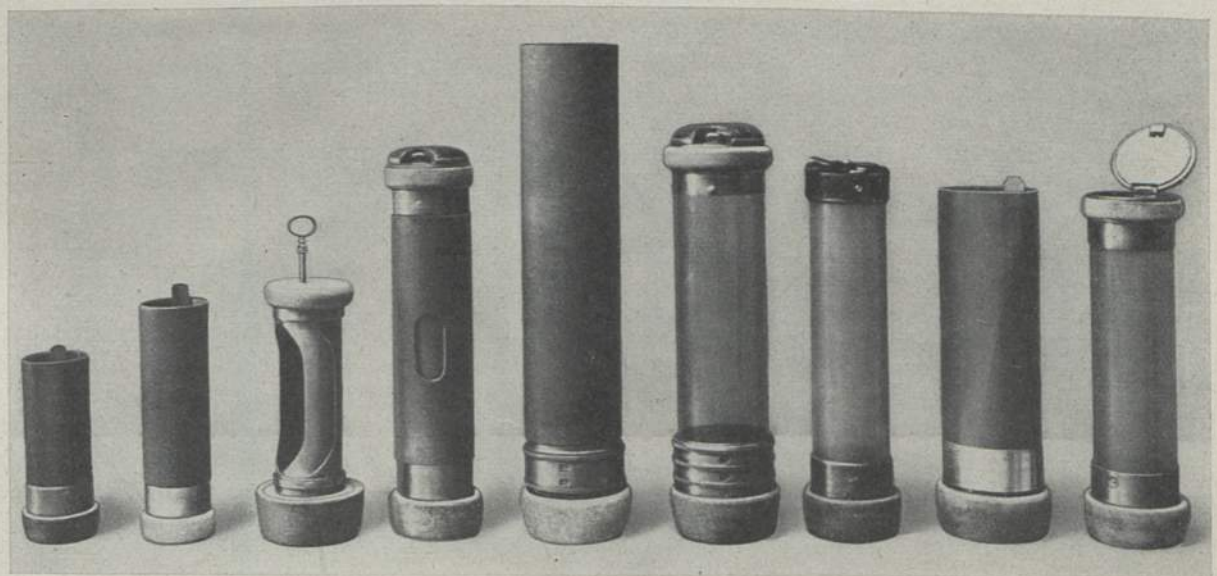
Das Grundelement der Rohrpost ist das luftdicht abgeschlossene Rohr. Mit wenigen Ausnahmen hat es kreisförmigen Querschnitt und wird aus Schmiedeisen hergestellt. Der lichte Durchmesser der deutschen Amtsleitungen ist 65 Millimeter. Von Sonderfällen abgesehen, haben die zu fördernden Gegenstände geringe Länge. Es ist deshalb möglich, den Rohren Krümmungen sowohl in der wagerechten wie in der senkrechten Ebene zu geben. Der kleine Halbmesser dieser Biegung muß jedoch so gewählt sein, daß die Büchsen (Bild 136), die allermeist als Fördergefäße verwendet werden, überall hindurch können, ohne geknickt zu werden.

Die Rohre werden unmittelbar in die Erde gebettet, selten in gemauerten Kanälen verlegt, da Ausbesserungsarbeiten kaum jemals vorgenommen zu werden brauchen. Es ist jedoch notwendig, so tief unter die Straßenoberfläche hinabzugehen, daß die Stränge bereits in frostfreiem Erdreich liegen. Denn das Rohrinnere enthält oft Wasser, das keinesfalls zu Eis werden darf. Feuchtigkeit ist überhaupt der größte Feind des Rohrpostbetriebs. Wie sie in die Rohre hineingelangt, wird uns sogleich klarwerden. In Berlin beträgt die gegen Einfrieren sichernde Bettungstiefe ein Meter.

Jeder zu fördernde Gegenstand muß luftdicht eingesetzt werden, das heißt, wenigstens mit einem Teil seines Querschnitts die ganze Rohrweite ausfüllen. Man versieht daher jede Büchse oder jede in geschlossenem Zug fahrende Büchsenreihe mit einem Stulp aus Filz oder Leder. Wird alsdann hinter der Büchse ein Ventil geöffnet, das Druckluft einströmen läßt, so gleitet die Büchse vorwärts. Das gleiche geschieht, wenn vor der Büchse eine Luftverdünnung hervorgerufen wird. Es ist eigentlich nicht richtig, zu sagen, daß in diesem Fall ein Vorwärtssaugen stattfindet. In Wirklichkeit ist es die hinter der Büchse liegende Säule atmosphärischer Luft, die infolge ihres Überdrucks nunmehr gleichfalls treibend wirkt. Doch ist der Ausdruck Saugluft in der Technik gebräuchlich.

Die Druckluft erwärmt sich bei ihrer Erzeugung im Zylinder der Preßpumpe ziemlich stark. In diesem Zustand nimmt sie besonders viel Feuchtigkeit aus der Atmosphäre auf. Gelangt die Preßluft nun in eines der kalten Fahrrohre, so scheidet sie Wasser in einem feinen Hauch ab, der

137. Treiber



138. Verschiedene Büchsenformen mit und ohne Verschluß
Die dritte Büchse von links trägt ein Sicherheitsschloß. E. Zwietusch & Co., Charlottenburg

sich an den Rohrwandungen niederschlägt. Ohne frostfreie Bettung wäre die äußerst störende Vereisung im Winter unvermeidlich. Aber auch in nicht gefrorenem Zustand ist das Wasser unangenehm genug, da es die Büchsenabdichtungen angreift und an tiefen Stellen hemmende Ansammlungen bildet. Man hilft sich ein wenig dadurch, daß man die Rohrkrümmungen an den tiefsten Punkten durchbohrt und geschlossene Behälter daruntersetzt, in die das Wasser hineinströmen kann.

Besser ist es jedoch, es gänzlich von den Rohren fernzuhalten. Zu diesem Zweck kühlt man die Druckluft vor ihrem Eintritt in die Fahrrohre möglichst weit ab. Der Feuchtigkeitsgehalt wird dann schon vor der Benutzung sehr stark gemindert. Schlangen, durch die ständig Kühlwasser strömt, durchziehen zu diesem Zweck den Behälter, in dem die Luft vorübergehend gespeichert wird. An manchen Orten ist man sogar so weit gegangen, Kältemaschinen aufzustellen, die eine unter den Nullpunkt gekühlte Flüssigkeit durch die Behälter-Schlangen treiben. Vollständig läßt sich jedoch die Feuchtigkeit niemals entfernen, so daß dauernder Betrieb in demselben Rohr mit Druckluft nur in seltenen Fällen möglich ist.

139. Büchse der Hausrohrpost im Berliner Haupt-Telegraphenamt mit Verschluß und Nummerneinstellung

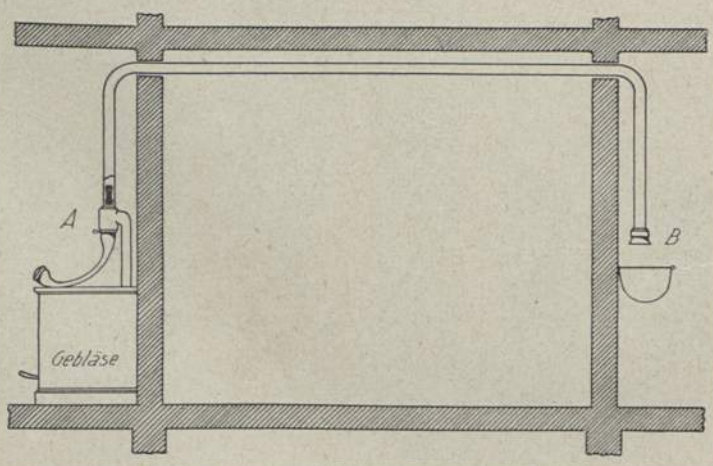
Bei den Stadt-Rohrpostanlagen wird meist der Wendebetrieb benutzt. An mehreren Stellen der Stadt sind Maschinenanlagen aufgestellt, die sowohl Preßluft wie Dünnluft erzeugen. Zum Antrieb der Gebläse dienen Dampfmaschinen, Gas- oder Dieselmotoren. Sämtliche Preßluft-Behälter sind durch besondere Rohre miteinander verbunden, und ebenso werden alle Dünnluft-Gefäße zu einer gemeinsamen Anlage zusammengeschlossen. Zu jedem Amt, das imstande sein soll, selbständig Sendungen abzuschicken, läuft sowohl ein Rohr mit gepreßter wie ein Rohr mit verdünnter Luft.

Das Netz besteht also aus zwei vollständig getrennten Anlagen, den Fahrrohren und den Luftzuführungsrohren. Die letzten dürfen natürlich sehr scharfe Krümmungen besitzen. Ohne Luftzuführung sind allein die Ämter, die an den Enden der Netzstrahlen liegen. Alle anderen Ämter besitzen mindestens zwei Apparate, einen, der an die Luftleitungen angeschlossen ist, und einen zweiten, in den allein ein Fahrrohr hineinläuft.

Soll eine Sendung abgehen, dann werden die Büchse oder die Büchsen in den Apparat mit Luftanschluß hineingetan, worauf die Einlege-Öffnung verschlossen und das Druckluft-Ventil geöffnet wird. Gleich dem Pfeil im Blasrohr gleiten die Büchsen nun davon. Die Ankunft erfolgt drüben in einem Apparat ohne Luftanschluß. Wenn das Amt, das eben empfangen hat, eine Sendung in umgekehrter Richtung schicken will, so gibt es ein telegraphisches Zeichen. Das erste Amt öffnet darauf das Dünnluft-Ventil und holt die Büchse oder den Zug zurück, indem nun die atmosphärische Luft sie ihm zutreibt. Zum dritten Amt sendet das zweite wieder mit Druckluft und holt von dort her mit Dünnluft.

Wenn eine Sendung vom Stadt-Mittelpunkt bis ans Ende eines Strahls geschickt werden soll, so muß sie auf jedem Zwischenamt von dem Apparat ohne Luftanschluß in den Apparat mit Luftanschluß umgeladen werden. Der Büchsen-Inhalt bleibt hierbei unberührt, da das Endziel jeder Büchse durch Einstellung einer Nummer gekennzeichnet ist. Bei dem Wendebetrieb wird die von der Druckluft in die Fahrrohre gebrachte Feuchtigkeit durch die Dünnluft immer wieder aufgetrocknet, da deren Wassergehalt bei der Erzeugung unter den Sättigungsgrad gesunken ist.

Ganz anders geartet ist der Betrieb der Hausrohrposten. Hier wird nicht mit fortwährend unterbrochenem Luftstrom, sondern ausschließlich mit ständig strömender Luft gearbeitet. Das eine Ende jedes Strangs ist offen, und dieser Einlaß für die atmosphärische Luft dient zugleich als Sender. Das andere Ende des Fahrrohrs an der Empfangsstelle ist durch eine bewegliche Klappe verschlossen. Das letzte Stück läuft stets senkrecht von oben nach unten. Unmittelbar über der Verschlußklappe ist in scharfem Winkel ein dünneres Luftrohr angesetzt, das zur Maschine führt. Diese erzeugt ausschließlich Dünnluft. Ständig saugt sie aus dem offenen Endsender Luft durch Fahrrohr und Luftrohr, so daß also hier das Fahrrohr auch der Luftführung dient. Sobald eine dichtschließende Büchse in den Rohrmund getan ist, wird sie durch die atmosphärische Luft vorwärtsgetrieben und fällt am Empfänger hinaus, indem sie durch ihre lebendige Kraft die Klappe aufstößt, die sich sofort hinter ihr wieder schließt. Es können beliebig viele Zwischensender angebracht werden, die jedoch gleichfalls Verschlußklappen tragen müssen. Für den Augenblick der Büchseneinführung werden die Klappen gehoben. Die so betriebenen Hausrohrposten mit ständig strömender Luft haben den Vorzug, daß sie nahezu geräuschlos arbeiten. Selbst das Ausstoßen der Büchsen aus den Empfängern läßt sich so weit abdämpfen, daß es kaum gehört wird.




140. Schema der einfachsten Rohrpostanlage mit einem Sender und einem Empfänger

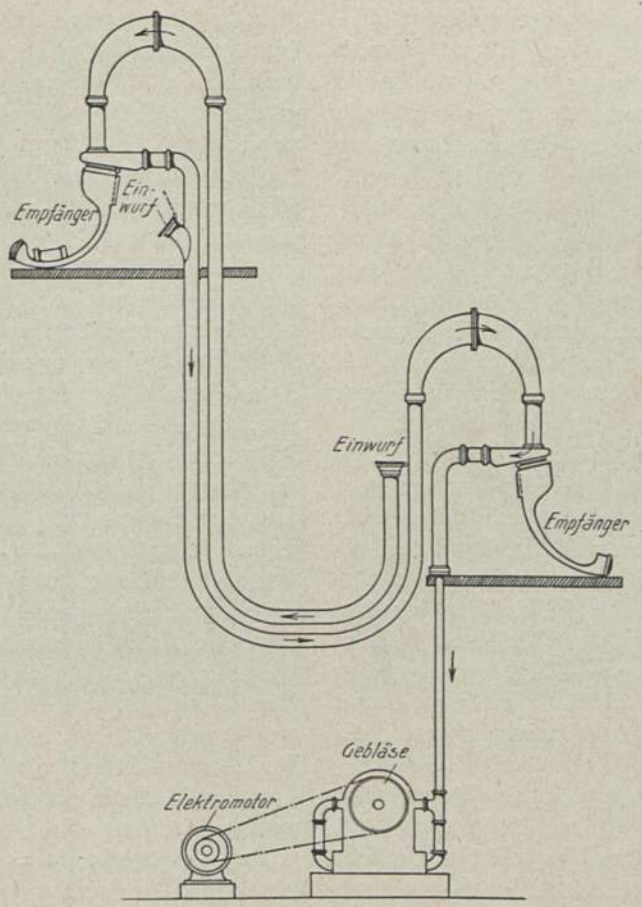
In den Betrieben mit ununterbrochen strömender Luft werden stets Einzelbüchsen verwendet. Ihre Absendung kann in jedem Augenblick geschehen, und das ist der Hauptgrund, weshalb man diese etwas teurere Betriebsart anwendet. Beim Wendebetrieb fahren Züge nach einem festen Fahrplan. Sie bestehen aus fünf bis acht Büchsen ohne Dichtungsstulpen, hinter denen ein Treiber

(Bild 137) eingesetzt wird. Es ist das ein mit Leder überzogener Holzklotz, der einen kräftigen Stulp, gleichfalls aus Leder, trägt. Der Widerstand, den jede Büchse der fördernden Luft entgegensetzt, ist bei der Zusammenfassung in Züge geringer, da ja in jedem Zug nur ein einziger reibender Stulp läuft.

Die Fördergeschwindigkeit beträgt in Haus-Rohrpostanlagen ungefähr 25 Kilometer in der Stunde, in Stadtnetzen wächst sie auf 40 bis 50 Kilometer an, steht also der Fahrgeschwindigkeit von Stadtschnellbahnen kaum nach. Die Reisegeschwindigkeit auf der Rohrpost aber ist trotzdem sehr viel geringer, da das fortwährende Umladen sehr lange Aufenthalte verursacht. Die Fahrpläne sind so eingerichtet, daß jede ankommende Büchse sogleich Anschluß zur Weiterfahrt findet.

Die Behälter, in denen Blätter, Briefe oder Karten befördert werden, sind möglichst leicht gehalten, müssen aber doch fest sein, damit der oft mit roher Gewalt hineingepreßte Inhalt während der Beförderung nicht hinausfällt. Die Büchsen bestehen aus Stahlblech, Messingblech, Aluminium oder Hartpapier. Der äußere Durchmesser muß stets beträchtlich kleiner sein als der lichte Durchmesser der Fahrrohre, damit nur die Dichtung anliegt und keine unnötige Reibung durch andere schleifende Teile entsteht. Wie Bild 138 zeigt, wechselt die Größe der Behälter sehr stark nach der Art der zu befördernden Sendungen.

Zum Festhalten der Einlagen genügen oft federnde Stahlbänder in deckellosen Büchsen. Die Hausrohrpost des Berliner Haupt-Telegraphenamts, die also nur durch die Amtsräume läuft und nicht hinausgeht, verwendet einen Verschluß (Bild 139), der gegen das Aufgehen im Rohr unbedingt gesichert ist. Das Drehgelenk sitzt sehr tief an der Büchsenwand, ein am Knickpunkt angebrachter Lederstreifen berührt schon beim geringsten Abklappen die Rohrwand, so daß weiteres Öffnen unmöglich wird. Zur Beförderung von Geheimsendungen oder von Geldbeträgen nimmt man Büchsen, die mit Sicherheitsschlössern versehen sind. Wenn die Gefäßwand nicht aus durchsichtigem Stoff gefertigt ist, werden Ausschnitte darin angebracht, damit man leicht feststellen kann, ob nicht beim Leeren ein Blatt zurückgeblieben ist.



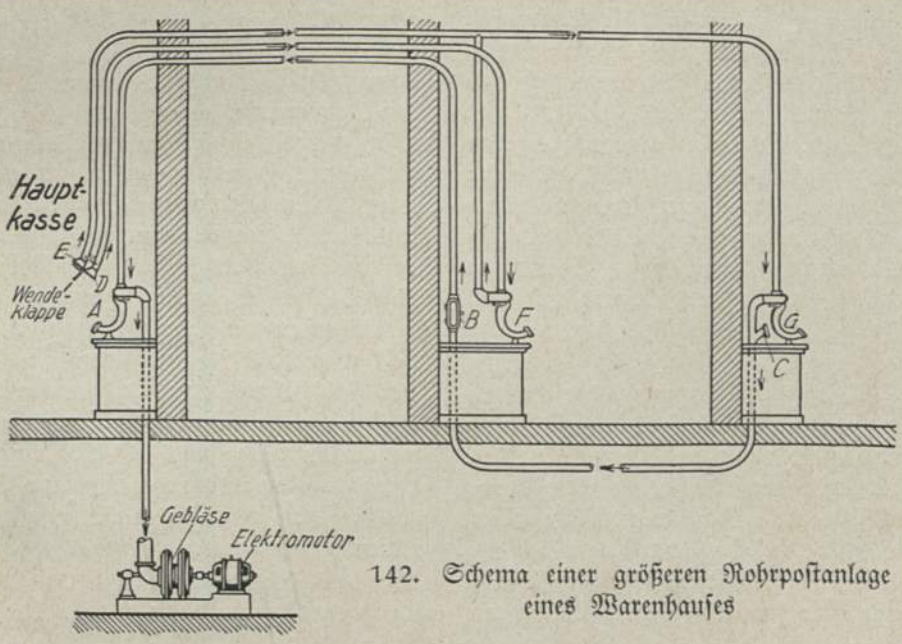

141. Schema einer Rohrpostanlage für dauernden Wechselverkehr mit zwei selbständigen Sende- und Empfangsstationen

Die Büchse der Hausrohrpost im Berliner Haupt-Telegraphenamt zeigt auch eine Vorrichtung zur Kennzeichnung des Fahrziels. Ein drehbarer Ring trägt einen Pfeil, der vor dem Absenden auf die Zielnummer gestellt wird. Alle zu diesem Zweck angebrachten Vorrichtungen müssen derart gebaut sein, daß kein Einzelteil weit hervorragt, so daß er abbrechen und im Rohr liegenbleiben könnte. Jeder einzelnen Büchse wird ihre feste Heimatnummer aufgeprägt, damit sie immer wieder zu der Stelle zurückgeschickt wird, von der sie ausgegangen ist. Diese Einrichtung wirkt in gleicher Weise ordnend auf den Betrieb wie die Zuteilung jedes Eisenbahnwagens für Personen-Beförderung an einen bestimmten Heimat-Bahnhof, wovon wir in Band II auf Seite 257 gehört haben.

*

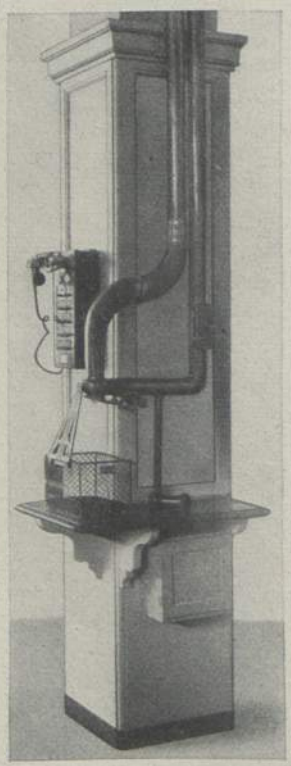
Nach diesen allgemeinen Erörterungen betrachten wir eine Reihe praktisch ausgeführter Rohrpostanlagen, um uns, vom Einfachsten zum Verwickelteren aufsteigend, mit der Betriebsführung näher bekanntzumachen.

Die bescheidenste aller Rohrpost-Anlagen stellt Bild 140 dar. Es gibt hier nur Eine Sende- und Eine Empfangsstelle. Die Betriebsluft wird auf einer Seite durch ein Gebläse mit Fußantrieb erzeugt. Derartige Anlagen sind für Entfernungen bis zu 40 Meter ausführbar, wenn die beiden Stellen im gleichen Stockwerk liegen. Soll eine Büchse von A nach B gesendet werden, so wird sie in den senkrechten Teil des Fahrrohrs eingeführt und die dort befindliche Abschlußklappe verriegelt. Der darunter sich anschließende Krümmer ist eine offene Rinne von der Art, wie sie auf Bild 145 mehrfach dargestellt ist. Sobald das Gebläse betätigt wird, tritt bei A aus dem Luftrohr Druckluft in das Fahrrohr und treibt die Büchse nach B, wo




142. Schema einer größeren Rohrpostanlage eines Warenhauses

sie aus dem offenen Rohr in den Empfangskorb fällt. Will man eine Sendung von B nach A fördern, so wird die Büchse wiederum in das Fahrrohr eingeführt, wo sie durch eine leichte Feder festgehalten wird. Auf ein Klingelzeichen löst A die Verriegelung seiner Fahrrohr-Klappe und schaltet durch diesen Griff das Gebläse gleichzeitig so um, daß es jetzt Dünnluft erzeugt. Die Büchse wird also zurückgetrieben, stößt die Verschlußklappe des Fahrrohrs bei A auf und landet in der gekrümmten Rinne, aus der sie ohne weiteres entnommen werden kann. Die Vorrichtung wird unter anderem in großen Gastwirtschaften zur Beförderung der Gutscheine vom Schenktisch zur Küche benutzt, in größeren Hotels zum Übermitteln der Zimmerschlüssel vom Pförtner zu den Stockwerken und zurück.



143. Empfänger mit Zwischensender der Rohrpostanlage eines Warenhauses
E. Zwietusch & Co., Charlottenburg

Sollen beide Stellen in der Lage sein, selbständig zu senden, dann stellt man hüben und drüben je ein Gebläse auf. Die Betriebsart ergibt sich aus dem vorher Gesagten von selbst. Vor der Absendung jeder Büchse muß natürlich eine Verständigung zwischen beiden Stellen stattfinden, damit nicht ein Zusammenstoß im Rohr erfolgt.

Überall dort, wo stündlich eine große Zahl von Sendungen durch die Rohrpost zu befördern ist, sieht man von der Lufterzeugung durch Menschenkraft ab und wendet rein mechanischen Betrieb an. Wir wissen schon, daß der größte Teil der Haus-Rohrpostanlagen mit ständig strömender Saugluft betrieben wird. Die Anordnung auf Bild 141 erlaubt dauernden Wechselverkehr. Die Einwürfe für die abzusendenden Büchsen sind je durch eine hebbare Klappe verschlossen, die Empfangsstellen mit Ausläufen in Form von Rinnen versehen. Die Pfeile zeigen an, wie die vom elektromotorisch angetriebenen Gebläse erzeugte Druckluft die Sendungen hin und her zu befördern vermag.

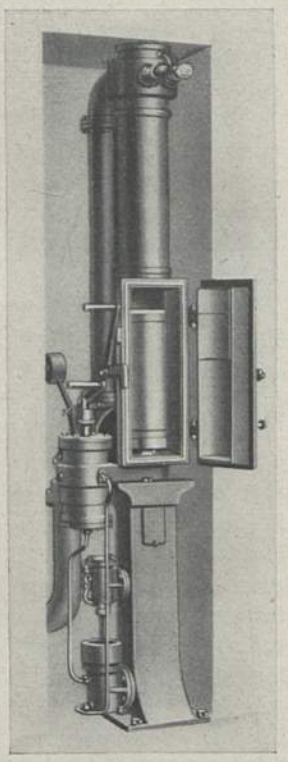
Bild 142 stellt schematisch eine etwas größere Anlage dar, die in einem Warenhaus benutzt wird. Dort sind die sonst üblichen Einzelkassen durch eine einzige Hauptkasse ersetzt. Die Käufer übergeben die Geldbeträge für die erworbenen Waren unmittelbar der Verkäuferin, die sie zusammen mit dem Rechnungszettel in eine Büchse packt und durch den nächsten Sender zur Kasse schickt. Dort wird der Zettel gestempelt und mit dem etwa herauszugebenden Geldbetrag zu dem entsprechenden Empfänger zurückgesendet.

In der Zeichnung ist A der Empfänger in der Hauptkasse, B und C Zwischensender an den Verkaufsstellen, die durch Klappen verschlossen gehalten werden. D und E stellen offene Sender der Hauptkasse dar, bei denen aber durch eine Wendeklappe dafür gesorgt ist, daß immer nur Einer offen stehen kann. F und G sind Einzelempfänger an den Verkaufsständen. Daß die von der Maschine erzeugte, ständig strömende Dünnluft auch hier jede eingeführte Büchse an ihren Bestimmungsort bringen muß, ist durch Verfolgen der Leitungen leicht zu erkennen.

Auf Bild 143 ist ein Empfänger dargestellt, in dessen unmittelbarer Nähe sich ein Zwischensender befindet. Das wagerechte Rohrstück mit seinem Knie ist ein reines Luftrohr, während die übrigen sichtbaren Rohrteile von den Büchsen befahren werden. In dem links liegenden kommen diese an und verlassen das Rohr an dem rechtwinkligen Ansatz, indem sie die Verschlußklappe aufstoßen. Sobald nach Öffnen der Senderklappe eine Büchse in das Rohr rechts gesteckt ist, wird sie von dem Luftstrom gepackt und nach oben getragen.

Bild 146 zeigt eine große Rohrpost-Hauptstelle, die mit 24 Sende- und 6 Empfangsstellen ausgerüstet ist. Die Sender sind, damit die Anlage möglichst übersichtlich wird, in die Tischplatte eingebaut. Die in den Empfängern ankommenden Büchsen fallen in einen mit schalldämpfendem Filz belegten Trog.

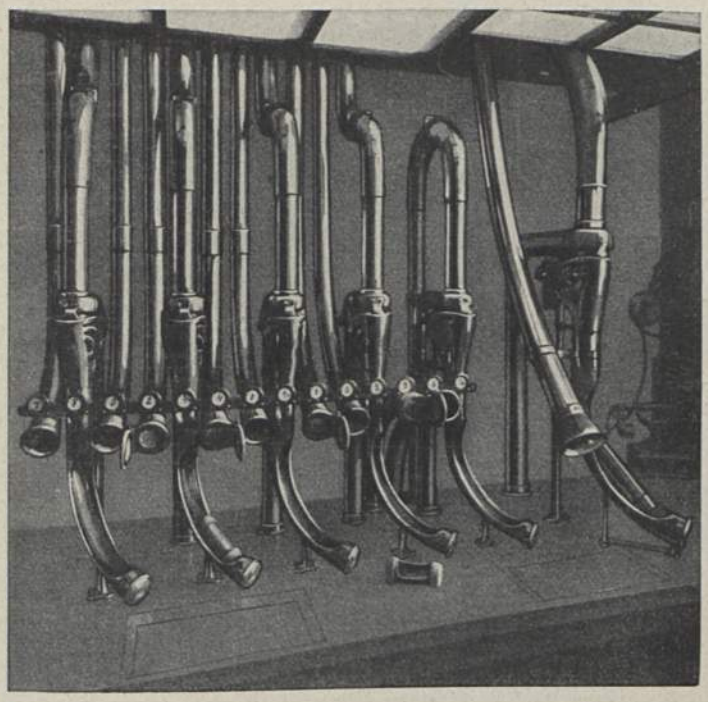
Daß die Rohrpost in sehr nützlicher Weise auch zur Förderung schwererer Lasten verwendet werden kann, zeigt die eigenartige und sehr bemerkenswerte Anlage in dem großen Geschäftshaus der Versicherungs-Gesellschaft „Nordstern" zu Berlin-Schöneberg. Hier werden in einem großen, im Dachgeschoß untergebrachten Archiv sämtliche Akten aufbewahrt. Unausgesetzt werden Aktenbündel an einzelnen Arbeitsplätzen im ganzen Haus gebraucht. Von vornherein war man sich darüber klar, daß die Beförderung durch Boten unzulässig sein würde. Doch auch die Anwendung der sonst üblichen Förder-Einrichtungen konnte nicht befriedigen. Würde man Akten-Aufzüge für die einzelnen Stockwerke eingebaut haben, so wären daran noch Förderbänder zu schließen gewesen, da die Aufzüge ja nur in senkrechter oder wenig geneigter Richtung arbeiten. In Büroräumen sind aber Förderbänder sehr störende Einbauten. Auch Becherwerke, die, wie wir ja wissen, beliebig in senkrechter und wagerechter Richtung fördern können, kamen wegen des störenden Geräuschs nicht in Betracht. Die Rohrpost aber erfüllt alle Ansprüche. Sie arbeitet in beliebiger Richtung rasch und geräuschlos und bietet den weiteren Vorteil, daß die Rohre fest in die Wände und Decken eingemauert werden können, so daß die Feuersicherheit des Hauses durch die Anlage nicht beeinträchtigt wird.



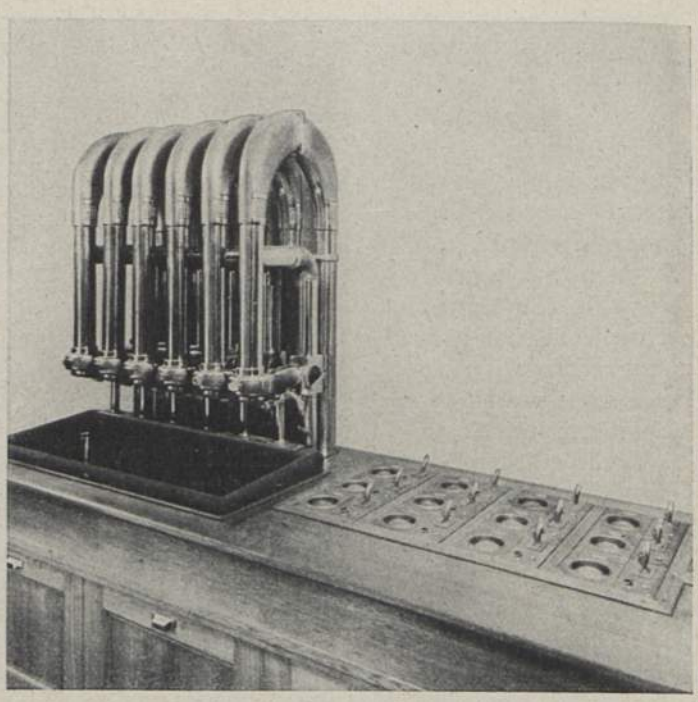
144. Einrichtung einer Sendestation der Rohrpostanlage des „Nordstern"
Deutsche Telephonwerke und Kabelindustrie A.-G., Berlin

Es sind Fahrrohre mit dem großen lichten Durchmesser von 15 Zentimetern eingebaut. Darin fahren Büchsen von 48 Zentimetern Länge und 124 Millimetern Außendurchmesser; sie tragen oben und unten je einen Dichtungsring. In jede der Büchsen können Akten bis zum Gewicht von zwei Kilogramm gepackt werden.

In den Arbeitsräumen sind 26 Empfangsstellen angelegt, und dementsprechend stehen im Archivraum 26 Apparate,



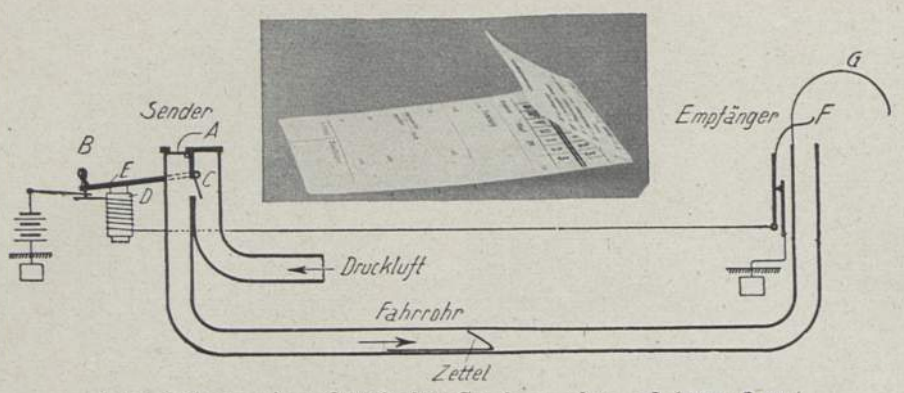
145. Hauptstelle der Rohrpostanlage eines Warenhauses mit 10 Sendern und 6 Empfängern
E. Zwietusch & Co., Charlottenburg



146. Rohrposthauptstelle mit 24 Sendern und 6 Empfängern
Auf dem Bilde sind nur die Öffnungen von 12 Sendern sichtbar
E. Zwietusch & Co., Charlottenburg

147. Hauptstelle der Rohrpostanlage des „Nordstern"
Deutsche Telephonwerke und Kabelindustrie A.-G., Berlin

deren jeder zugleich Sender und Empfänger ist (Bild 147). Da infolge des sehr großen Rohrdurchmessers und der hohen Fördergewichte zur Unterhaltung eines ständig fließenden Luftstroms eine große, sehr teuer arbeitende Maschinenanlage notwendig gewesen wäre, wird hier die unterbrochene Betriebsweise mit Druckluft als Antriebmittel benutzt. Störende Wasserniederschläge sind nicht zu befürchten, da ja sämtliche Rohre in dem stets gleichmäßig durchwärmten Haus liegen. Dünnluft wäre auch deshalb schlecht verwendbar, da ihre Wirkung immer erst allmählich eintritt, während gerade für die Beschleunigung der schweren Büchsen beim Anfahren besonders starke Kraftentwicklung notwendig ist.

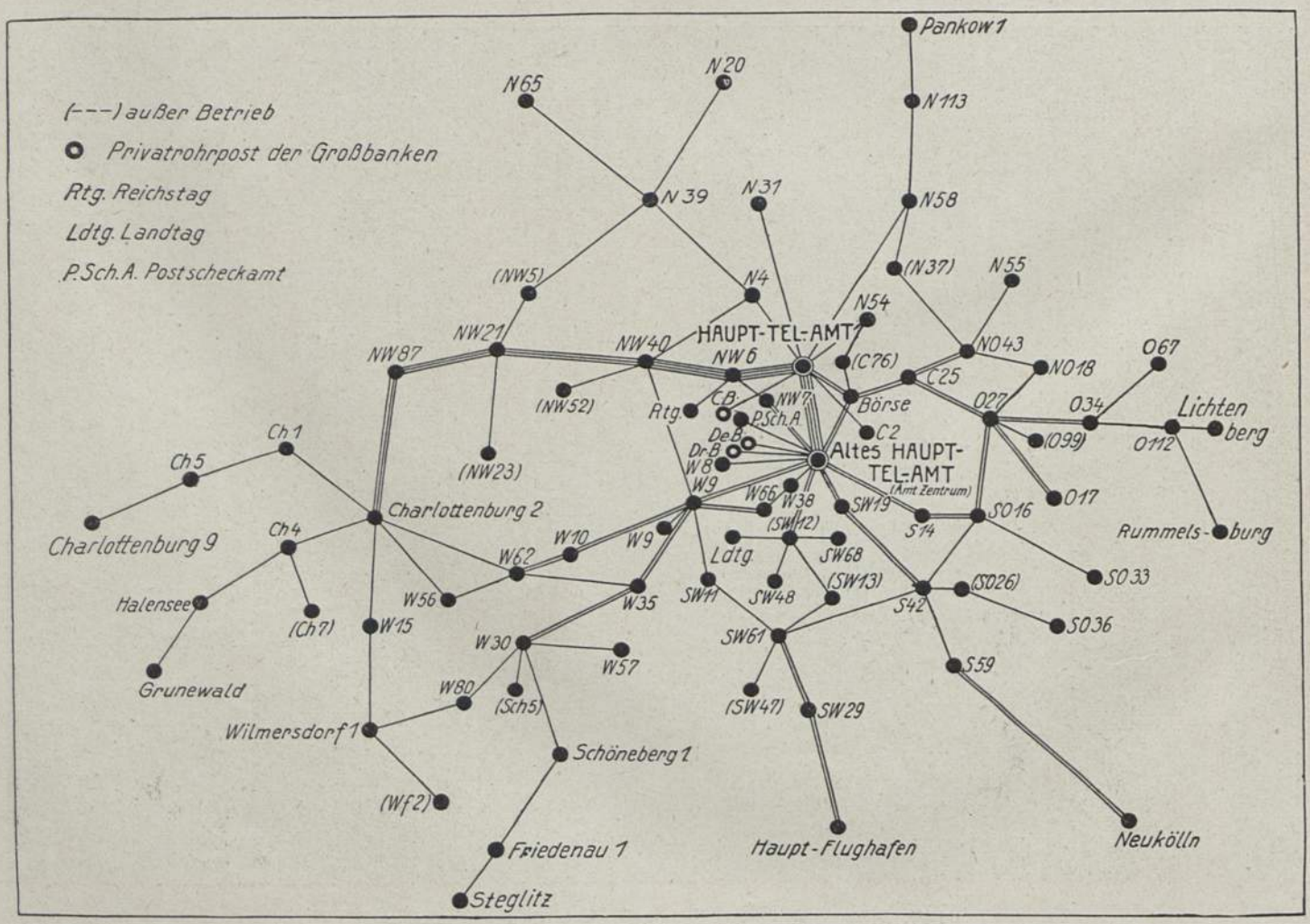



148. Schema einer Zettelrohrpostanlage, oben gefalteter Zettel

Wenn vom Archiv aus ein verlangtes Aktenbündel abgeschickt werden soll, dann wird die schwere Tür des entsprechenden Apparats geöffnet, die Büchse in das Fahrrohr gestellt, die Tür wieder geschlossen und verriegelt (Bild 144). Öffnen des Druckluft-Ventils treibt die Büchse zum Empfänger. Während sie unterwegs ist, leuchten an beiden Apparaten grüne Lampen. Im Empfangsapparat schlägt die Büchse auf einen federnden Boden auf und schaltet hierdurch einen Kontakt ein, der draußen rote Signallampen aufglühen läßt, während die grünen erlöschen. Ein anderer Kontakt hat zugleich das Abschalten der Druckluft beim Sender bewirkt und einen Auslaß ins Freie zur Entleerung des Fahrrohrs geöffnet. Dann kann die Tür aufgeklappt und die Büchse entnommen werden.

Wenn Akten von einem Bürozimmer in ein anderes geschickt werden sollen, so müssen sie stets ihren Weg über die Hauptstelle im Archiv nehmen, wo sie umgeladen werden. Die kürzeste Fahrstrecke ist 24 Meter lang und wird in 3 Sekunden zurückgelegt; die längste hat eine Ausdehnung von 170 Metern, zu deren Überwindung die Büchsen 17 Sekunden gebrauchen. Derart geschwind kann über so geringe Entfernungen kein anderes Beförderungsmittel für körperliche Gegenstände arbeiten.

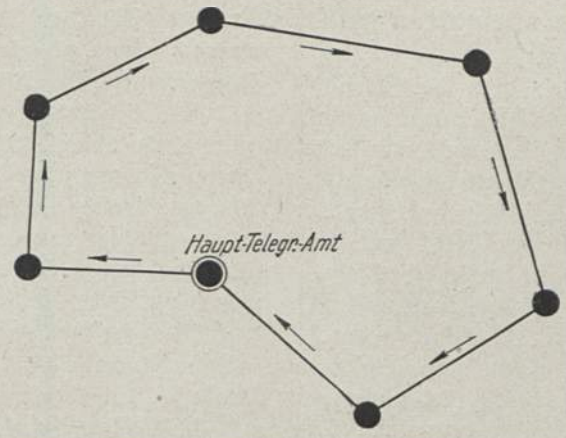
In scharfem Gegensatz zu dieser Schwergewichts-Rohrpost stehen Anlagen, die in den großen Vermittlungsämtern für Ferngespräche benutzt werden. Der Teilnehmer am Ortsnetz,




149. Plan des Berliner Rohrpostnetzes

der ein Ferngespräch wünscht, wird zur Entgegennahme der Anmeldung mit dem Meldetisch verbunden. Wohnort und Anschlußnummer des verlangten Teilnehmers werden hier auf einem langen schmalen Zettel aus kräftigem Papier vermerkt. Damit die Verbindung tatsächlich hergestellt werden kann, muß dieser Meldezettel zum Platz der Beamtin befördert werden, die mit dem betreffenden Ort arbeitet.

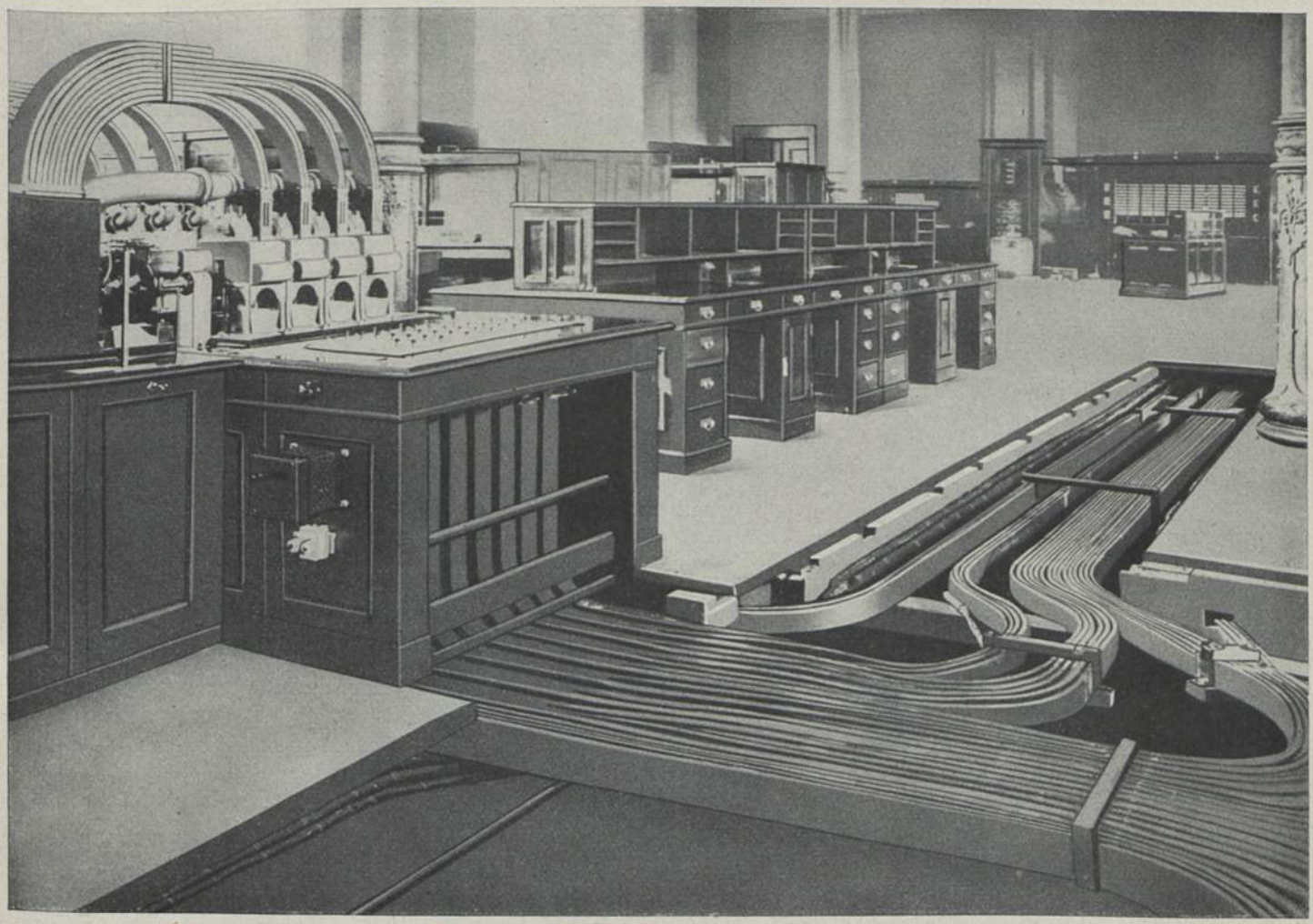
In den Großstädten werden täglich viele Tausende solcher Zettel ausgefertigt, und es würde nahezu unmöglich sein, sie durch Boten zuzustellen, da deren Schreiten ein unerträgliches Geräusch in den Amtsräumen verursachen würde, in denen es doch möglichst still hergehen muß. Es wäre auch ein lächerlicher Gegensatz, fortwährend zentnerschwere Burschen zur Überbringung von zwei oder drei der kleinen leichten Zettel in Bewegung zu setzen. Die Rohrpost aber schmiegt sich auch diesem Kleinbetrieb in bewundernswerter Weise an.




150. Schema einer Rohrpostanlage mit vieleckförmigem Netz

Wo sie zur Verfügung steht, da faltet die Melde-Beamtin den ausgefertigten Zettel an einer vorgeschriebenen Querlinie, führt ihn in einen Schlitz ein, worauf er augenblicklich durch ein Rohr zum Verteilertisch geblasen wird. Dort wird er von neuem in eine der vielen zur Verfügung stehenden Öffnungen eingeführt und liegt wenige Sekunden später am Platz der Verbindungsbeamtin, ohne daß diese einen Handgriff zu tun brauchte, und ohne das geringste Geräusch verursacht zu haben.

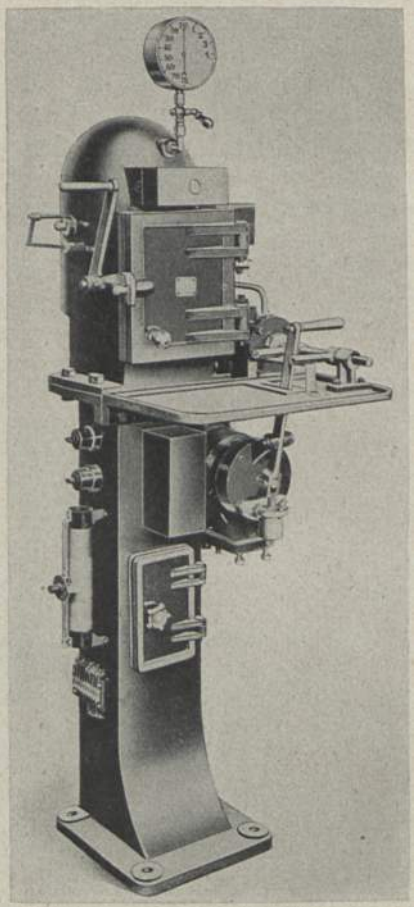
Die Haupteigenart der Zettelrohrpost ist, daß die zu fördernden Gegenstände unverpackt dahinfahren. Die Rohre, die aus leichtem Messingblech gefertigt sind, haben rechteckigen Querschnitt. In den Fernämtern von Berlin, Hamburg, München, Stuttgart beträgt die lichte Höhe der Fahrrohre 1 Zentimeter, die lichte Breite 7 Zentimeter. Der eingeführte gefaltete Zettel füllt den Rohrquerschnitt vollständig aus, indem der Rücken des längeren Endes und die Kante der kürzeren Fahne sich gegen die oberen und unteren Rohrwandungen legen. Leicht gepreßte Druckluft, die in den Faltwinkel bläst, verstärkt die Abdichtung und treibt den Zettel wie ein Segel vor sich her. Da es immerhin einmal vorkommen kann, daß die Zettelfalte aufgeblasen wird, das Blatt also im Rohr liegenbleibt, sind in Entfernungen von zehn Metern leicht zu öffnende Klappen



151. Verteilertisch einer Zettel-Rohrpostanlage
Im Vordergrund sind die unter dem Boden eingebauten Rohrstränge sichtbar. E. Zwietusch & Co., Charlottenburg

eingebaut, die ein schnelles Entfernen des verunglückten Zettels mit geeigneten Werkzeugen gestatten.

Wir verfolgen die Reise eines Zettels vom Verteilertisch zum Vermittlungsplatz (Bild 151). Der Tisch enthält so viel Einführungsschlitze, wie Arbeitsplätze im Amt vorhanden sind. Je ein Geber am Verteiler und ein Empfänger am Vermittlungsschrank sind durch ein gesondertes Rohr miteinander verbunden. Wenn die Verteilbeamtin einen Zettel mit der Falzlinie nach unten einführt, öffnet sie die leichte Klappe A im Schlitz (Bild 148), die sich sofort wieder von selbst schließt. Darauf drückt sie auf Taste B, öffnet dadurch die für gewöhnlich anliegende Klappe C und schließt gleichzeitig den Stromkreis für den Magneten D, der nunmehr die Klappe C durch Anziehen der Stange E offen hält. Es strömt Druckluft in das Fahrrohr, der Zettel wird vorwärts getrieben. Unmittelbar hinter der Auswurföffnung streift er an der Kontaktzunge F vorbei, wodurch der Stromkreis des Magneten D unterbrochen und die Druckluft-Zufuhr abgestellt wird. Die lebendige Kraft des ausgeworfenen Zettels wird durch die Fanggabel G vernichtet, so daß er ruhig auf die Tischplatte des Vermittlungsplatzes niederfällt. Erledigte Zettel führt die Vermittlungsbeamtin wiederum in einen Schlitz ein, worauf sie durch ein anderes Rohr zu einer Sammelstelle gelangen.



152. Neuester Rohrpost-Apparat mit Luftanschluß
Deutsche Telephonwerke und Kabelindustrie A.-G., Berlin

*

Die ausgedehnteste Stadtrohrpost-Einrichtung befindet sich in Paris. Es sind dort 350 Kilometer Fahrrohr ausgelegt, 120 Ämter mit 200 Apparaten besorgen den Betrieb. London dagegen hat nur 90 Kilometer Fahrrohre und 70 Ämter mit 110 Apparaten. Die Rohrpost von Berlin ist die zweitgrößte auf der Erde, denn die Länge ihrer Fahrrohre beträgt heute 182 Kilometer; sie hat 77 Ämter mit 230 Apparaten. Der Betrieb ist außerordentlich lebhaft. Schon im Jahre 1913 sind in Berlin 4 101 000 Briefe und Karten, 12 249 000 Telegramme durch die Rohrpost befördert worden.

Wenn man von der Einzelverbindung zwischen dem alten Haupt-Telegraphenamt in der Französischen Straße und der Börse absieht, die schon im Jahre 1865 in Betrieb genommen wurde, beginnt die Geschichte der Berliner Rohrpost im Jahre 1876. Sie besaß damals 26 Kilometer Fahrrohr und 16 Ämter. Das Netz hatte zuerst die Form eines Vielecks, in dem sich der Betrieb mit ständig kreisendem Luftstrom vollzog. Bild 150 stellt eine solche Anlage schematisch dar. Es wurde immer nur in Einer Richtung gefahren, so daß große Umwege unvermeidlich waren. Eine Büchse, die von einem Amt zu dem unmittelbar dahinter liegenden gebracht werden sollte, mußte fast das ganze Vieleck durchlaufen. Das Rohrnetz wurde daher zur Strahlenform umgebaut, dessen Mittelpunkt das frühere Haupt-Telegraphenamt in der Französischen Straße ist.

Wenn man den heutigen Grundplan des Berliner Netzes betrachtet (Bild 149), so ist die ursprüngliche Strahlenform nur noch schwer zu erkennen. Denn inzwischen ist ein zweiter Sammelpunkt für Rohrstrahlen hinzugekommen: das seit 1918 in Betrieb genommene neue Haupt-Telegraphenamt in der Oranienburger Straße. Es wurden außerdem zahlreiche Nebenverbindungen zwischen Punkten hergestellt, die besonders lebhaften Verkehr miteinander haben. Manche Strecken sind mit zwei, einige mit drei Rohren ausgerüstet; zwischen dem alten und dem neuen Haupt-Telegraphenamt sowie zwischen diesem und zwei benachbarten, sehr verkehrsreichen Postämtern liegen sogar vier gleichgerichtete Fahrrohre.

Beim Umzug des Telegraphen aus der Französischen Straße in die Oranienburger Straße sah man davon ab, auch die Rohrpoststrecken zu verlegen, da dieser Umbau zu teuer gewesen wäre. Die Telegraphenkabel konnten sehr viel billiger umgeschaltet werden. Das neue Amt war jedoch stark genug, um sogleich neue Strahlen zu sich heranzuziehen. Es enden heute in dem Rohrpostamt, das im Haus des alten Haupt-Telegraphenamts angesiedelt ist, 11 Linien, von denen 7 mit zwei Fahrrohren ausgerüstet sind. Vom neuen Sammelpunkt strahlen 6 Linien aus, 2 mit Doppelrohren.

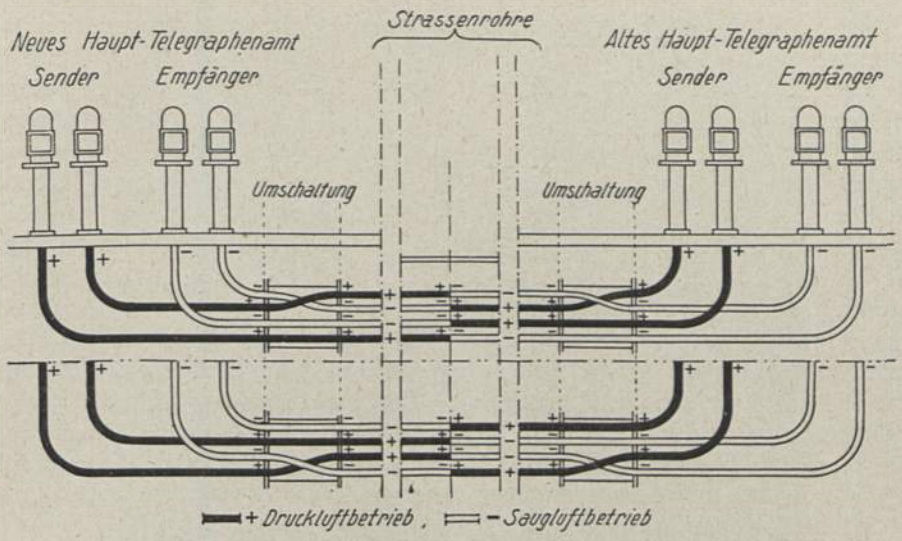
Die längste Strecke, die ein zu beförderndes Telegramm auf der Berliner Rohrpost zurückzulegen hat, der Weg also vom neuen Haupt-Telegraphenamt zu dem am weitesten außen liegenden Rohrpostamt, Grunewald, ist 12,4 Kilometer lang. Er wird in 31 Minuten durchfahren. Hierbei findet sechsmaliges Umladen statt. Die größte Fahrlänge für Briefe und Karten aber, das heißt der Abstand der beiden am weitesten hinausgeschobenen Ämter voneinander, beträgt 22 Kilometer, zu deren Zurücklegung 53 Minuten gebraucht werden.

Es sind acht Krafterzeugungsstellen über die Stadt verteilt, deren Preß- und Dünnluftbehälter je miteinander verbunden und an alle Ämter angeschlossen sind, die nicht an den Strahlenenden liegen. Zweck und Notwendigkeit dieser Einrichtung sind schon auf Seite 62 dargelegt worden. Die Preßluft hat $^3/_4$ Atmosphären Überdruck, die Dünnluft $^1/_2$ Atmosphäre Unterdruck.

Mit Ausnahme der Verbindung zwischen den beiden Hauptämtern findet stets Wendebetrieb statt. Man arbeitet in derselben Art auch auf den Strecken mit Doppelrohren, so daß also in jedem der beiden gleichgerichteten Rohre Züge in beiden Richtungen verkehren. Das steht in schroffem Gegensatz zum Betrieb der Eisenbahnen, auf denen ja jedes Gleis in immer gleichbleibender Richtung benutzt wird. Bei der Rohrpost ist das nicht möglich, da ja dann das eine Rohr stets Druckluft erhalten und sich in kurzer Zeit mit Wasser füllen würde.

Die Züge verkehren nach genauem Fahrplan; auf den verkehrsreichen Strecken in Abständen von vier, auf den stillsten Außenlinien in Zwischenräumen von fünfzehn Minuten. Sie bestehen aus drei bis fünf dichtungslosen Büchsen

mit einem dahintergesetzten Treiber. Die Büchsen sind 13 Zentimeter lange Aluminium-Becher, deren geschlossenes Ende gerundet ist. Ein langer Lederstulp wird stramm passend über jeden Becher gezogen. Der Deckel des Stulp ist vertieft, so daß sich der Boden der vorauflaufenden Büchse ein wenig in ihn hineinlegen kann. Vom Treiber vorwärtsgepreßt laufen die Züge also eng geschlossen durch die Rohre.




153. Schematische Darstellung der Wirkungsweise der Rohrweichen im alten und neuen Haupt-Telegraphenamt

Jede der Büchsen faßt fünf Briefe, zehn Karten oder zwanzig Telegramme. Im Jahre 1913 sind täglich rund 7000 Züge mit 20 000 Büchsen befördert worden. Sämtliche Züge legten in dem gesamten Jahr etwa 12½ Millionen Kilometer zurück.

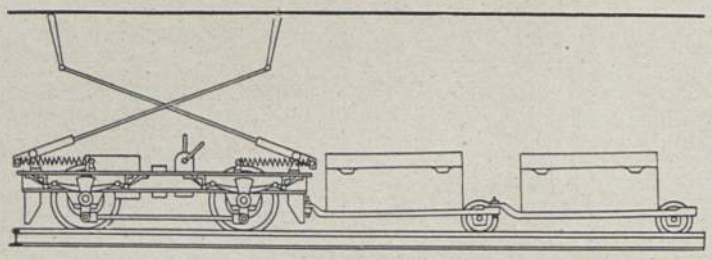
Die Berliner Rohrpostämter sind zum größten Teil mit Apparaten neuester Bauart ausgerüstet, die einen schnellen Betrieb und bequeme Bedienung gestatten. Bemerkenswert ist die sparend wirkende selbsttätige Luftabschaltung, die nach Angaben des Oberbaurats Kasten ausgeführt worden ist.

Wie wir schon wissen, muß immer ein Apparat mit Luftanschluß mit einem anschlußlosen in Verbindung stehen, der in Berlin einen Absperrhahn besitzt. Bild 152 zeigt einen Apparat mit Luftanschluß. Wenn ein Zug abgesendet werden soll, entriegelt der Beamte die Tür der Ladekammer im Kopf des Apparats und klappt die Tür auf. Im Hintergrund der jetzt zugänglich gewordenen Kammer liegt die Fahrrohröffnung. Der Beamte läßt die gefüllten Büchsen hier hineingleiten und führt zuletzt den Treiber ein. Nun schließt er die Tür und verriegelt sie (Bild 154). Er zieht darauf den links sichtbaren Hebel so weit wie möglich nach vorn. Damit ist der Druckluft-Anschluß geöffnet, die Preßluft tritt in die Apparatekammer und fördert den Zug bis in den zugehörigen Apparat mit Absperrhahn.

Die Büchsen sausen dort aus dem Fahrrohr hinaus, laufen an der Innenseite des gewölbten Kammerdeckels entlang und fallen dann mit bereits stark geminderter Wucht auf den mit Filz belegten Boden der Kammer nieder. Bei dem

154. Rohrpost-Hauptstelle im Haupt-Telegraphenamt Berlin
Deutsche Telephonwerke und Kabelindustrie A.-G., Berlin

Entlangstreifen an der Innenseite der gewölbten Kammerwand aber haben sie eine Kontaktfeder berührt, die über eine Drahtverbindung hinweg eine magnetische Vorrichtung im Gebe-Apparat betätigt. Hierdurch wird am Geber die Druckluft vom Fahrrohr abgesperrt und die Kammer des Gebe-Apparats mit der Außenluft in Verbindung gesetzt.



155. Schematische Darstellung eines Zuges der Münchener Briefbahn

Früher mußte die Ankunft des Zugs von der Empfangsstelle telegraphisch zurückgemeldet werden, worauf dann die Abschaltung der Förderluft von Hand erfolgte. Wenn auch nur einer der beiden hierbei beteiligten Beamten unsorgfältig arbeitete, wurde Luft verschwendet, während sie jetzt nur während der wirklichen Bedarfszeit strömt.

Die Kammer des Apparats mit Absperrhahn, der eben Empfänger war, steht durch einen schmalen Auslaß ständig mit der Außenluft in Verbindung. Denn der von der Druckluft vorgetriebene Zug stößt ja eine Luftsäule vor sich her, und diese Vorluft muß abfließen können, wenn sie nicht bremsend wirken soll.

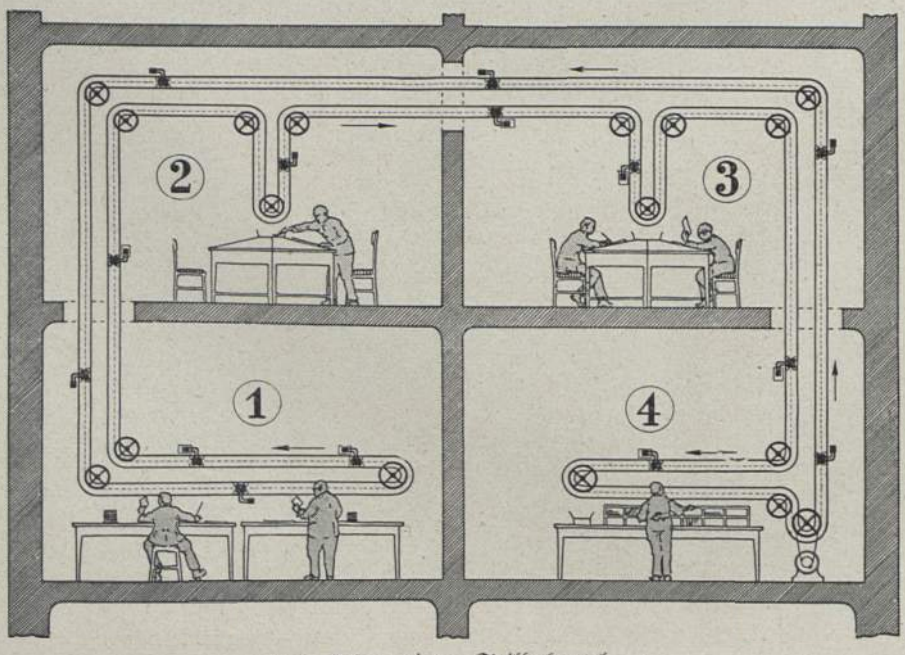
Ist der Zug eingetroffen, was dem Empfangsbeamten durch das Geräusch der aufprallenden Büchsen kund wird, dann entriegelt er die Kammertür seines Apparats. Bevor jedoch der Riegel abgehoben wird, hat der gleiche Hebel einen Absperrhahn im Fahrrohr geschlossen. Das ist notwendig, weil die im Fahrrohr enthaltene Druckluft sich ausdehnt und ohne Absperrung die Büchsen aus der sich öffnenden Kammertür hinausschleudern würde. Diejenigen Büchsen des angekommenen Zugs, die für das eigene Amt bestimmt sind, legt der Beamte auf seinen Verteiltisch, die anderen befördert er zusammen mit den im eigenen Amt gefüllten unter Benutzung seines Apparats mit Luftanschluß weiter.

Bald darauf hat er einen Zug zu dem Amt zurückzusenden, das vorher das gebende war. Er führt nun die Büchsen in das Fahrrohr des Apparats ohne Luftanschluß ein, steckt den Treiber dahinter, schließt und verriegelt die Kammertür, wobei der Absperrhahn selbsttätig geöffnet worden ist. Darauf gibt der Beamte ein telegraphisches Zeichen zum anderen Amt. Dort, in dem nunmehr empfangenden Amt, wird der Luftschalthebel nach hinten gedrückt, wodurch das Fahrrohr mit dem Dünnluftrohr in Verbindung gesetzt ist. Jetzt treibt die durch den Luftschlitz am anderen Apparat einströmende atmosphärische Luft den Zug zurück. Bei ihrer Ankunft schlagen die Büchsen wieder gegen einen Kontakt und werfen von neuem den Luftschalthebel in die Mittelstellung zurück, so daß die Kammer mit der Atmosphäre verbunden ist und zum Entladen geöffnet werden kann.

Bei diesem Wendebetrieb ist die Fahrgeschwindigkeit der Büchsen immer gleich. Bei Druckluft-Vortrieb wird sie mit der steigenden Entfernung vom Gebe-Apparat geringer, beim Zurückholen mit Dünnluft wächst sie von einem geringen Wert erst allmählich an. Es ergibt sich also eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, die beträchtlich unter dem Höchstwert bleibt. Die Ausnutzbarkeit vielbefahrener Rohre wird hierdurch gemindert.

Da sowohl das Amt Zentrum wie das neue Haupt-Telegraphenamt Strahlen-Mittelpunkte (Bild 149) sind, herrscht in den vier Rohren, durch die sie miteinander verbunden sind, sehr starker Verkehr. Mit allen Mitteln muß danach gestrebt werden, die Züge möglichst geschwind über diese Hauptstrecken zu bringen. Sie sollen auf dem gesamten Weg stets mit Höchstgeschwindigkeit fahren. Man hat darum für diese Verbindung den Wendebetrieb verlassen und ist zu einem neuartigen Doppelantrieb übergegangen, der für jede Einzelfahrt sowohl Druckluft wie Dünnluft verwendet.

Die vier Rohre sind so geschaltet, daß in zweien von ihnen ständig Züge vom Zentrum zum Haupt-Telegraphenamt, in den beiden anderen Züge in umgekehrter Richtung fahren. Um Büchsen abzusenden, hat der Beamte an jedem der vier verwendeten Apparate nur nötig, den Türverschlußhebel hinunterzudrücken. Er öffnet damit gleichzeitig das Druckluft-Ventil. Der Türhebel ist mit diesem jedoch nicht unmittelbar, sondern durch einen Zwischenapparat verbunden. Dieser kann das Druckluft-Ventil wieder schließen, ohne daß der Türhebel hierbei bewegt wird. Es dauert eine bestimmte Zeit, bis auf diese Art die Druckluft wieder abgesperrt wird, wobei jedoch keine Verbindung mit der Außenluft hergestellt wird. Der Zug befindet sich dann auf der Hälfte des Wegs. Im gleichen Augenblick aber, in dem das Druckluft-Ventil zufällt, wird durch elektrische Übertragung vom Geber zum Empfänger Dünnluft an diesem eingeschaltet, und diese bringt den Zug nun über die zweite Hälfte seines Wegs. Dieser Doppelantrieb nutzt das sehr kräftige Treibvermögen der Druckluft über kurzen Weg aus. Bevor noch ihre Leistungsfähigkeit infolge der wachsenden Entfernung des Zugs vom Abgangsort in größerem Umfang gesunken ist, beginnt die

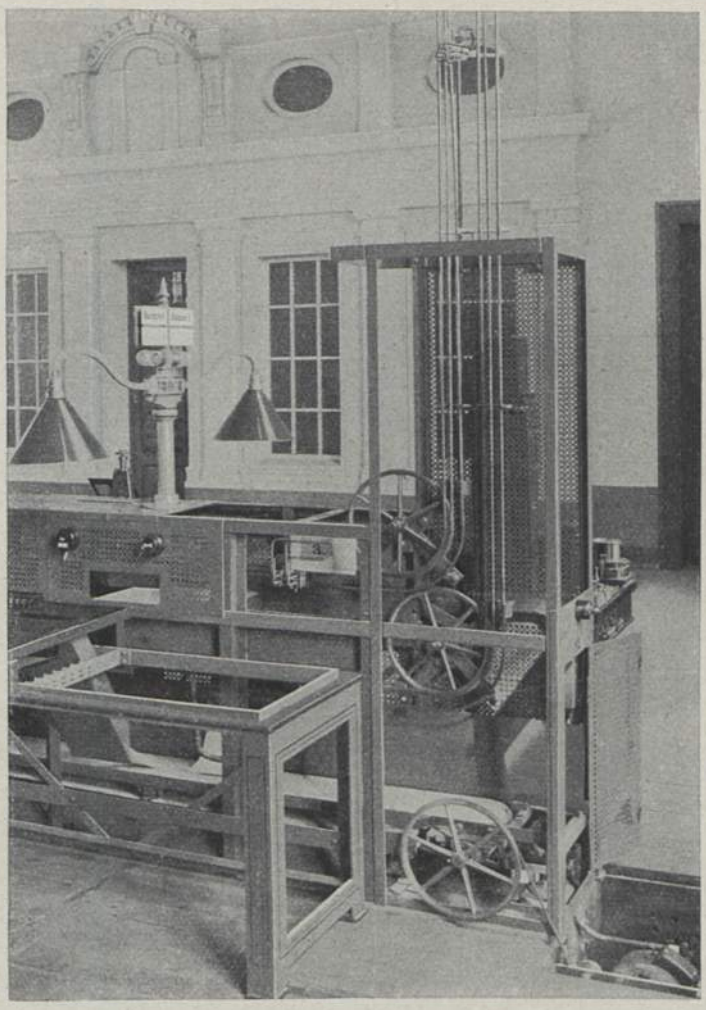



156. Plan einer Seilbahnanlage

Dünnluft zu wirken. Ihre anfänglich geringe Treibkraft wird ausgeglichen durch die Ausdehnungskraft der ja in das Fahrrohr fest eingeschlossenen Druckluft. Im zweiten Drittel des Wegs wirken Ausdehnung der Druckluft und Dünnluft zusammen, bis zuletzt die Dünnluft allein tätig ist.

Man erreicht auf diese Weise eine Fahrgeschwindigkeit von 61,2 Kilometer in der Stunde, das sind 17 Meter in der Sekunde. Die Züge sind zwischen den beiden Hauptämtern immer nur 1¼ Minute unterwegs. Die vier Rohre zusammen können in einer Stunde 80 Züge mit 400 Büchsen und 8000 Telegrammen befördern.

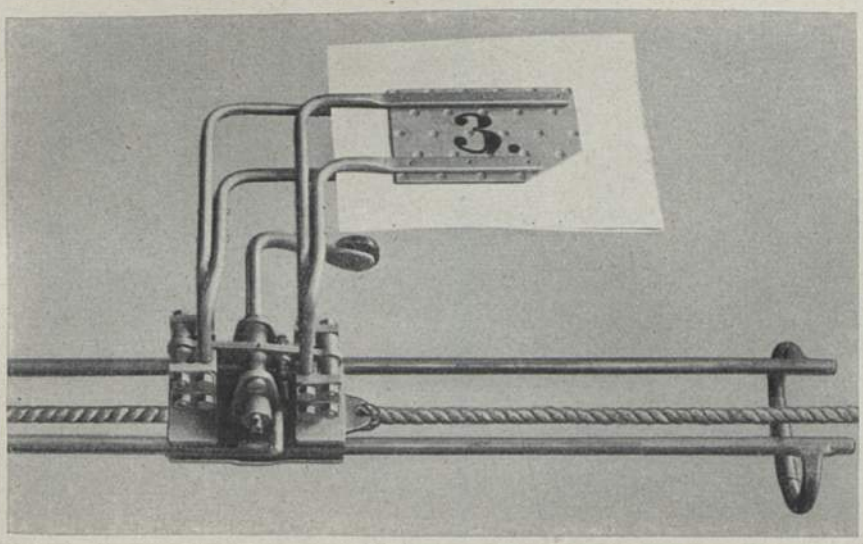
Der eben geschilderte Doppelbetrieb bringt es mit sich, daß je zwei Rohrhälften ständig mit Druckluft versorgt werden. Die Folge ist wiederum Ansammlung von Feuchtigkeit in ihnen. Bevor das Wasser noch störend wirken kann, muß es durch Dünnluft aufgetrocknet werden. Zu diesem Zweck ist eine Umschalte-Vorrichtung eingebaut, die gestattet, den Druckluft- und Dünnluft-Betrieb beliebig zu vertauschen. Wenn Umschaltung vorgenommen ist, erhalten die Rohrhälften, die bis dahin ausschließlich mit Druckluft versorgt wurden, fortwährend Dünnluft. Es muß jedoch dafür gesorgt sein, daß trotzdem die äußerliche Handhabung des Betriebs unverändert bleibt. Denn die Apparate dieser Vierrohr-Strecke sind nicht mehr, wie die Apparate im Wendebetrieb, bald Geber, bald Empfänger. Auf jedem der beiden Ämter werden vielmehr zwei der dort aufgestellten Apparate ständig als Geber, die beiden anderen ständig als Empfänger benutzt. Durch die Luftumschaltung darf keine Veränderung in der Handhabung der Apparate eintreten, damit die Beamten keine falschen Griffe machen.



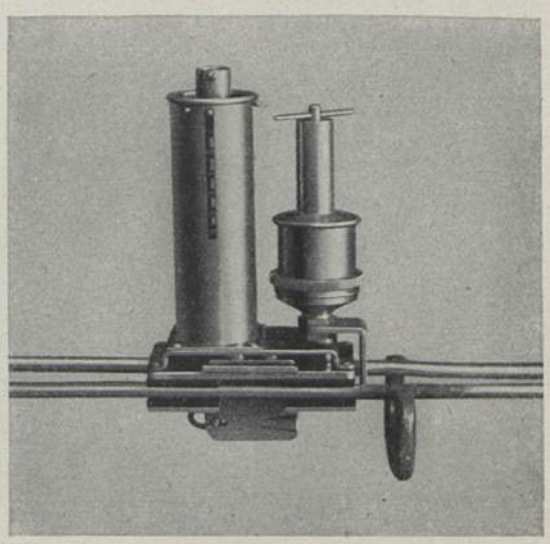
157. Seilpost- und Förderbandanlage am Arbeitsplatz
E. Zwietusch & Co., Charlottenburg

Die Rohrumschaltung beschränkt sich daher, wie es ja auch zweckmäßig ist, auf die Rohrstücke, die außerhalb der Häuser unter den Straßen liegen. Sowohl im Keller des neuen Haupt-Telegraphenamts wie im Keller des Hauses in der Französischen Straße befindet sich eine drehbare Rohrweiche; beide Vorrichtungen werden beim Umschalten gleichzeitig gestellt. Es sind Zylinder mit je 4 Rohrläufen im Inneren. Ihre Wirkungsweise ist auf Bild 153 schematisch dargestellt. Das Verfolgen der Rohrläufe im oberen und unteren Teil des Bilds zeigt die Vertauschung der Fahrrohre ohne Änderung der Apparate-Benutzung. Die Straßenrohre, die vorher Druckluft führten, erhalten nach der Umschaltung Sauglust und umgekehrt.

Weichen werden hier und da auch in Rohren für gewöhnlichen Betrieb benutzt. Es kommt vor, daß man von einem Apparat aus bald zu dem einen, bald zu dem anderen Amt fahren will. Alsdann wird ein verschiebbares Rohrstück eingebaut, dessen Enden selbstverständlich sehr sorgfältig abgedichtet sein müssen. Man wendet Weichen auch zur Ueberbrückung von Apparaten an, die zeitweilig außer Betrieb




158. Seilbahnwagen mit Anschlaghebel
E. Zwietusch & Co., Charlottenburg



159. Spann- und Schmierwagen
E. Zwietusch & Co., Charlottenburg

gesetzt werden müssen. Es können dann Sendungen unmittelbar zu einem in weiterer Entfernung liegenden Apparat geschickt werden.

Solch eine Überbrückungs-Rohrweiche befindet sich in Berlin im Postamt SW 12, an der Ecke der Charlotten- und Zimmerstraße. Diesem benachbart liegt das bekannte Wolffsche Telegraphen-Büro, das eine Rohrpostverbindung mit dem Postamt besitzt. Während der Dienststunden des Amts werden die dort für das WTB eingehenden sehr zahlreichen Telegramme durch Umladen weiterbefördert. Nach Dienstschluß wird die Weiche umgelegt, und nun gelangen die Sendungen des Haupt-Telegraphenamts unmittelbar zum Wolffschen Telegraphen-Büro.

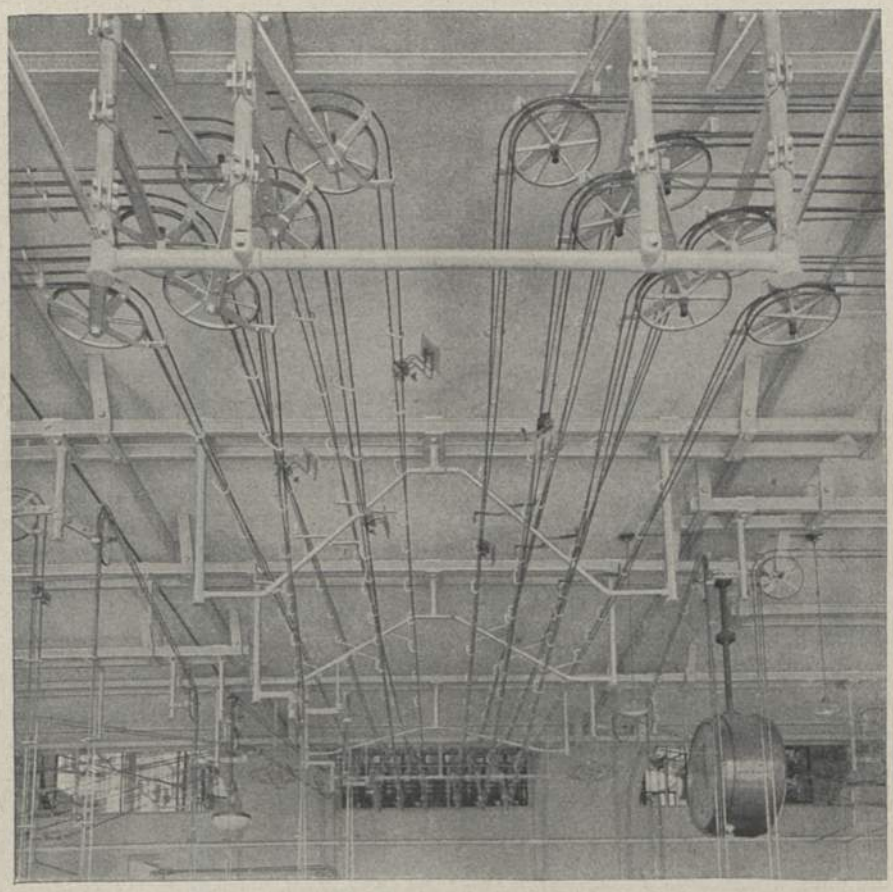
In Amerika, dessen Bewohner das Riesenhafte ja so sehr lieben, gibt es auch einige Rohrpostanlagen von ungewöhnlichen Abmessungen. Die Fahrrohre haben 20 bis 25 Zentimeter lichten Durchmesser und werden von 60 Zentimeter langen Büchsen befahren, die leer bereits 8 Kilogramm wiegen. Die „Nordstern"-Anlage (Seite 65) erscheint dagegen recht bescheiden. In New York, Boston und Philadelphia bedient man sich solcher Rohrposten zur Beförderung gewöhnlicher Briefe zwischen den einzelnen Postämtern im inneren Verkehr. Die Rohrpostbüchsen ersetzen die Straßen-Postwagen. In Boston wird mehr als die Hälfte der Briefpost durch die Rohre geschickt. Jede der Büchsen faßt 800 Briefe; es können aber auch Musterpäckchen und kleine Warenpakete eingelegt werden. Die Entlastung der Straßen von den zahlreichen Postfuhrwerken, die hierdurch bewirkt wird, ist gewiß zu begrüßen. Der Betrieb stellt sich jedoch sehr teuer, so daß diese Riesen-Rohrposten in Europa keine Nachahmung gefunden haben.

Wohl aber findet man auch diesseits des Weltmeers hier und da eine Brief-Tunnelbahn mit elektrischem Antrieb. Schon Werner Siemens hat den Vorschlag gemacht, kleine niedrige Motorwägelchen zur Beförderung von briefgefüllten Kasten über Sonderstrecken zwischen den wichtigsten Berliner Postämtern laufen zu lassen. Seitdem haben die Siemens-Firmen zahlreiche neue Entwürfe zur Schaffung von führerlosen Post-Tunnelbahnen in Berlin eingereicht, ohne daß es jedoch zur Ausführung gekommen wäre. Wenn die Kosten nicht allzu hoch werden sollen, müssen die Tunnel-Querschnitte für solche Bahnen sehr klein gehalten sein. Sie sind aber dann unbegehbar, so daß Ausbesserungen an Fahrleitungen, Schienen und anderen Teilen, die der Abnutzung unterworfen sind, nur sehr schwer ausgeführt werden können. Das Anwendungsgebiet solcher Postbahnen dürfte wohl immer auf Sonderfälle beschränkt bleiben.

Ein solcher liegt in München vor, wo der Starnberger Bahnhof von dem Haupt-Briefpostamt nur durch eine kurze

160. Hauptladestelle der Seilpost im Haupt-Telegraphenamt Berlin
E. Zwietusch & Co., Charlottenburg

Wegstrecke getrennt ist, die aber zu einem großen Teil über den sehr lebhaft befahrenen Bahnhofsplatz läuft. Für das Hinübertragen der Postbeutel ist die Entfernung zu groß, zahlreiche querende Postwagen aber hätten den Fahrverkehr auf dem Platz arg behindert. So entschloß man sich denn, hier eine Brief-Tunnelbahn einzurichten, deren Ausführung den Siemens-Schuckert-Werken übertragen wurde.



161. Gleisführung an der Saaldecke
E. Zwietusch & Co., Charlottenburg

Die im Jahre 1910 erbaute, eigentümliche Münchener Briefbahn hat eine Länge von 330 Metern und besitzt zwei Gleise, deren Spurweite 45 Zentimeter beträgt (Bild 155). Der Tunnel ist 1,2 Meter hoch, 2,3 Meter breit. Zwischen den Gleisen aber ist ein Kanal von 60 Zentimetern Tiefe angelegt, so daß die Strecke begangen werden kann, während der Betrieb ruht.

Die Züge bestehen aus einer vierrädrigen Lokomotive und vier Wagen mit je zwei Rädern. Auf der radlosen Seite stützt sich jeder der Wagen auf die Kupplung, durch die er mit dem vorher oder hinterher laufenden verbunden ist. In den auf jeder Wagenplattform aufgestellten Kasten können Sendungen bis zum Gesamtgewicht von 12 Kilogramm befördert werden.

Die Lokomotive läuft in der Mitte. Sie hat zwei Stromabnehmer, da man nicht die Schienen zur Rückleitung benutzt, sondern über jedem Gleis Oberleitung vorgesehen hat. Wie bei den Rohrpoststrecken mit Doppelrohren findet auf jedem Gleis hin und her gehender Verkehr statt. Da im ganzen nur zwei Züge vorhanden sind, sind Blocksicherungen unnötig. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 43 Kilometer in der Stunde.

Das Ablassen der Züge erfolgt, indem die Fahrleitung über dem betreffenden Gleis an die Stromquelle geschaltet wird. Hierdurch wird gleichzeitig ein Magnet auf der Lokomotive mit Strom versorgt, der die Bremse anlüftet. Sobald der Zug in die Nähe der Endstelle gekommen ist, macht er die Oberleitung wieder stromlos, so daß die Bremse einfällt und den Zug nach kurzem Auslauf zum Halten bringt.

In London ist während des Kriegs eine 10,5 Kilometer lange zweigleisige Untergrundbahn für Postbeförderung mit einer Spurweite von 61 Zentimetern erbaut worden. Sie führt von Paddington nach Whitechapel; der runde Tunnel hat einen Durchmesser von 2,75 Metern. Wegen der Kreuzung mit den bereits vorhandenen Personen-Untergrundbahnen und Abwasserleitungen mußte der Posttunnel an einzelnen Stellen tiefer als 26 Meter unter die Straßenoberfläche gelegt werden.

*

Es wurde bereits bei Besprechung der Zettelrohrpost darauf hingewiesen, daß die mechanische Förderung von zahlreichen leichten Blättern über kurze Strecken nur dann vorteilhaft ist, wenn keine Verpackung stattzufinden braucht. Die Rohrpost aber verlangt mit Ausnahme eben dieses Zettelbedienstes stets das Einlegen der Blätter in Büchsen. Sie wird trotz der Vorzüge, die sie besitzt, deshalb hier und da an Leistungsfähigkeit durch eine Fördereinrichtung von ganz anderer Art erheblich übertroffen.

Die Seilpost ist imstande, Blätter verschiedener Größen ebenso rasch und sicher fortzubewegen wie die Rohrpost, ohne daß das Fördergut irgendwie vorbereitet zu werden braucht. Freilich ist sie über Streckenlängen von mehr als 100 Metern schon nicht mehr brauchbar, und die recht erheblichen Ausgaben für die Anlage sind nur dann gerechtfertigt, wenn von einer Hauptstelle zu vielen verschiedenen Einzelpunkten gefördert werden soll. Das Fortschaffen der Blätter erfolgt in stetigem Zug (Bild 156). Es kann innerhalb eines Gebäudes nach allen Seiten und in alle Stockwerke gefördert werden. Der Betrieb geht nahezu geräuschlos vor sich.

Wir lernen alle Teile und Eigenschaften der Seilpost kennen, wenn wir die große Anlage dieser Art betrachten, die in dem nun schon so häufig erwähnten neuen Haupt-Telegraphenamt zu Berlin benutzt wird. In diesem Haus, das ja der Schnellförderung dient, hat man sich eben alle Einrichtungen dienstbar gemacht, die zur Beschleunigung der Depeschen-Abfertigung dienen können.

Von der Hauptsammelstelle, in der alle Depeschen zusammenströmen und wo auch Hausrohrpost-Apparate und Förderbänder sich befinden, gehen 20 Seilbahnstrecken aus. Jede von ihnen besteht aus einem in sich zurückkehrenden Gleis, das durch zwei Schienen aus Rundstahl gebildet wird. Hierauf gleiten Wägelchen, deren Fußplatten durch Scharniere biegsam gemacht sind, so daß auch enge Krümmungen durchfahren werden können.

Am Wagenfuß sind zwei Ausleger befestigt, deren jeder am Ende eine Platte trägt. Die beiden Platten werden für gewöhnlich durch den Zug einer Feder eng aneinandergepreßt. Wenn jedoch das am Ende eines Anschlaghebels angebrachte

Rädchen, das man auf Bild 158 deutlich unter dem Papierblatt sieht, auf eine seitlich neben dem Fahrgleis liegende erhöhte Schiene aufläuft, dann werden die Platten durch das Verdrehen des Anschlaghebels auseinandergezogen, und die eingeschlossenen Blätter fallen hinunter. Geht das Wägelchen darauf, während der Anschlag gerade von der Auflaufschiene abgleitet, hinter einem Schlitz vorbei, durch den andere Blätter gesteckt sind, dann greifen die sich schließenden Platten diese Blätter auf und nehmen sie mit.

Auf jeder einzelnen der in sich geschlossenen Seilpoststrecken können 5 bis 6 Wägelchen laufen. Jedes von ihnen fördert selbsttätig von einer bestimmten Aufnahmestelle nur zu einem bestimmten Abgabeort. Die von Wagen 1 bedienten Stellen werden von den Fahrzeugen 2 bis 6 glatt durchfahren, als ob sie nicht vorhanden wären usw. Es wird dies dadurch bewirkt, daß die Anschlaghebel verschiedene Längen und Formen haben und die Auflaufschienen dementsprechend verschiedenartig gestellt sind.

Der Antrieb aller Wagen einer Strecke erfolgt durch ein gemeinschaftliches, endloses Zugseil, das an jedem Wagenfuß befestigt ist und an einer Stelle über eine Antriebscheibe läuft. Damit dieses Seil stets straff gehalten wird, ist auf jede Strecke ein Wagen besonderer Form gesetzt. Sein Aussehen zeigt Bild 159. In der großen Kapsel links befindet sich eine kräftige Zugfeder, an welche die Seilenden angelenkt sind. Die Feder zieht das Seil beim Schlaffwerden sofort tiefer in die Kapsel hinein, strafft es also stets an. Neben der Spannvorrichtung befindet sich eine Schmierbüchse. Dickflüssiges Fett, das unter dem Druck einer nachstellbaren Schraube steht, wird daraus ständig auf die Fahrschienen gepreßt, so daß alle Fahrzeuge leicht darüber hingleiten können.

Bild 157 zeigt eine Arbeitsgemeinschaft von Seilpost und Förderband. Der Seilpostwagen fährt, von oben kommend, gerade in eine Arbeitsstrecke ein, die hinter einem langen, hier zum Teil von seiner Platte entblößten Apparate-Tisch liegt. Der Wagen wird, sobald er unter der Lampensäule angelangt ist, mit seinem Ausleger an die dort angebrachte Auflaufschiene stoßen und seine an der Hauptstelle aufgenommene Last in die Mulde fallen lassen, die hinter dem Ausschnitt in dem durchlochten Blech sichtbar ist. Der Wagen fährt hierauf untätig an allen andern Abgabestellen der Arbeitsstrecke vorbei, kehrt am Ende des Apparate-Tischs um und läuft über das untere Gleis wieder zur Decke hinauf, um zur Hauptstelle zurückzukehren. Der Beamte, welcher an dem hier dargestellten, jetzt freilich apparatelosen Platz arbeitet, nimmt die Blätter aus der Mulde und telegraphiert ihren Inhalt z. B. nach Budapest. Sobald das geschehen ist, steckt er sie in einen Schlitz der Tischplatte. Sie gleiten über eine kurze Schurre hinab, fallen auf das wagerechte Förderband, das sie nach links mitnimmt und dem auf Seite 11 erwähnten Sammel-Förderband zuführt; dieses läuft unter dem Saalboden zu einer Stapelstelle für erledigte Telegramme.

Die Hauptladestelle der Seilpost ist auf Bild 160 dargestellt. Für jede Strecke sind entsprechend der darauf verkehrenden Wagenzahl sechs Einsteckschlitze vorgesehen. Jedes in Schlitz 1 gesteckte Blatt wird zu einem bestimmten Telegraphen-Apparat geführt, das in Schlitz 2 gesteckte zum nächsten an demselben Tisch usw. Die von der Hauptstelle in den großen Apparate-Saal eintretenden zahlreichen Gleise sind durch leichte Streben an der Saaldecke befestigt (Bild 161). Die Gleise schmiegen sich leicht jeder Zimmerform an, laufen hinauf und hinab über zahllose Krümmungen, ohne daß die eilige Geschäftigkeit der Wägelchen dadurch beeinträchtigt wird. Die Länge aller Seilpost-Gleise im Haupt-Telegraphenamt beträgt 3000 Meter. Es fahren darauf 289 Wagen, die 187 Empfangsstellen bedienen.

Wenn Schriftstücke nur quer durch einen großen Saal von einem Arbeitsplatz zum andern befördert werden sollen, wird öfter eine vereinfachte Seilpost benutzt, die man wohl besser Drahtpost nennt. Ein Stahldraht ist zwischen beiden Austauschstellen gespannt. Hierauf kann ein leichtes Wägelchen laufen, das die Blätter trägt. Die Beförderungskraft wird durch Abschnell-Vorrichtungen erzeugt, die sich diesseits und jenseits an den Drahtenden befinden.

Jede dieser kann durch einen Handhebel zurückgezogen werden. Hierbei straffen sich starke Gummischnüre an. Sobald die Höchstspannung erreicht ist, schnellt die Vorrichtung von selbst zurück und versetzt dem Wägelchen einen Stoß, der es bis zum anderen Bahnende hinübertreibt. Die Spannvorrichtung kehrt von selbst in ihre Ruhestellung zurück. Die Drahtpost kann nur in der Wagerechten verwendet werden; eine leichte Krümmung des Fahrdrahts in dieser Ebene ist allenfalls zulässig.

# 25. Aufzüge

Bei der Besprechung des gewaltigen Hauses, das sich über dem Endbahnhof der Hudson- und Manhattan-Schnellbahn in New York erhebt, wurde in Band II dieses Werks auf Seite 344 gesagt:

„Das Stockwerk zu ebener Erde birgt ein Gewimmel von Verkaufsläden aller Art, ein Postamt, eine umfangreiche Fernsprechanlage und die Eingänge zu den Bahnen, die in senkrechter Richtung eine Fortsetzung der drunten wagerecht eingeführten Linien bilden. Denn ein großer Teil der Fahrgäste, die mit den Zügen der Hudson- und Manhattan-Bahn ankommen, bleibt in dem Bahnhofhaus selbst. Gewährt doch dieser in Zwillingsform aufgeführte Bau mit seinen 5000 Fenstern Raum für mehr als zehntausend arbeitende Personen. Ihre Verteilung über die 22 Stockwerke ist selbstverständlich nur mit Hilfe von Aufzügen möglich, deren Läufe hier mit um so mehr Recht als senkrechte Bahnstrecken angesprochen werden können, als auch sie von langsam laufenden und von Schnellzügen befahren werden. Die eine Gattung der zehn Fahrstuhlstrecken nämlich bedient alle unteren Stockwerke bis zum elften. In der anderen Gruppe aber geht es ohne Aufenthalt gleich bis zum elften Stockwerk hinauf. Von dort ab erst wird überall gehalten."

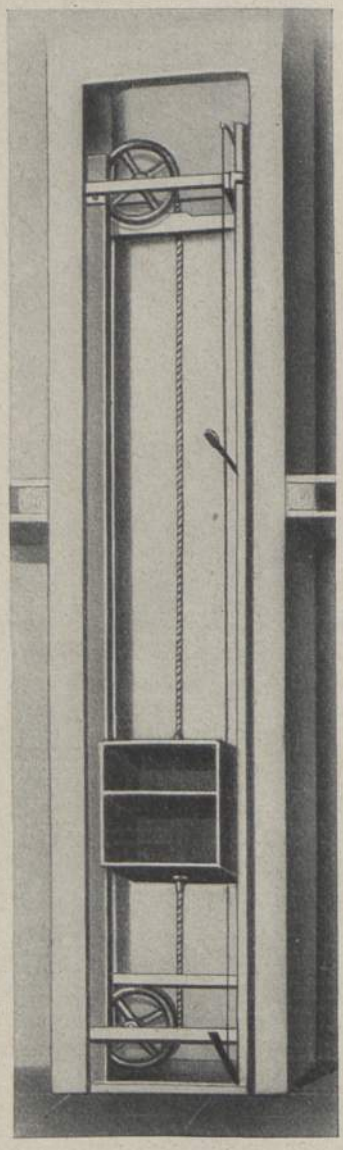
In anderen Wolkenkratzern New Yorks, wie zum Beispiel dem 236 Meter emporragenden Woolworth-Haus, gibt es ähnliche Verkehrsanlagen mit noch größerer Streckenzahl und noch mehr Haltestellen auf der einzelnen Linie. Jedes der zahlreichen Stockwerke ist eine Stadt für sich, die, auf steiler Bergkuppe liegend, nur über die kunstvoll hergerichtete Bahnstrecke erreicht werden kann. Denn wer wollte über Treppen, die für Notzwecke auch vorhanden sind, bis in das 22. oder 32. Stockwerk hinaufsteigen!

Es sind seltsame Bahnen, die hier den Verkehr vermitteln. Nur ein einziger Wagen kann auf jeder Strecke verkehren, da die Anlage von Weichen unmöglich ist. Das Zugmittel, durch welches das Fahrzeug vorwärts bewegt wird, ist zugleich der einzige Halt, an den es sich zu klammern vermag. Denn der Wagen ruht nicht auf seinen Schienen, sondern wird nur von ihnen geführt. Die Fahrgeschwindigkeit kann auf der ganzen Strecke stets die gleiche bleiben, weil Krümmungen nicht vorhanden sind und die Steigung sich nicht ändert.

Diese läßt sich ausdrücken durch die Verhältniszahl $\infty : 1$. Wir erinnern uns, daß auf den gewöhnlichen Eisenbahnen die wagerechte Streckenlage durch die Verhältniszahl $1 : \infty$ gekennzeichnet wurde (Band II, Seite 197). Dies bedeutete, daß die Strecke erst im Unendlichen um ein Meter steigt. Nun aber haben wir eine Bahnanlage vor uns, auf der die Schienen auf jedes Meter Streckenlänge (und auch bereits auf jeden Bruchteil eines Millimeters) ins Unendliche steigen. Das heißt: die Schienen sind senkrecht geführt. Der äußerste Fall der Steilstrecke ist erreicht.

162. Alter Aufzug
Nach der Heidelberger Liederhandschrift um 1310

Die Aufzüge sind keineswegs nur für die amerikanischen Mammut-Gebäude eine Notwendigkeit. Auch die großen Geschäfts- und Fabrik-Häuser, die während der letzten zwei Jahrzehnte in Europa entstanden sind, wären ohne sie undenkbar, und selbst auf die Bauart der Mietgebäude haben sie grundlegenden Einfluß gewonnen. Ein Warenhaus vermöchte niemals seine Verkaufsstände in vielen Stockwerken übereinander anzuordnen, wenn die Kunden nicht durch Fahrstühle leichtest hinaufbefördert werden könnten. Die vielstöckigen Bürohäuser, in denen tagsüber ein ununterbrochener Menschenstrom vom Erdgeschoß bis unter das Dach und wieder zurück flutet, bedürfen der Aufzüge in gleicher Weise. Kein Hausbesitzer würde es für lohnend erachten, den vierten Stock eines Mietpalastes ebenso vornehm auszubauen wie die anderen Geschosse, wenn er dem „höchsten" Mieter nicht bequeme Auffahrt zur Verfügung stellen könnte. Die



163. Handaufzug mit einem Kasten und Gegengewicht
Carl Flohr, Berlin

Ausgabe für Einbau und Betrieb der Fahrstühle in solchen Häusern macht sich durch die Wertsteigerung der oberen Geschosse vielfach bezahlt. In den Fabriken werden die schwersten Lasten durch die Aufzüge hinauf- und hinabbefördert, so daß es in sehr vielen Fällen gleichgültig erscheint, ob eine Werkstatt zu ebener Erde oder im achten Stock angesiedelt ist. Die Fahrstühle erst haben die neuzeitlichen Fabrikhochbauten und damit die gründliche Nutzung von Industriegelände möglich gemacht.

Die längsten Strecken senkrechter Bahnen führen seltsamerweise nicht vom Erdboden in die Höhe, sondern in entgegengesetzter Richtung, in die Erde hinein. Sie dienen dem Betrieb der immer tiefer hinuntersteigenden Kohlen-Bergwerke.

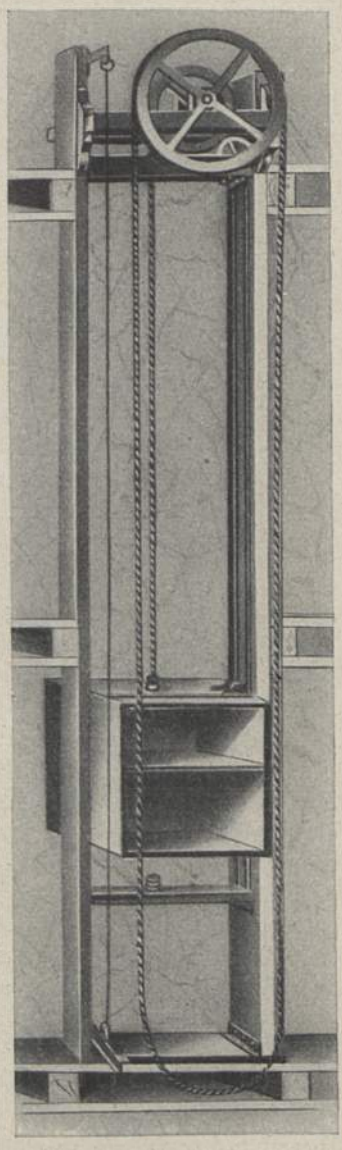
Gleich den Kranen haben die Aufzüge den Höchstgrad ihrer Nützlichkeit erst entfalten können, seit der elektrische Betrieb in ihren Bereich eingeführt worden ist. Es geschah das in größerem Umfang ungefähr um die gleiche Zeit, nämlich im Anfang der neunziger Jahre. Vorher mußte man sich mit Handantrieb behelfen (Bild 162) oder mit mechanischen Mitteln anderer Art, wie Riemenzug oder Druckwasser. Das letzte hat bereits sehr gute Dienste geleistet. Die vier Arten des Fahrstuhlantriebs finden wir heute noch sämtlich in Anwendung, wenn auch der Elektromotor alle größeren und wichtigen Anlagen vollständig für sich erobert hat.

Die einfachste Form des Handaufzugs stellen die kleinen Fahrstühle dar, die zum Fördern von Speisen oder Akten durch die Stockwerke verwendet werden (Bild 163). Ein endloses Seil ist über zwei Rollen geführt und der kleine Förderkasten in dieses Seil eingeschaltet. Damit er überall stehenbleiben kann, wird in das andere Seilstück ein Gegengewicht eingebunden. Die Bewegung erfolgt durch Ziehen an dem Tragseil selbst. Ein Fußtritt, der unter der Wandöffnung angebracht ist und eine Bremse betätigt, ermöglicht es, den Korb an richtiger Stelle stillzusetzen. An die Stelle des Gegengewichts kann ein zweiter Kasten gesetzt werden, so daß ein Pendelbetrieb möglich wird.

Das Ziehen am Tragseil bringt immerhin gewisse Gefahren mit sich, da der Arm hierzu in den Schacht hineingesteckt werden muß und von dem Förderkasten getroffen werden kann. Wo dies bei lebhafterem Betrieb vermieden werden soll, bringt man an der oberen Seilrolle ein Haspelrad an (Bild 164). Über dieses wird ein Seil gelegt, das außerhalb des Schachts durch alle Stockwerke hindurchläuft. Man kann den Fahrstuhl nun überall durch Ziehen an diesem Haspelseil in Gang setzen. Leicht ist es möglich, solche kleinen Aufzüge elektrisch anzutreiben.

Auch Fabrikaufzüge mit hoher Tragfähigkeit wurden früher vielfach von Hand bewegt. Anlagen der Art, wie Bild 165 sie zeigt, mit Antrieb durch Handhaspel, sind wohl auch noch heute hier und da vorhanden. Sie werden aber überall dort, wo Strom zur Verfügung ist, für elektrischen Betrieb umgestaltet.

Das gleiche gilt für die alten Riemenzug- oder Transmissions-Fahrstühle. Die Fabriken leiteten früher den Fahrstuhl-Antrieb häufig von einer der großen Wellen ab, die zur Bedienung der Arbeitsmaschinen durch die Säle laufen. Es wird zu diesem Zweck ein Gerät aufgestellt, das mit drei Riemenscheiben ausgerüstet ist. Die mittlere ist fest mit ihrer Welle verbunden, die beiden andern laufen lose auf dieser. Von der großen Transmissionswelle im Fabriksaal her kommen zwei Riemen, der eine glatt, der andere gekreuzt geführt. Solange sie auf den beiden äußeren Scheiben laufen, steht der Fahrstuhl still; zieht man aber an dem Steuerseil, das in unmittelbarer Nähe der Fahrstuhlbahn durch alle Stockwerke führt, dann wird eine Steuerscheibe gedreht, und diese schiebt mittels einer Gabel — je nach der Drehrichtung — entweder den geraden Riemen von rechts oder den gekreuzten Riemen von links von der losen Scheibe auf die feste Scheibe. Die Welle des Fahrstuhlantriebs beginnt nun, sich zu drehen und setzt durch eine Zahnrad-Übertragung die Seiltrommel in Bewegung. Der gerade Riemen bewirkt ein Aufwickeln des Seils in der einen Richtung, so daß der Fahrkorb sich senkt, der gekreuzte Riemen läßt ihn wieder steigen.



164. Handaufzug mit Haspelseil
Carl Flohr, Berlin

Dieser Transmissionsantrieb ist seit langem trefflich durchgearbeitet und hat gute Dienste geleistet. Er durfte jedoch von jeher nur zur Bewegung von Lasten-Fahrstühlen, nicht für Personen-Beförderung, benutzt werden, da die Sicherheit mancherlei zu wünschen übrigläßt.

Erst die Einführung des Wasserdrucks als Treibmittel führte den Übergang vom Lastenfahrstuhl zum Personen-Fahrstuhl herbei. Man gelangte mit Hilfe des Preßwassers zu Anlagen, deren Verläßlichkeit und Sicherheit nicht wieder erreicht worden ist. Wäre der Wasserdruck-Fahrstuhl nicht so schwerfällig in der Bauart, ließe er jede gewünschte hohe

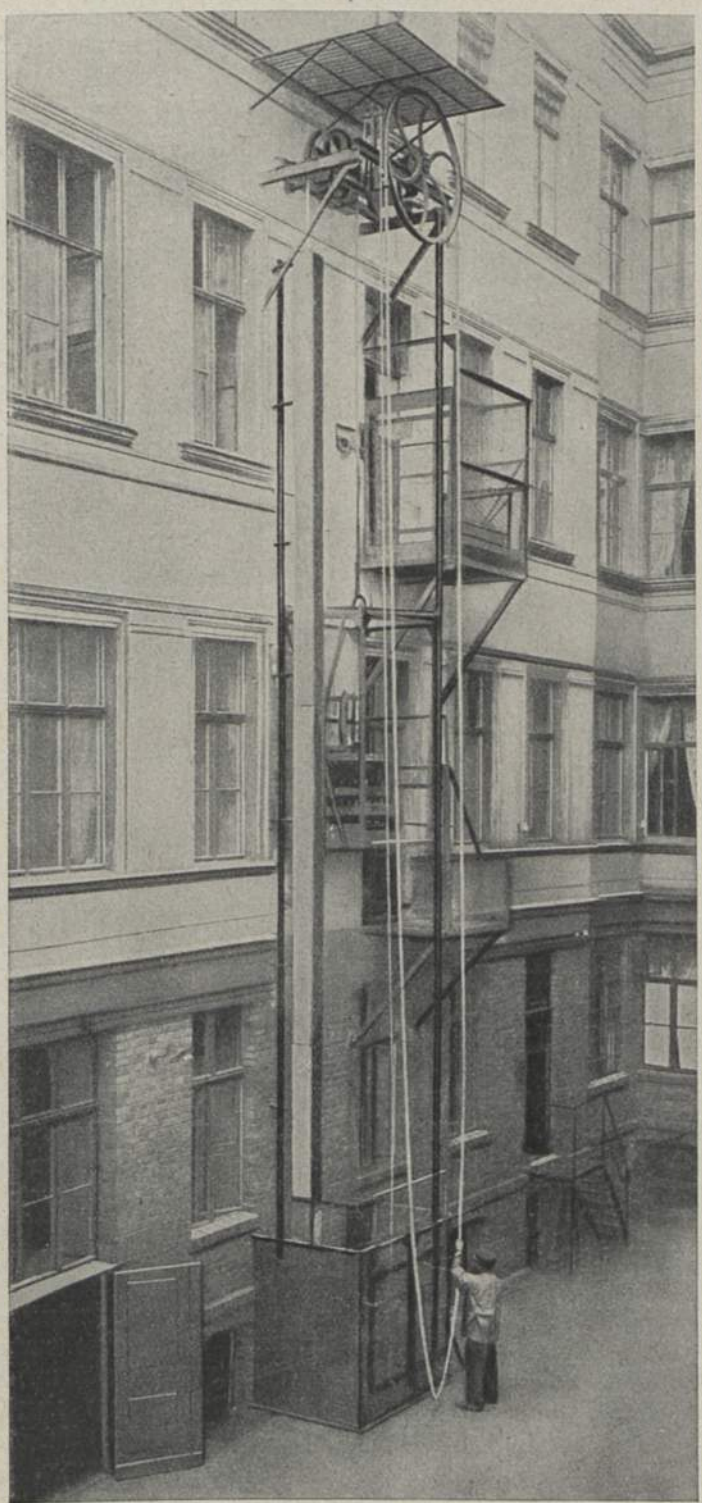
Fahrgeschwindigkeit zu, man würde sich seiner noch heute in den Häusern ausschließlich bedienen, da bei dieser Bauart ein Abstürzen der Fahrkammer nahezu unmöglich ist, wenn unmittelbarer Antrieb angewendet wird.

Vollkommen sicher ruht der Boden der Fahrkammer hierbei auf dem Druckkolben (Bild 166). Die Kraft wirkt auf den Kolben sogleich in senkrechter Richtung, so daß eine Übersetzung durch Rollen nicht notwendig ist. Es wird unter dem Fahrstuhlschacht ein zylindrisches Eisenrohr in den Boden versenkt, das so lang ist wie die Fahrbahn des Aufzugs. Durch eine Dichtung am Rohrmund wird ein langer Tauchkolben eingesetzt; er trägt am oberen Ende eine eiserne Plattform, auf welche die Fahrkammer geschraubt ist.

Sobald Druckwasser in das versenkte Rohr tritt, drückt es den Kolben empor, so daß die Fahrkammer gehoben wird. Ablassen des Druckwassers durch eine schmale Öffnung führt ein Absenken von Kolben und Kammer durch die eigene Schwere herbei. Wenn sowohl der Einlaß wie der Auslaß für das Wasser geschlossen sind, steht die Vorrichtung still. Da der Kolbenkörper sehr schwer sein muß, damit auch bei unbelasteter Fahrkammer das selbsttätige Niedergehen erfolgt, hat er stets einen überreichlichen Durchmesser, so daß niemals ein Absturz durch Kolbenbruch stattfinden kann. Auch Entweichen des Druckwassers kann hierzu nicht Ursache sein, da es durch den engen Auslaß nur langsam hinauszuströmen vermag.

Die Steuerung erfolgt mit Hilfe eines endlosen Seils, das, oben und unten über Rollen gelegt, durch den ganzen Fahrstuhlschacht läuft. Hierbei liegt die eine Seilhälfte in der Fahrkammer. Daran angelenkt ist ein Winkelhebel, der eine fest auf dem Boden des Schachts stehende Schieber-Vorrichtung betätigt. Der Schieber öffnet in einer seiner Stellungen den Zutritt des Druckwassers in den versenkten Zylinder, in der Mittelstellung schließt er ab, in der dritten Lage gibt er die Austrittöffnung für das Wasser frei. Soll aufwärts gefahren werden, so muß der Führer eine Bewegung machen, als wenn er sich an dem Steuerseil in die Höhe ziehen wolle. Er zerrt also das Seil nach unten. Für das Anhalten ist nichts weiter notwendig, als das Steuerseil fest zu packen. Die Bewegung der Fahrkammer führt sodann von selbst das Stillsetzen herbei. Um vom Abwärtsfahren zum Stillstand zu kommen, ist ebenso zu handeln, denn hierbei ist durch Hinaufziehen des Steuerseils angefahren worden.

Das für den Betrieb erforderliche Druckwasser wird, wo das erlaubt ist, der städtischen Wasserleitung entnommen. Meist aber gestattet diese nicht den unmittelbaren Anschluß, weil das plötzliche Entnehmen größerer Wassermassen für das Gesamtrohrnetz ungünstig ist. Alsdann muß ein Zwischenbehälter angeordnet werden, der möglichst hoch, also meist auf dem Dachboden, aufgestellt wird. Ein darin untergebrachtes Schwimmerventil sorgt dafür, daß sich stets genügend Wasser in dem Behälter befindet. Für Häuser, in denen mehrere Fahrstühle laufen, legt man meist eine eigene Pumpanlage zum Füllen des Behälters an.



165. Fabrikfahrstuhl mit Antrieb durch Handhaspel
Carl Flohr, Berlin

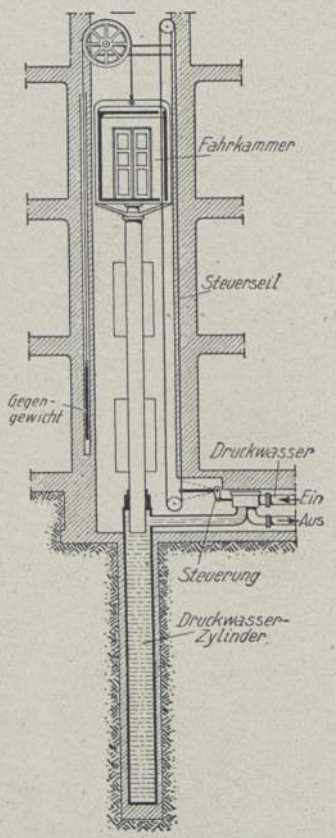
Der Betriebsdruck entsteht durch den Höhenunterschied zwischen dem Wasserspiegel im Behälter und der Unterfläche des Tauchkolbens. Wenn dieser sich in der tiefsten Lage befindet, ist der Druck also am stärksten. Er nimmt mit jedem Zentimeter ab, um das die Fahrkammer steigt, so daß beim Aufwärtsfahren eine Abnahme der Fahrgeschwindigkeit eintreten würde, wenn keine Gegenmaßregel vorgesehen wäre. Das geschieht aber durch geschickte Anbringung eines Gegengewichts, das von selbst schwerer wird, je höher die Fahrkammer steigt.

Das Gewicht besteht nämlich aus einem breiten, schmiegsamen Drahtgurt, der am Dach der Fahrkammer befestigt ist und über eine breite Rolle am oberen Ende des Fahrstuhlschachts läuft. Befindet sich die Fahrkammer in tiefster Lage, dann ragt nur ein kurzes Gurtstück in die Gegenbahn hinein. Je mehr die Kammer sich hebt, je weiter also die Druckhöhe des Wassers abnimmt, desto mehr gleitet von dem Gegengewichtsgurt hinüber und hilft demgemäß beim Aufwärtsfahren. Man erzielt auf diese

Weise eine schöne Gleichmäßigkeit des Gangs. Niemals aber darf das Gegengewicht so schwer werden, daß das selbsttätige Niedergehen von Fahrkammer und Kolben beim Öffnen des Wasserauslasses verhindert wird.

Der Drahtgurt kann durch ein einfaches, an langen Seilen hängendes Gegengewicht ersetzt werden, wenn man das Betriebswasser nicht in einen offenen Behälter pumpt, sondern das Gefäß luftdicht zudeckt, so daß beim Pumpen die Luft über dem Wasser zusammengedrückt oder von diesem ein schweres Gewicht gehoben wird. Die bei der Entnahme von Wasser sich ausdehnende Luft oder das absinkende Gewicht erzeugen alsdann den Wasserdruck, der nun von der Lage des Tauchkolbens unabhängig ist.

Lästig ist beim unmittelbaren Wasserdruck-Antrieb neben geringer Fahrgeschwindigkeit vor allem das Einsenken des langen Druckzylinders in den Boden. Zur Schaffung einer Anlage für ein vierstöckiges Haus mußte man nahezu 20 Meter tief hinabgehen, wobei meist schon mit dem Grundwasser zu kämpfen war. Die Anordnung mit unmittelbarer Förderung wird deshalb heute nur noch in Sonderfällen und meist für ganz geringe Höhen verwendet. In Betracht kommen Hebebühnen zur Lastenbewegung von einem Fabrik- oder Lagerhof in den Keller, Gepäckaufzüge auf Bahnhöfen und Brücken, die bei der Durchfahrt von Schiffen nicht aufgeklappt oder gedreht, sondern bei unverändert wagerechter Lage ihrer Fahrbahn um ein kurzes Stück gehoben werden, und als einzige Vorrichtungen mit größerer Hubhöhe die Schiffshebewerke in Kanälen (Band III).

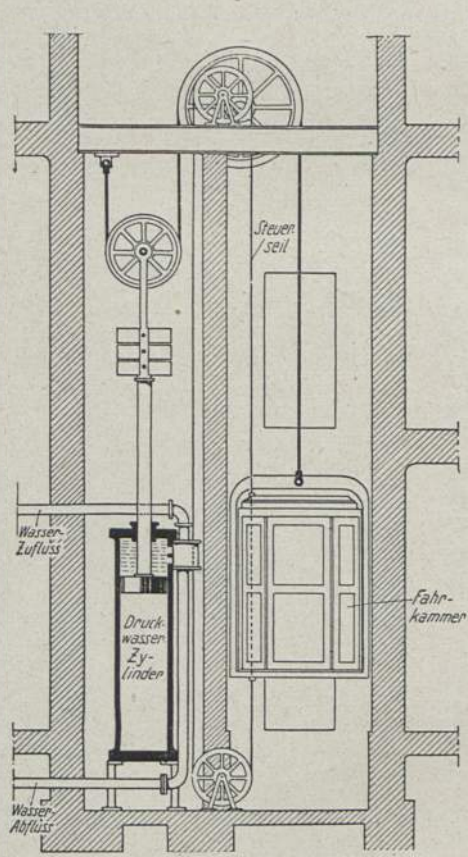



166. Einrichtung eines Fahrstuhls mit unmittelbarem Druckwasser-Antrieb

In allen anderen Fällen ist eine Betriebsweise vorzuziehen, die zwar weder so einfach noch so sicher ist wie die ältere, dafür aber größere Geschwindigkeit und bequeme Aufstellung des Druckgeräts gestattet. Aufzüge, die mittelbaren Druckwasserantrieb haben, werden noch heute an Orten gebaut, die keinen Anschluß an ein elektrisches Versorgungsnetz besitzen.

Der Grundgedanke der Anordnung ist, die Hubhöhe des Druckkolbens dadurch zu verringern, daß zwischen ihn und die Kammer eine Hubübersetzung geschaltet wird. Wie wir auf Bild 167 sehen, zieht die Stange, die an dem scheibenförmigen Kolben im Druckzylinder befestigt ist, eine lose Rolle nieder. Das Tragseil für die Fahrkammer — in Wirklichkeit sind es stets zwei — ist links am Träger befestigt, rechts geht es über feste Rollen. Es ist also ein umgekehrter Flaschenzug eingeschaltet, und von Seite 35 her wissen wir, daß der Fahrstuhl nun die doppelte Geschwindigkeit haben wird wie der Druckkolben. Selbstverständlich muß dieser nun auch die doppelte Kraftwirkung ausüben. Durch Anbringen weiterer loser Rollen kann die Schnelligkeit nach Belieben erhöht werden.

Die Fahrkammer hängt jetzt wieder an Seilen ohne Unterstützung, eine vielteilige Anordnung ist bei jedem Hub zu betätigen. Dafür gewinnt man aber den Vorteil, daß der Druckzylinder sehr kurz sein kann, daß man ihn in wagerechter wie in senkrechter Stellung, im Fahrstuhlschacht oder neben diesem aufstellen kann. Das Gegengewicht wird durch Auflegen gußeiserner Scheiben auf die Kolbenstange gebildet. Die Steuerung erfolgt in derselben Weise, wie sie vorher geschildert wurde. Das Druckwasser tritt jedoch nicht unter den Kolben, sondern über diesen, so daß er niedergedrückt wird, während er die Kammer hebt.




167. Einrichtung eines Fahrstuhls mit mittelbarem Druckwasser-Antrieb

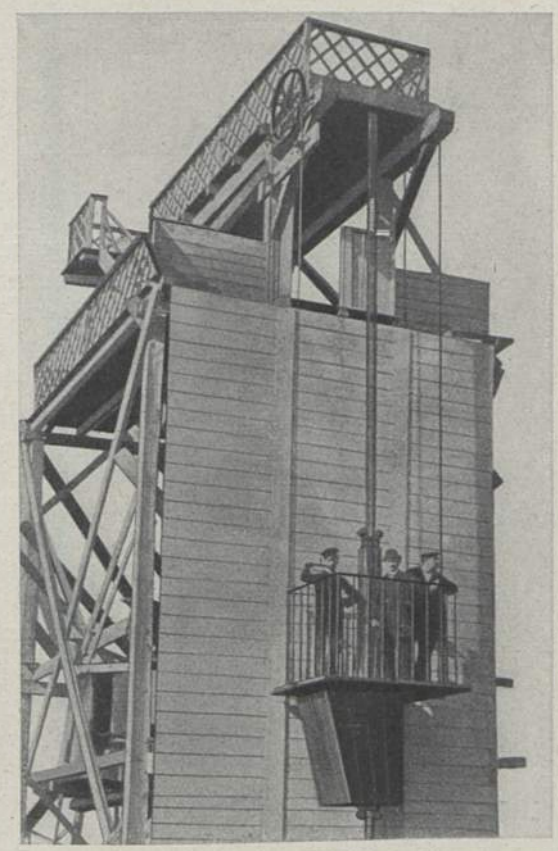
*

Das elektrische Zeitalter im Fahrstuhlbetrieb hat Einrichtungen geschaffen, die jeglichem noch so hoch gestellten Anspruch zu genügen vermögen. Der Elektromotor begnügt sich mit dem bescheidensten Aufstellungsplätzchen, er läuft ohne zwischengeschaltete Übersetzung mit jeder gewünschten Geschwindigkeit, gestattet das Anbringen von Steuerungen, die durch ein Kind betätigt werden können, und erlaubt den Einbau von Sicherungen, an die früher nicht zu denken war. So hat er den Druckwasserantrieb gänzlich besiegt. Sehr viel Erfindungskraft mußte allerdings aufgewendet werden, bis die elektrischen Aufzug-Einrichtungen zu ihrer heutigen Vollkommenheit entwickelt waren. Der erste Fahrstuhl mit Motorantrieb hatte keine sonderlich bestechende Form.

Werner Siemens hat ihn selbst im Jahre 1880 auf der Industrie-Ausstellung in Mannheim eingerichtet. Er diente dazu, die Besucher auf einen Aussichtsturm von 20 Metern Höhe zu heben (Bild 168). In scharfem Gegensatz zu der heute allgemein üblichen Bauart war der Antriebmotor damals nicht fest aufgestellt, sondern in einem hölzernen Kasten unter der Fahrkammer angebracht. Er bewegte sich also mit dieser hinauf und hinab. Der Anker der Maschine mit senkrecht angeordneter Welle drehte eine Schnecke. Durch diese wurden zwei Zahnräder in Bewegung gesetzt, die von rechts und von links her in die Sprossen einer Leiterzahnstange eingriffen. Diese führte vom Boden bis zur Spitze des Aussichtsturms und lief durch das Innere der Fahrkammer. Damit die Zahnstange von den Fahrgästen nicht berührt werden konnte, war eine Schutzhülle in der Kammer aufgestellt. Der Antrieb mitsamt der Fahrkammer kletterte Schritt für Schritt an der Leiter

empor und ging bei umgekehrter Fahrtrichtung Stufe für Stufe hinunter. Wenn der Strom ausgeschaltet war, blieb die Fahrkammer stehen, da die Schnecke durch die Zahnräder nicht rückwirkend in Bewegung gesetzt werden konnte, sondern selbstsperrend war.

Es sind in den wenigen Wochen der Mannheimer Ausstellungszeit 8000 Personen mit dem Aufzug auf den Turm befördert worden. Man muß deren Vertrauen zu der Einrichtung bewundern, denn das Brechen eines Leiterzahns oder eines Zahnrads hätte durch den darauffolgenden Stoß der fallenden Kammer wahrscheinlich Absturz bis zum Boden herbeigeführt. Die Bauart ist geistreich wie alles, was Werner Siemens geschaffen hat, der praktische Betrieb aber mußte andere Wege einschlagen.



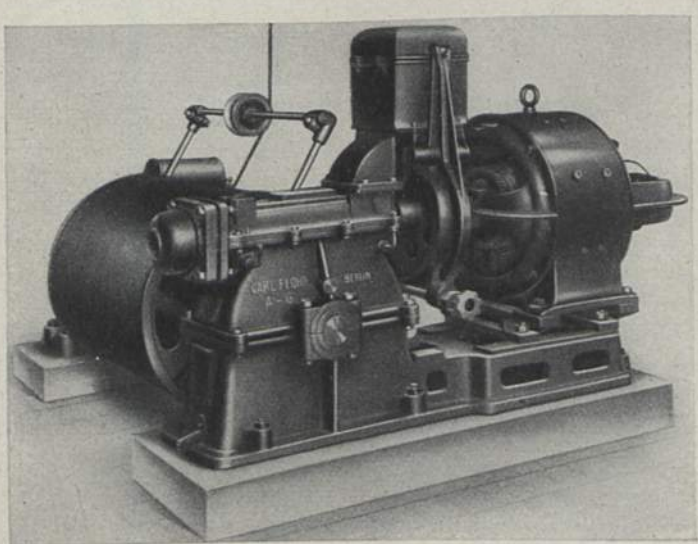
168. Erster elektrischer Aufzug von Werner Siemens
Siemens-Schuckert-Werke, Berlin

Bei den allermeisten elektrischen Aufzügen der heutigen Zeit steht der Antriebmotor im Keller, wo er durch Schnecke und Schneckenrad die Seiltrommel bewegt (Bild 169). Diese hat schraubenförmige Riefen, um ein sauberes Aufwickeln der Seile herbeizuführen. Es sind bei Aufzügen für Personenbeförderung stets zwei Seile um die Trommel geschlungen (die Zeichnung Bild 170 stellt nur eins dar), da die Aufsichtsbehörde doppelte Aufhängung vorschreibt. Jedes Seil muß so stark sein, daß es allein das Zehnfache der Höchstlast mit Sicherheit zu tragen vermag. Das eine Ende jedes Seils ist oben am Gerüst der Fahrkammer befestigt. Alsdann läuft es über eine Lenkrolle am oberen Ende des Fahrstuhlschachts und ist dann zur Seiltrommel hinabgeführt. Diese wird mehrere Male umwunden, worauf das Seil zu einer zweiten und dritten Lenkrolle droben emporsteigt und nun seitwärts abgebogen wird, um mit seinem zweiten Ende das Gegengewicht zu tragen. Dieses Gewicht, meist aus schmalen Gußeisen-Klötzen bestehend, ist so bemessen, daß es das Gewicht der Fahrkammer und der halben Nutzlast ausgleicht. Hierdurch ist man imstande, mit der geringsten Arbeitsleistung für jede Förderung auszukommen.

Es wird heute kein großes Geschäfts-, kein gutes Wohnhaus mehr gebaut, ohne daß es sogleich eine elektrisch betriebene Fahrstuhlanlage erhielte. Der Aufzug wird entweder in einem gemauerten Schacht untergebracht, oder man gibt ihm eine offene Bahn innerhalb des Haupttreppenlaufs. Viele Eigentümer älterer Häuser sind bestrebt, den Wert ihres Besitzes durch nachträglichen Einbau eines Fahrstuhls zu erhöhen. Oft ist es nicht mehr möglich, innerhalb des Hauses Platz für die Fahrbahn zu schaffen. Der Aufzug wird dann auf der Hofseite vor der Mauer angebracht. Man findet die verschiedenartigsten Lösungen dieser Aufgabe. Manchmal genügt es, die Flurfenster als Zugangtüren auszubauen; hier und da kann man Balkone als Einstieg benutzen, oder es müssen besondere Erkeraus-bauten geschaffen werden.

Wo aber auch der Fahrstuhl laufen möge, überall ist dafür zu sorgen, daß die Zugänge zu seiner Fahrbahn verschlossen sind, solange sich die Kammer in Bewegung befindet. Steht irgendwo eine Tür offen, so darf es nicht möglich sein, die Maschine einzuschalten. Jedes Türschloß wird durch eine Sperrung zugehalten, die nur dann von selbst aufgeht, wenn die Fahrkammer einsteigebereit vor dem Eingang steht. Die Formen dieser Türsicherungen sind verschieden. Der Grundgedanke aber ist immer, daß eine besondere, an der Kammer angebrachte Gleitschiene gegen einen Anschlag läuft und hierdurch die Hemmung vom Schloß entfernt (Bild 171, 172). Diese recht einfache Vorrichtung, die neuerdings freilich schon wieder zu einem mechanischen Kunstwerk vervollkommnet ist, stellt eine treffliche Sicherung gegen eine große Zahl von Unfällen dar.

Man kann es sich gar nicht mehr vorstellen, daß früher sehr häufig Schachttüren offen standen, während der Fahrstuhl in Bewegung war. Da kam es gar nicht so selten vor, daß ein unvorsichtig hineingesteckter Kopf bös verletzt wurde, oder daß jemand in den Schacht hinabstürzte, weil er fälschlich glaubte, daß die Kammer vorgefahren sei. Um gerade diesem letzterwähnten schweren Irrtum vorzubeugen, ist heute sogar vorgeschrieben, daß in der Kammer jedes elektrischen Fahrstuhls sofort eine Lampe aufleuchten muß, wenn die Tür geöffnet wird, vor der die Kammer vorgefahren ist. Sollte also wirklich einmal eine Schloßsicherung versagen, dann wird dennoch niemand in den leeren Schacht treten, weil er aus Erfahrung weiß, daß die Betretbarkeit durch Licht angezeigt wird.



169. Antriebmotor für elektrische Fahrstühle

Bei Fahrstuhlanlagen, die in einem Schacht eingeschlossen sind, wird meist der jeweilige Stand der Kammer durch eine Anzeige-Vorrichtung nach außen kundgemacht. Am einfachsten ist die Betätigung von Zeigern in jedem Stockwerk durch ein Drahtseil, das in den Fahrstuhlschacht herniederhängt und durch ein angehängtes Gewicht straff gehalten wird. Das Seil wickelt sich auf einer Trommel auf und ab, die mit dem Fahrstuhlantrieb läuft, aber infolge einer zwischengeschalteten Übersetzung sehr viel weniger Umdrehungen macht als die Tragseilrollen. Während die Kammer einen Weg von mehreren Metern zurücklegt, bewegt sich das Seil nur um wenige Zentimeter. Ist der Fahrkorb von einem Stockwerk ins andere gelangt, dann haben die am Drahtseil für jedes Stockwerk angebrachten Zeiger nur die Entfernung zwischen zwei Reihen einer kurzen Zahlentafel zurückgelegt. Auf die gleiche Art können auch sogenannte Drehzeiger betätigt werden, indem das Drahtseil im Schachtinneren neben jeder Zugangtür um eine Scheibe geschlungen ist.

Der elektrische Standortanzeiger, bei dem Lämpchen hinter oder neben Schrifttäfelchen aufleuchten, wird mittels Kette oder Zahnrads von der Seiltrommel her betrieben (Bild 173). Auf eine runde Scheibe sind so viel Kontakte gesetzt, wie Stockwerke vorhanden sind; sie werden abwechselnd, der Trommelstellung entsprechend, zur Einschaltstelle geführt.

Bei offen laufenden Fahrstühlen begnügt man sich damit, ein Täfelchen mit der Aufschrift „In Fahrt" beleuchten zu lassen, solange der Fahrstuhl läuft. Das Lämpchen schaltet sich jedoch auch bereits ein, wenn irgendwo eine Tür geöffnet wird, und erlischt auch nicht in der kurzen Zeit, die zwischen dem Schließen der Schachttür und dem Ingangsetzen des Fahrstuhls vergeht, wenn sich ein Fahrgast in der Kammer befindet.

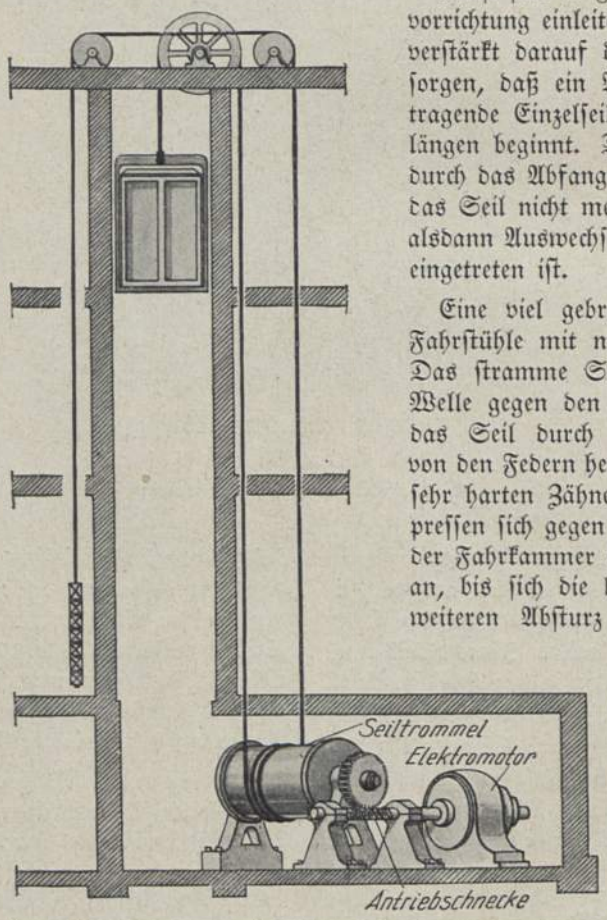
Weitere Sicherheit bietet die Vorschrift, daß, wie auch die Steuerung des Aufzugs beschaffen sein möge, zwei selbsttätige Endausrückungen vorhanden sein müssen. In seiner höchsten und in seiner tiefsten Stellung bringt der Fahrkorb dadurch, daß er gegen Anschläge stößt, die Steuerung in die Nullstellung. Es ist aber auch unmittelbar an der Maschine eine Vorrichtung angebracht, meist aus einer Spindel mit Wandermutter bestehend, die das gleiche bewirkt, wenn der Motor eine gewisse Zahl von Umdrehungen in der einen oder in der anderen Richtung gemacht hat.

Die in bestimmten Abständen erfolgenden behördlichen Prüfungen der Fahrstuhlseile machen es zwar höchst unwahrscheinlich, daß eines von ihnen während des Betriebs reißt, zumal doch jedes das Höchstgewicht zehnmal zu tragen vermag, trotzdem aber sind Fangvorrichtungen vorgeschrieben. Ihr Bau ist nun wieder ein Gebiet, auf dem der Erfindergeist sich sehr lebhaft betätigt hat. Wirklich Brauchbares war jedoch bis vor kurzem nicht geschaffen worden.

Eine Schwäche, die allen älteren Fangvorrichtungen innewohnt, ist, daß sie jahrelang untätig bleiben. Sie pflegen daher zu verschmutzen und zu verrosten, so daß sie im Augenblick der Gefahr entweder gar nicht oder nicht schnell genug zu wirken vermögen. Die abstürzende Fahrkammer nimmt in dem letzten Fall eine zu hohe Geschwindigkeit an, so daß sie die eigentlichen Fangwerkzeuge zertrümmert, wenn diese in Tätigkeit treten, und den Absturz fortsetzt.

Meist sind es Federn, die das Ansprechen der Fangvorrichtung einleiten, die lebendige Kraft der Kammer verstärkt darauf die Wirkung. Gut ist es, dafür zu sorgen, daß ein Abfangen bereits eintritt, wenn das tragende Einzelseil oder eines der Doppelseile sich zu längen beginnt. Der mit der Aufsicht Betraute wird durch das Abfangen darauf aufmerksam gemacht, daß das Seil nicht mehr ganz zuverlässig ist, und er wird alsdann Auswechslung bewirken, bevor noch der Bruch eingetreten ist.

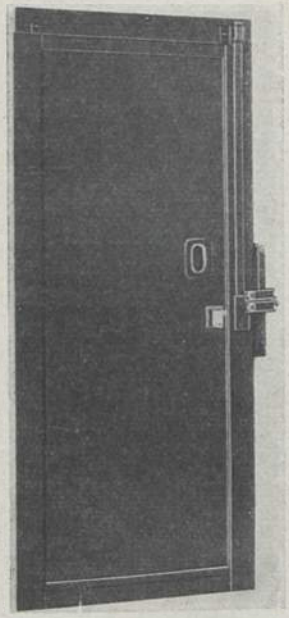
Eine viel gebrauchte Fangvorrichtung für Lasten-Fahrstühle mit nur Einem Tragseil zeigt Bild 174. Das stramme Seil hält mit Hilfe einer Kette eine Welle gegen den Zug kräftiger Federn fest. Sobald das Seil durch Längen erschlafft, wird die Welle von den Federn herumgeworfen, und zwei mit scharfen, sehr harten Zähnen versehene Ansätze an ihren Enden pressen sich gegen die Führungsschienen. Das Gewicht der Fahrkammer drückt die Hemmungen immer fester an, bis sich die harten Zähne eingebissen haben und weiteren Absturz verhindern.




170. Einrichtung eines elektrischen Fahrstuhls

Bei den Fahrstühlen mit zwei Seilen pflegt man die Anwendung der niemals ganz zuverlässigen Federn dadurch unnötig zu machen, daß für das Auslösen der Fangvorrichtung die Verschiebung der Seile gegeneinander benutzt wird. Es ist ja nicht anzunehmen, daß beide gleichzeitig bersten, vielmehr wird das eine sich strecken, während das andere in seiner Länge unverändert bleibt. Läßt man die Seile nun an den beiden Enden eines eisernen Balkens angreifen, der um einen Mittelbolzen drehbar ist, so wird dieser gewöhnlich wagerecht stehen, da seine beiden Arme gleich stark gezogen werden. Geht das eine Seil zu Bruch, oder beginnt es auch nur, sich zu längen, dann reißt das andere den eisernen Balken herum, der nun mittels eines Gestänges scharf gezähnte Keile so zwischen Fahrkammer und Führungsschienen drückt, daß sich die Kammer auf diese beim weiteren Absinken setzt und alsbald festfährt.

Um den Fahrgästen Gelegenheit zu geben, auch selbst etwas zu ihrer Sicherung beizutragen, wenn Gefahr eintritt, werden neuerdings unter den Decken der Fahrkammern Notbremsgriffe angebracht. Durch Ziehen daran kann eine zweite Hilfsfangvorrichtung in Tätigkeit gesetzt werden. Es liegen bis jetzt noch keine Erfahrungen darüber vor, wie diese



171. Selbsttätige Türsicherung
Tür geschlossen
Carl Flohr, Berlin

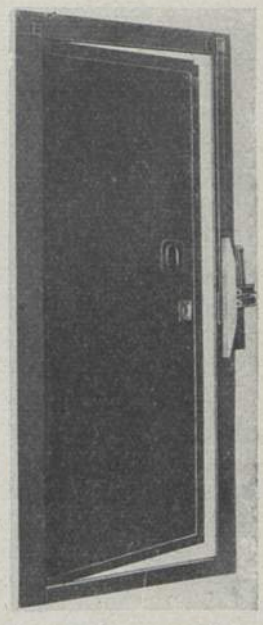
Fahrstuhl-Notbremsen im Betrieb wirken.

Es kann geschehen, daß sich die Fahrkammer beim Abstieg festklemmt. Liefe die Maschine nun unbehindert weiter, dann würde sie immer mehr Seil abwickeln, so daß die Kammer ihre straffe Aufhängung verlöre. Um das zu vermeiden, ist über der Seiltrommel die selbsttätige Schlaffseil-Ausrückung angebracht (Bild 169). Ein mit Laufrolle versehener Querbalken lehnt sich leicht gegen die Seile. Wird eines von ihnen schlaff, so senkt sich der Balken und schaltet die Maschine aus. Wenn die Fahrkammer sich beim Aufwärtsfahren festklemmt, dann wächst der Stromverbrauch des schwer arbeitenden Motors sofort über das zulässige Maß, und die Folge ist, daß eine Sicherung in der Zuleitung durchbrennt. Wiederum bleibt die Maschine sogleich stehen.

Die Tragfähigkeit der Seile wird besonders stark gemindert durch das immer wiederkehrende Biegen um Windentrommel und Seilrollen. Es tritt hierdurch allmählich eine Ermüdung des Baustoffs der Seile ein, durch welche die Moleküle den festen Zusammenhalt verlieren. Deshalb ist es notwendig, die Seile nach einer bestimmten Anzahl von Fahrten auszuwechseln. In Aufzugbetrieben, bei denen regelmäßiger Verkehr herrscht, wo also die Kammer täglich eine bestimmte Zahl von Fahrten macht, findet die Seilerneuerung in gleichen Zeitabständen statt, deren Größe ein für allemal aus der Erfahrung ermittelt ist. Bei stark wechselndem Betrieb aber gibt die Aufliegezeit keinen Anhalt für den Ermüdungszustand der Seile. Deshalb ist ein Seilwegzähler gebaut worden, der, durch ein Zahnrad mit der Windentrommel verbunden, die Fahrten an einem Zählwerk verzeichnet. Er zählt die Seilbewegungen in beiden Richtungen zusammen, da sich in seinem Inneren eine entsprechende Umschalt-Vorrichtung befindet. Wenn auf dem Zählwerk erkannt wird, daß die Seile eine bestimmte Kilometerzahl durchlaufen haben, so ist die Zeit für die Erneuerung gekommen, da Weiterbenutzung leicht zum Bruch führen könnte.

Gefahr könnte weiter entstehen, wenn durch irgendeinen Umstand die zulässige Fahrgeschwindigkeit überschritten würde. Um dies zu verhindern, ist ein Geschwindigkeitsregler angebracht. Er gleicht in seinem Bau dem bekannten Schwungkugel-Regler bei Dampfmaschinen. Das Getriebe des Fahrstuhls versetzt mittels Zahnräder die Schwungkugeln in Umdrehung, die bei Überschreitung der festgesetzten Höchstgeschwindigkeit sehr weit auseinandergehen und hierbei ein Gleitstück auf dem Mittelständer des Reglers anheben. Dieses wirkt auf die Steuerung ein und schaltet den Motor ab.

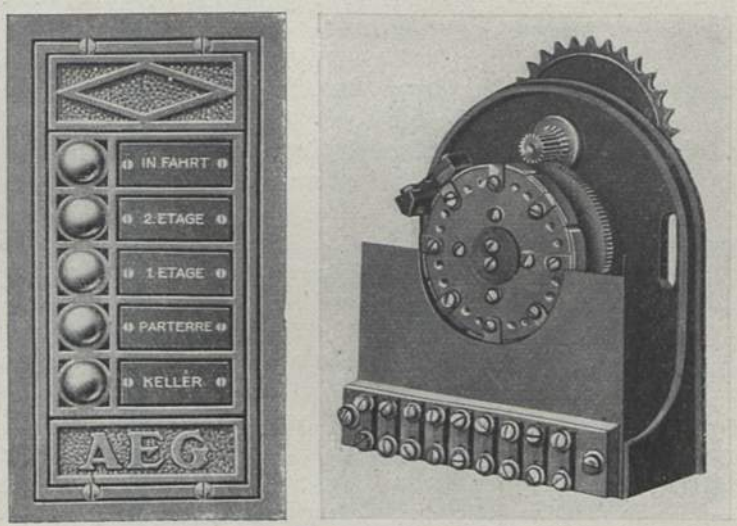
Die elektrischen Fahrstühle wurden im Anfang in derselben Weise durch einfachen Seilzug gesteuert wie die wassergetriebenen Aufzüge. An die Stelle des Schiebers auf Bild 166 tritt alsdann der Kontakthebel des Umkehranlassers, der durch die Bewegung des Steuerseils gedreht wird. Liegt dieser Hebel in der äußersten Lage oben, dann ist der Motor für die eine, steht er ganz unten, ist die Maschine für die andere Drehrichtung geschaltet. In der Mitte befindet sich die Aus!-Stellung. Von dieser her darf jedoch nicht ohne weiteres auf volle Fahrt übergegangen werden, da jeder größere Elektromotor nur über Anlaßwiderstände in Gang gesetzt werden darf. Die Ankerwicklungen des Motors würden nämlich durchbrennen, wenn man ihnen bei Stillstand sogleich den vollen Strom zuführte. Es sind daher zwischen der mittleren Nullstellung und den beiden äußeren Fahrtstellungen mehrere Kontakt-Knöpfe vorgesehen, zwischen denen Widerstände liegen. Dadurch, daß der Kontakthebel des Umkehranlassers bei seiner Drehung einen dieser Knöpfe nach dem anderen berührt, findet stufenweises Ausschalten der Widerstände und gefahrloses Anlassen statt.



172. Selbsttätige Türsicherung
Tür geöffnet
Carl Flohr, Berlin

Die Steuerung muß so wirken, daß der Boden der Fahrkammer beim Anhalten stets bündig mit dem Hausflur stehenbleibt. Damit dies geschieht, genügt es nicht, den Betriebsstrom im letzten Augenblick abzuschalten. Denn Motoranker, Seiltrommel, Seile und Fahrkammer besitzen ja recht beträchtliche Massen, deren lebendige Kraft nicht ohne weiteres verschwinden kann. Der Strom muß daher schon wenige Sekunden vor dem Erreichen des Ziels abgestellt werden, worauf eine Bremse in Tätigkeit tritt.

Auf der Welle, die den Motor mit der Antriebschnecke verbindet, ist zu diesem Zweck eine fest aufgekeilte Bremsscheibe angebracht. Gegen diese werden für gewöhnlich durch eine kräftige Feder Bremsbacken oder ein Bremsband gedrückt. Sobald aber die Steuerung auf Fahrt geschaltet wird, erhält ein Bremslüftmagnet Strom, der nun entgegen dem Federzug die Bremsvorrichtung von der Scheibe abhebt. Wenn durch den Steuer-Apparat Abschaltung stattgefunden hat, hört auch der Stromzufluß zum Brems-

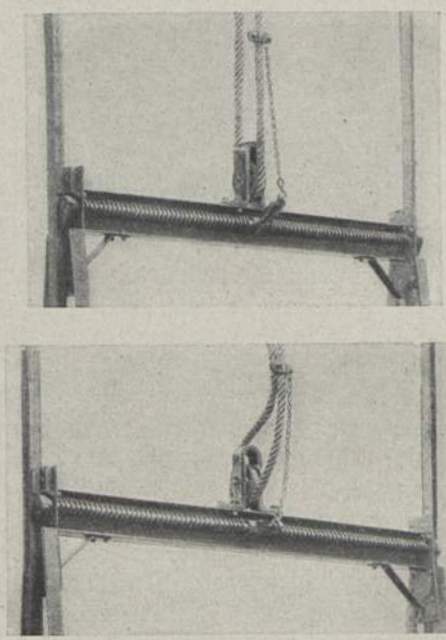



173. Elektrischer Standortanzeiger (links) und Antriebsvorrichtung dazu (rechts)
Ausführung der AEG, Berlin

lüftmagneten auf, und die Bremse fällt ein, so daß die Fahrkammer alsbald zum Stillstand kommt.

Den schnellaufenden elektrischen Fahrstuhl durch einfachen Seilzug zu steuern, ist jedoch eine Kunst. Allzuleicht kann es vorkommen, daß ein Übersteuern stattfindet, daß der Führer also das Seil beim Anhalten zu früh packt, so daß es die Steuerung über die Nullstellung hinaus sogleich in die umgekehrte Fahrtrichtung bringt. Wo noch bei Personen-Fahrstühlen mechanische Steuerung vorgesehen ist, verwendet man daher zu ihrer Betätigung eine Kurbel. Deren Wirkungsweise ist nur durch ein ganz genaues Verfolgen des Seillaufs auf Bild 175 zu verstehen.

In Einem Zug läuft das Steuerseil von der Aufhängung a am Fahrkammerdach über die Leitrolle b unter der Schachtabdeckung nach unten zu der Umlenkrolle c. Von hier aus ist das Steuerseil über die Steuerrolle d geführt, die an einem schwenkbaren Hebel befestigt ist. Weiter geht es nun zur Umlenkrolle e und alsdann zur Fahrkammer hinauf, wo eine Gelenkkette in das Seil geschaltet ist. Diese Kette ist außen hinter einer Seitenwand der Fahrkammer um ein Kettenrad gelegt, das durch die im Inneren angebrachte Kurbel bewegt werden kann. Von neuem steigt das Steuerseil jetzt ab, läuft um die Umlenkrolle f, eine zweite Steuerrolle g, Umlenkrolle h, Tragrolle i unter der Schachtdecke zum Befestigungspunkt k am Kammerdach. Die Enden der beiden Schwenkhebel, welche die Steuerrollen d und g tragen, sind durch eine Gelenkkette miteinander verbunden, durch deren Bewegung die Steuerung beeinflußt wird.



174. Fangvorrichtung für Lastenfahrstühle mit einem Tragseil
Oben: Das straffe Tragseil hält die Hemmvorrichtung offen
Unten: Bei Erschlaffen des Tragseils tritt die Hemmung in Tätigkeit. Carl Flohr, Berlin

Wenn der Fahrstuhl in Bewegung ist, drehen sich sämtliche Rollen, über die das Steuerseil läuft, aber es wird keine Kraftwirkung auf die beiden Steuerrollen ausgeübt, durch welche die Stellung ihrer Traghebel verändert werden könnte. Sobald aber die Kurbel in der Fahrkammer gedreht und damit die Gelenkkette im Seil verschoben wird, längt sich der eine Teil des Steuerseils, während der andere verkürzt wird. Ein Ausgleich dieser Längen-Änderungen in dem geschlossenen Seil kann nur dadurch eintreten, daß die Schwenkhebel der Steuerrollen ihre Lagen ändern. Es wird ein entsprechender Zug auf die Steuerkette ausgeübt und der Anlasserhebel durch die Steuerwelle gedreht.

Die Steuerung der Aufzugmaschine von der Fahrkammer her läßt sich jedoch am besten auf elektrischem Weg bewirken, der immer der bequemste ist, wenn eine Wirkung zwischen zwei Gegenständen übertragen werden soll, die ihre Lage zueinander ändern. Die Verbindung zwischen Motor im Keller und Schaltkurbel in der Kammer wird bei elektrischer Steuerung durch feste Leitungen hergestellt, die bis zur halben Höhe des Fahrstuhlschachts gehen und sich alsdann in einem biegsamen Kabel fortsetzen. Dieses ist am Kammerboden befestigt, wo jeder einzelne Draht an eine Klemme gelegt und einzeln weitergeleitet wird. Das Hin- und Herführen des biegsamen Kabels durch die Fahrkammer bedeutet nur eine geringe Mehrbelastung, die Leitungsanordnung aber wird auf diese Art sehr viel einfacher, als wenn man über die ganze Schachtlänge feste blanke Leitungen verlegen würde, an denen Stromabnehmer gleiten, wie wir das bei den Krankatzen gesehen haben. Damit die stromführenden Drähte keine mechanische Belastung auszuhalten haben, ist in das Kabel ein tragendes Drahtseil eingesponnen.

Die Steuerkurbel in der Kammer wird gerade so bewegt wie die Kurbel der eben geschilderten mechanischen Steuerung. Sie wirkt mit Hilfe eines Schaltmagneten auf den Anlasser ein, der neben dem Motor aufgestellt ist. Die Drehwelle der Kurbel ist durch die Kammerwand hindurchgeführt und mit einem seitlichen Ansatz versehen. Dieser stößt bei der höchsten und tiefsten Stellung der Kammer gegen feste Anschläge, wenn die Kurbel nicht in der mittleren Ausschalt-Stellung liegt. Es findet also in diesen Fällen selbsttätige Endausrückung statt. Die gleichen Anschläge bewirken, daß in jeder Endstellung der Kammer die Kurbel nur in die richtige Anfahrstellung gedreht werden kann. Will der Führer z. B., wenn sich die Kammer hoch droben befindet, versehentlich wiederum Auffahrt-Stellung einschalten, so kann er die Kurbel nicht in diesem Sinn bewegen.

Bei Personen-Fahrstühlen gibt es nur drei Stellungen der Steuerkurbel: Auf!, Halt! und Ab! Bei großen Lastenfahrstühlen mit hoher Tragfähigkeit aber lassen sich durch die Kurbel drei bis fünf Fahrgeschwindigkeiten schalten. Denn es wäre ja Zeitversäumnis, die leere Fahrkammer vom Erdgeschoß bis zum sechsten Stock gerade so langsam aufsteigen zu lassen, wie wenn eine schwere Maschine darin hochgezogen wird.

Zuverlässig und sicher wirken sowohl die Kurbelsteuerung mit Seilübertragung wie die elektrische Kurbelsteuerung. Sie müssen jedoch stets durch Sachkundige bedient werden, durch Führer, die von der Aufsichtsbehörde geprüft sind. Wenn aber der Fahrstuhl in einem Mietshaus ein wahrhaft wohltätiges Werkzeug sein soll, dann muß er so eingerichtet werden, daß jeder der Bewohner ihn ohne weiteres benutzen kann. Das wird ermöglicht durch den Einbau der Druckknopf-Steuerung, die all ihre Genossen weit übertrifft. Ihre Wirksamkeit grenzt ans Wunderbare.

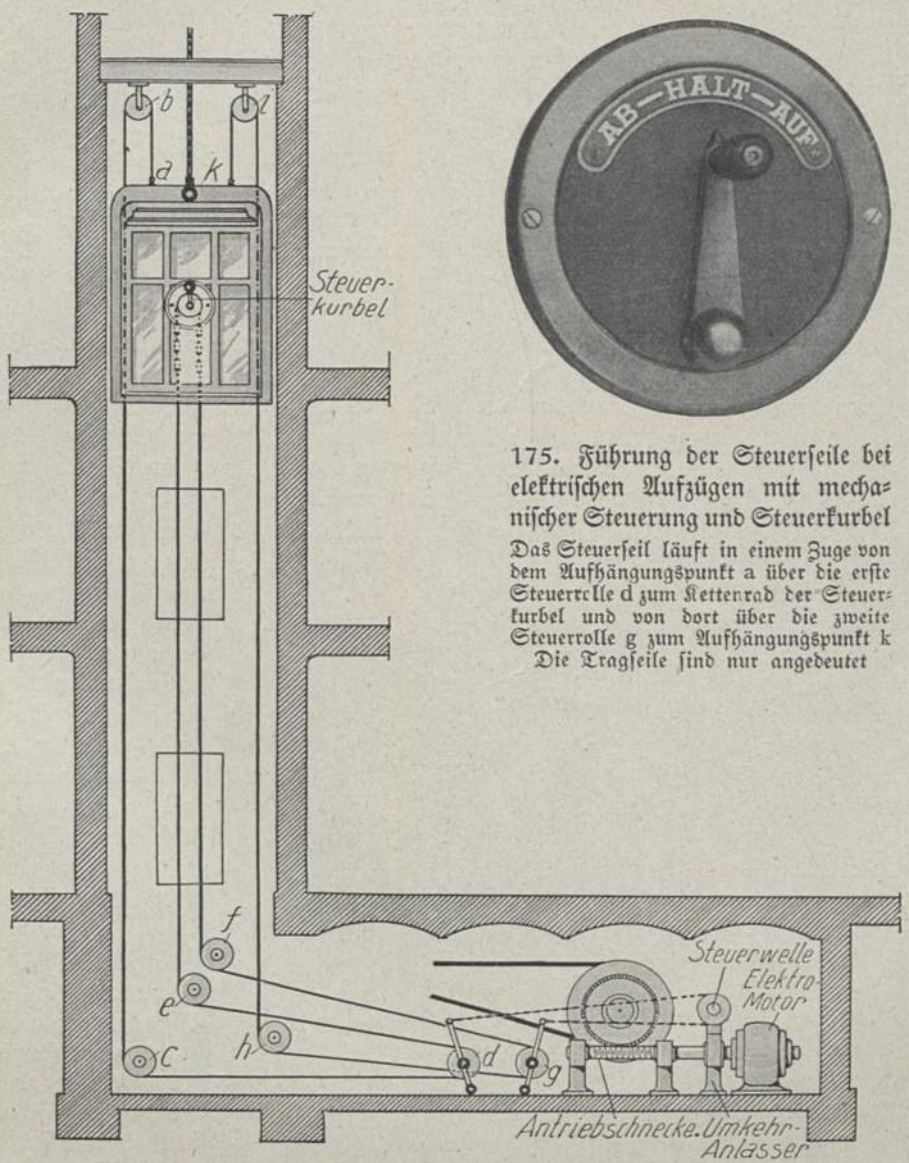
Der Fahrstuhl im Wohnhaus, der zur Bedienung durch jedermann freigegeben ist, scheint nicht mehr eine tote Maschine zu sein, sondern eigenes Denkvermögen zu besitzen.

Die Fahrkammer befindet sich, wie wir annehmen wollen, gerade im dritten Stockwerk. Man drückt im zweiten Stock auf den Knopf, der außen am Fahrstuhlschacht angebracht ist. Die Kammer setzt sich sofort nach unten in Bewegung und hält an der gewünschten Stelle an. Betätigt man aber denselben Knopf in gleicher Weise, wenn die Fahrkammer im Erdgeschoß steht, dann steigt sie empor, so daß es scheint, als sei sie mit unfehlbarem Raumsinn begabt.

In jedem Stockwerk befindet sich eine Zugangtür zum Fahrstuhlschacht. Der zugehörige Schlüssel kann überall leicht in das Schloß eingeführt werden. Aber wenn man die Tür dort zu öffnen versucht, wo die Fahrkammer nicht vorgefahren ist, findet man einen unüberwindlichen Wider-

stand. Nur wenn hinter der Tür Einsteige-Gelegenheit gegeben ist, wenn der Boden der Fahrkammer, der den Flur-Fußboden fortsetzt, ein Abstürzen in den Schacht unmöglich macht, kann die Tür geöffnet werden. Ist dies an irgendeiner Stelle geschehen, dann mag man alle Druckknöpfe, die zur Verfügung stehen, betätigen: es ist unmöglich, eine Bewegung des Fahrstuhls hervorzurufen. Jede nur ein ganz klein wenig geöffnete Tür verhindert das Fahren. Wenn die Kammer sich in Bewegung befindet, sind sämtliche Türen verriegelt.

Im vierten Stockwerk hat jemand den Außenknopf gedrückt, um die Kammer, die im Erdgeschoß steht, hinaufzuholen. Während sie fährt, kommt jemand aus einer Wohnung im zweiten Stockwerk hinaus, mit der Absicht hinabzufahren, und drückt den ihm nächsten Knopf nieder. Nun zeigt es sich, daß der Fahrstuhl neben dem Raumsinn auch Verständnis für das Recht des zuerst Gekommenen besitzt. Ohne sich durch den Fahrlustigen im zweiten Stockwerk irgendwie beirren zu lassen, fährt die Kammer dorthin, von wo der erste Ruf an sie ergangen ist.




175. Führung der Steuerseile bei elektrischen Aufzügen mit mechanischer Steuerung und Steuerkurbel

Das Steuerseil läuft in einem Zuge von dem Aufhängungspunkt a über die erste Steuerrolle d zum Kettenrad der Steuerkurbel und von dort über die zweite Steuerrolle g zum Aufhängungspunkt k
Die Tragseile sind nur angedeutet

Nun könnte aber der Fahrgast im zweiten Stockwerk ein schlauer, fein überlegender Mensch sein und sich sagen: „Gut! Die fahrende Kammer vermag ich in ihrem Lauf nicht zu beeinflussen; sie steht unter dem Bann des anderen. Aber ich weiß ja, daß die Kammer, wenn sie stillsteht, immer meinem Ruf folgt. Nun will ich haarscharf den Augenblick abpassen, in dem die Kammer im vierten Stock zum Stillstand gekommen sein wird; dann werde ich sofort meinen Knopf niederdrücken, worauf ich doch wohl dem Mann dort oben die Fahrmöglichkeit entziehen und sie für mich bereit machen werde!" Der rücksichtslose Mann im zweiten Stockwerk handelt, wie er gedacht hat. Er achtet genau auf den Augenblick, in dem die Fahrkammer stehenbleibt. Er hat ganz richtig überlegt, daß jetzt der Zustand genau so ist, als ob vom vierten Stock gar kein Ruf ausgegangen wäre. Der Mann im zweiten Stock drückt geschwind seinen Knopf nieder, aber — die böse Absicht wird wiederum zuschanden. Er hört, wie droben trotz seines Eingriffs in aller Ruhe die Tür zum Einsteigen geöffnet wird, und weiß, daß ihm bis zur Beendigung der Fahrt des anderen jede Einwirkungsmöglichkeit abgeschnitten ist.

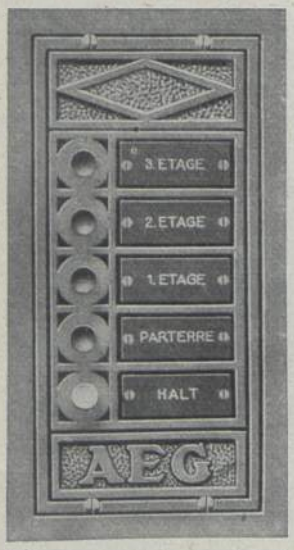
Denn sobald die Fahrkammer betreten wurde, sind alle Außenknöpfe außer Tätigkeit gesetzt. Jetzt kann der Fahrstuhl-Motor nur noch vom Inneren her durch die darin befindlichen Knöpfe (Bild 176) beeinflußt werden. Die besetzte Kammer gehorcht, weder wenn sie stillsteht noch wenn sie fährt, einem Einfluß, der von draußen kommt.

Ein Kind benutzt allein den Fahrstuhl. Es hat während der Reise vom obersten Stockwerk nach dem Erdgeschoß reichlich Zeit, das blanke Feld in der Kammer zu betrachten, aus dem die vielen Druckknöpfe so verlockend hervorschauen. Der Reiz ist gar zu groß, ein wenig an diesen Knöpfen zu spielen; während die Kammer abwärts fährt, drückt das Kind mehrere der Tasten gleichzeitig oder nacheinander nieder. Was geschieht nun? Gerät der Fahrstuhl in Verwirrung? Fängt er an, hinauf- und hinunterzupendeln, so daß die durch harte Stöße beanspruchten Seile schließlich reißen? Nichts davon geschieht! Die überlegene Ruhe des Aufzugs macht jede üble Folge der kindlichen Torheit zunichte. Der jugendliche Fahrgast mag so viel auf den Tasten herumgreifen, wie er will, die Kammer setzt den einmal angetretenen Weg bis zum Ende fort.




Einer ernsten Einrede aber ist sie zugänglich. Hat der in ihr befindliche Fahrgast sich tatsächlich geirrt und etwa den Knopf für das dritte Stockwerk gedrückt, obgleich er in das zweite wollte, dann braucht er sich nur des mit Halt! bezeichneten Knopfs zu bedienen. Sofort bleibt die Kammer stehen, und dem Fahrgast steht jetzt wie bei Beginn der Fahrt wirkungsvolle Auswahl zwischen sämtlichen Knöpfen offen.

Die Denkfähigkeit, die der Druckknopf-Fahrstuhl zur Sicherung seiner Bewegung und seines Seins, und damit des Lebens der Fahrgäste, gegenüber allen irgend erdenklichen Vorkommnissen besitzt, wird ihm durch eine überaus fein erdachte, aber doch verhältnismäßig einfache Apparat-Ausrüstung verliehen. Das eigentliche Denkwerkzeug ist der Steuer-Apparat. Dieses Gehirn wird durch Reizungen erregt,




176. Druckknopffeld in der Fahrkammer
für einstellbare elektrische Steuerung

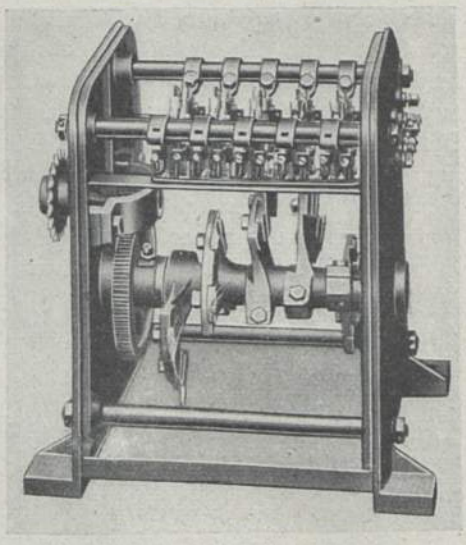
die von den Stockwerkschaltern ausgehen, worauf es den einzig vorhandenen Muskel, nämlich den Motor, zu sinnvoller Tätigkeit veranlaßt.

Ein Druck auf einen der Knöpfe draußen am Fahrstuhlschacht oder im Inneren der Kammer, und der entsprechende Stockwerkschalter im Motorraum wird infolge Erregung eines Magneten eingeschaltet. Nun ist die wichtige Frage zu entscheiden, ob die Kammer hinauf- oder hinabzufahren hat. In beiden Fällen macht der Stockwerkschalter die gleiche Bewegung. Das Gehirn der Anlage, Steuer-Apparat genannt, braucht aber nicht lange zu überlegen.

Das Gerät (Bild 177) besteht aus einer drehbaren Welle, an der so viele Schaltarme angebracht sind, wie die Zahl der zu befahrenden Stockwerke beträgt. Diese Schaltarme sind auf die drehbare Welle hintereinander und in fächerförmiger Versetzung gegeneinander gesetzt. Jeder der Arme stößt, kurz bevor er seine höchste Lage erreicht, also senkrecht nach oben steht, gegen einen zugehörigen, um eine wagerechte Achse drehbaren Schwinghebel, den er je nach der Bewegungsrichtung, mit welcher der Arm herankommt, an einen von zwei Kontakten legt.

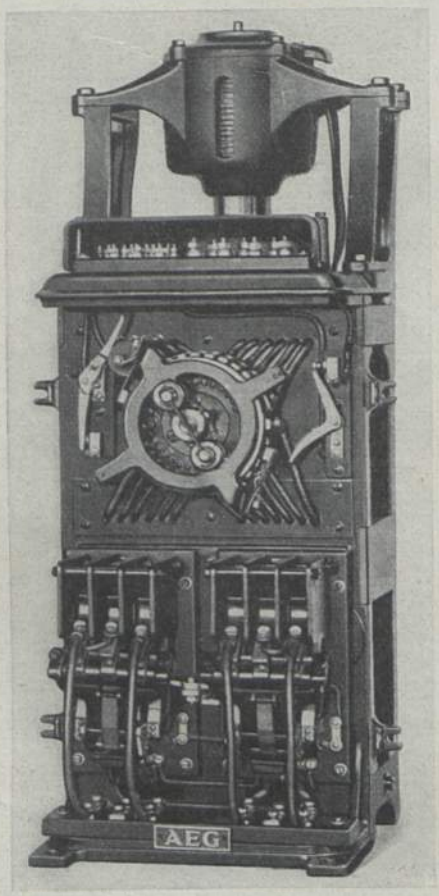
Die Drehung der Steuerwelle wird vom Fahrstuhlantrieb hervorgerufen, der Steuer-Apparat hat also immer eine Stellung, die dem Stand der Fahrkammer entspricht. Der Kontaktarm, der zu dem Stockwerk gehört, in welchem die Fahrkammer gerade hält, befindet sich stets in senkrechter Stellung. Der zugehörige Schwinghebel liegt alsdann in Mittelstellung, so daß er keinen seiner beiden Kontakte berührt. Die Arme derjenigen Stockwerke, die unterhalb des Fahrkammerstands liegen, befinden sich auf der rechten Seite, die Arme der darüberliegenden Stockwerke auf der linken Seite des senkrechten Arms. Dementsprechend liegen die nicht zu dem Haltestockwerk gehörenden Schwinghebel zum Teil links, zum Teil rechts an ihren Kontakten. Hierdurch wird bewirkt, daß beim Druck auf einen Rufknopf der durch den zugehörigen Stockwerkschalter geschlossene Strom einmal dem einen, das andere Mal dem anderen von zwei Schaltern zugeführt wird, die am Umkehranlasser (Bild 178) angebracht sind.

Steht die Fahrkammer im ersten Stock, dann befindet sich der Kontaktarm des ersten Stockwerks in Mittelstellung. Die Kontaktarme der Stockwerke 2, 3 und 4 liegen rechts davon, der Kontaktarm des Erdgeschosses ist nach links gelegt. Wird jetzt durch Drücken auf den Außenknopf in Stockwerk 2 oder auf den Kammerknopf, der mit Stockwerk 2 bezeichnet ist, der zugehörige Stockwerkschalter eingelegt, dann fließt der Strom zu demjenigen Schalter am Umkehranlasser, der Aufwärtsbewegung einleitet. Steht die Fahrkammer aber im dritten Stockwerk, so liegt der Kontaktarm, der zu Stockwerk 3 gehört, in Mittelstellung, der Kontaktarm von Stockwerk 2 ist nicht mehr nach rechts, sondern nach links gestellt, da die Steuerwelle ja entsprechend verlegt wurde. Und nun fließt bei gleichem Druck in Stockwerk 2 der Strom zu demjenigen Schalter am Umkehranlasser, der Abwärtsbewegung hervorruft.



177. Steuerapparat für Druckknopf-Steuerung
Bauart AEG, Berlin

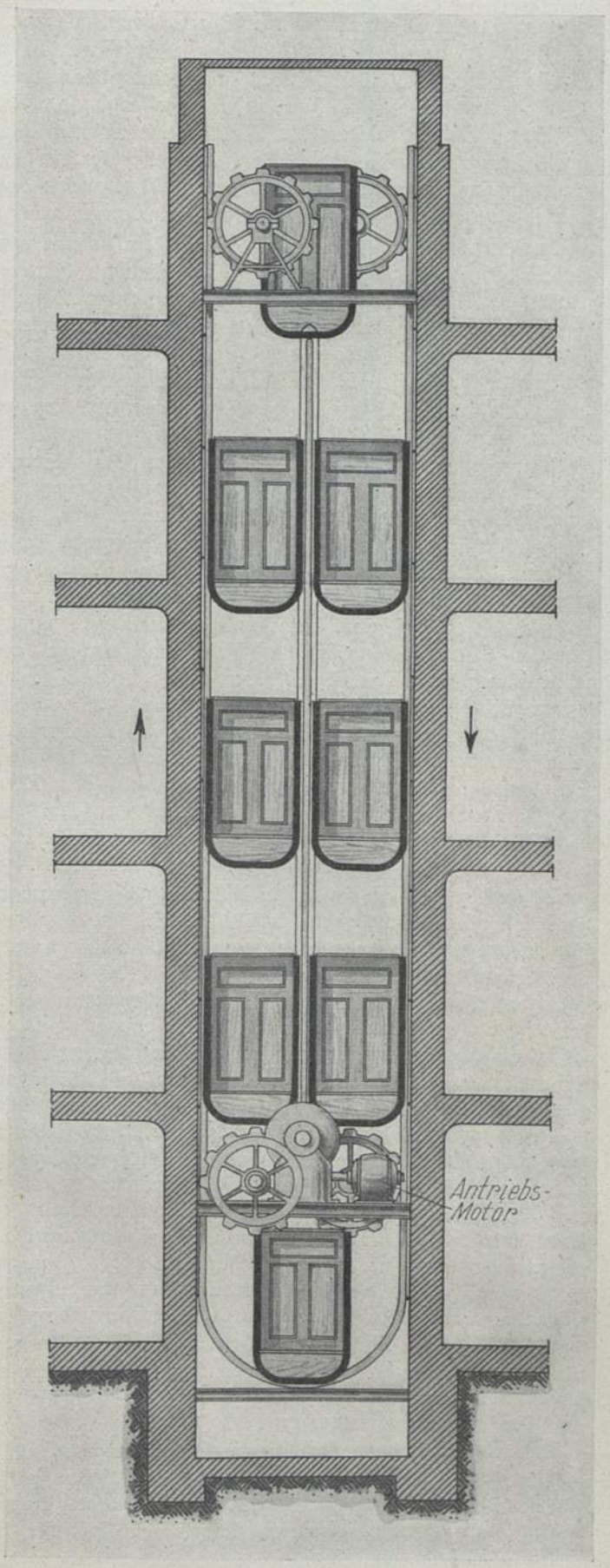
Sobald ein Schalter am Umkehranlasser eingelegt ist, spricht, wie früher unter dem Einfluß der Kurbelsteuerung, der Schaltmagnet am Umkehranlasser an. Er besteht aus zwei Spulen, deren eine bei Erregung einen beweglichen Eisenkern aus seiner Mittellage nach oben zieht, während die andere ihn senkt, sobald sie vom Strom durchflossen wird. Die Bewegungen des Eisenkerns übertragen sich auf den Schalthebel am Umkehranlasser, der im einen Fall aus seiner Mittel- und Ruhelage über mehrere Kontaktknöpfe nach rechts, in dem anderen Fall nach links gedreht wird.



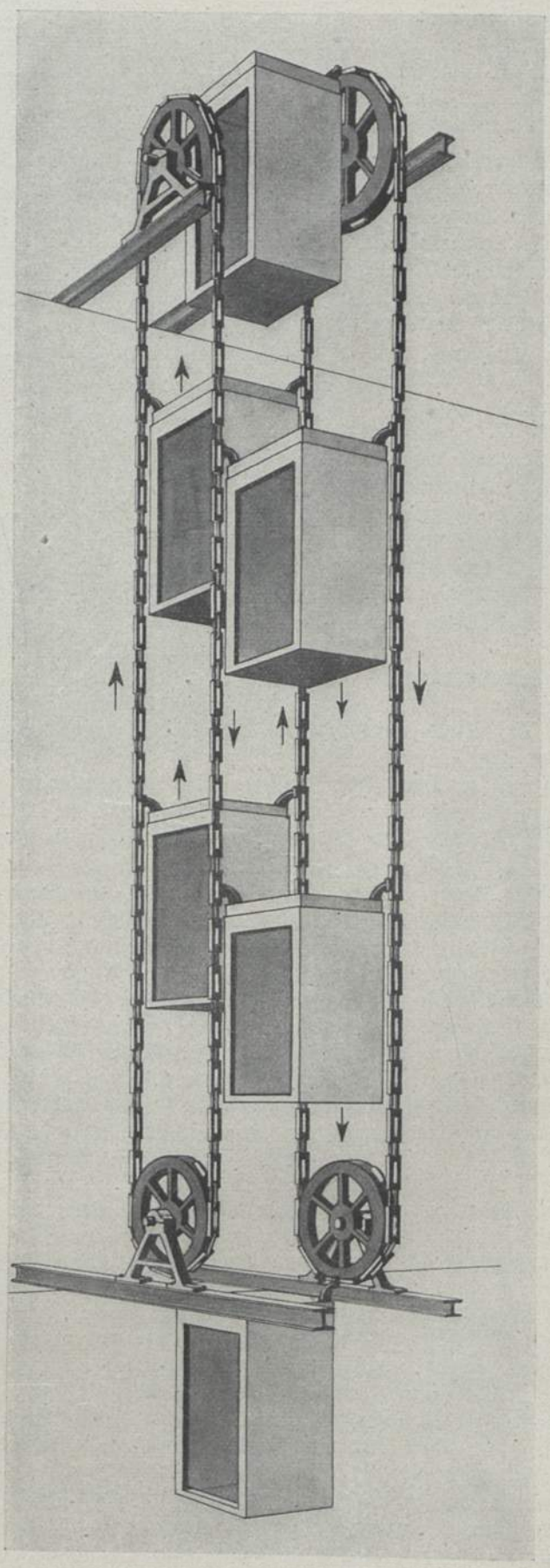

178. Umkehranlasser für Druckknopf-Steuerung

Läßt der Steuer-Apparat nun den Schalter für Aufwärtsbewegung der Fahrkammer anspringen, dann bekommt die obere Spule im Schaltmagneten Strom, der Eisenkern steigt langsam hinauf und führt den Schalthebel des Umkehranlassers unter Ausschaltung von Widerständen zur äußersten Lage rechts, von der aus der Motor vollen Strom für die entsprechende Drehrichtung erhält. Hat der andere Schalter am Umkehranlasser angesprochen, so vollzieht sich unter dem Einfluß des abwärtsgehenden Eisenkerns im Schaltmagneten das gleiche in entgegengesetzter Richtung.

Wenn die fahrende Kammer beinahe das Stockwerk erreicht hat, in das sie durch Knopfdrücken befohlen worden ist, dann hat der zugehörige Kontaktarm im Steuer-Apparat seinen höchsten




179. Einrichtung eines Paternosteraufzugs mit elektrischem Antrieb



180. Anordnung der beiden Kettenbahnen und Aufhängung der Fahrkammern

Stand erreicht und den bis dahin an einem Kontakt liegenden Schwinghebel in freie Mittelstellung gebracht. Hierdurch wird der angezogene Stockwerkschalter abgeschaltet und unter seinem Einfluß auch der Richtungsschalter am Umkehranlasser. Der Betriebsstrom ist damit unterbrochen. Die Spule im Schalt-Magneten wird gleichfalls stromlos, und der Eisenkern kehrt in die Ruhelage zurück, wobei er den Anlasser-Hebel über die Widerstandskontakte in die Mittel- und Ruhelage zurückführt. Dieses Umlegen dauert 5 bis 6 Sekunden, und währenddessen kann kein Knopfdrücken wirksam werden. Diese Frist, in der alle Apparate tot liegen, gibt Gelegenheit zum Öffnen der Schachttür, und auf diese Art wurde jener rücksichtslose Fahrgast im zweiten Stockwerk verhindert, dem Wartenden im vierten Stock die herangeholte Fahrkammer wieder fortzunehmen.

Es ist jetzt auch verständlich, weshalb das an den Kontaktknöpfen spielende Kind keine Unordnung in das Getriebe bringen konnte. Während die Kammer fährt, steht der Hebel des Umkehranlassers ja nicht in der Ruhestellung, und nur in diesem Fall springen die Stockwerkschalter an. Sobald der Hebel des Umkehranlassers seine Ruhestellung verlassen hat, gleichen alle Druckknöpfe Klaviertasten, denen die zugehörigen Saiten fortgenommen sind.

Der Steuerapparat schaltet den Betriebsstrom nicht erst im letzten Augenblick ab, sondern schon ein paar Sekunden vor dem Erreichen des Ziels, weil selbstverständlich auch bei Anwendung der Druckknopf-Steuerung die auf Seite 81 besprochene Bremse einspringen muß. Die Vor-Ausschaltungszeit ist für mittlere Belastung berechnet, aber selbsttätige Ausgleichvorrichtungen sorgen doch dafür, daß der Boden der Fahrkammer sowohl wenn sie leer, wie wenn sie höchstbelastet ist, bündig mit dem Flur stehen bleibt.

Die Abhängigkeit des Betriebsstroms von der Stellung der Schachttüren wird dadurch bewirkt, daß sich im Rahmen einer jeden von ihnen ein Kontakt befindet, der nur bei gut zugemachter Tür eingeschaltet ist. Die Leitungen zu den Stockwerkschaltern gehen sämtlich durch alle diese Türkontakte hindurch. Es kann also kein Stockwerkschalter ansprechen, wenn eine Tür offen steht. Anderseits werden, wie wir schon wissen, die Fallen der Türschlösser für gewöhnlich durch eine Hebelnase zugehalten, die erst fortgezogen wird, wenn die Fahrkammer sich einsteigebereit vor die Tür gestellt hat.

Die Außenknöpfe zum Herbeirufen der Fahrkammer von den Fluren aus werden jetzt meist so ausgebildet, daß sie nur von jemandem betätigt werden können, der im Besitz des Türschlüssels ist. Dieser kann in ein zweites Schloß eingeführt werden, in dessen Innerem die Druckvorrichtung liegt. Es wird hierdurch spielerische Betätigung der Außenknöpfe verhindert. Der Schlüssel wirkt aber nicht anders als ein Finger, mit dem man einen Knopf niederdrückt.

In sehr einfacher und geistreicher Weise wird das Ausschalten der Außenknöpfe bewirkt, sobald die Fahrkammer besetzt ist. Diese hat nämlich einen beweglichen Fußboden. Sobald er belastet ist, öffnet er einen Kontakt, wodurch alle Außenknöpfe abgeschaltet werden. Der bewegliche Fußboden hält, wenn er niedergedrückt ist, auch die Lampe in der Fahrkammer eingeschaltet, nachdem alle Schachttüren geschlossen sind.

Sollte der Steuer-Apparat einmal nicht abschalten, so ist zur Aufhebung des Betriebsstroms immer noch die Vorrichtung da, die vom Motor unmittelbar betätigt wird und nach einer gewissen Zahl von Umdrehungen der Hauptantriebswelle wirkt. Man begnügt sich aber auch damit nicht und fügt noch einen weiteren Notschalter hinzu. Er ist gewöhnlich ein Stück über dem Schachtboden angebracht. Überschreitet die Fahrkammer die zulässige tiefste Stellung, so stößt ihr Boden gegen den Arm des Notschalters, wodurch alles auf Halt! gestellt wird. Geht die Kammer aber über den höchsten Punkt hinaus, dann wird der Notschalter von dem nun ja zu tief nach unten gleitenden Gegengewicht betätigt.

Die Einrichtungen zur Sicherung der Fahrten mit dem Druckknopf-Fahrstuhl befinden sich in ständiger Fortentwicklung. Neue Bauarten für die Zuhaltung der Schachttüren sind erdacht; der Steuerschalter wird immer weiter durchgebildet, so daß gerade diese technische Vorrichtung, die dauernd den Angriffen Nichtsachverständiger ausgesetzt ist, in steigendem Maß höchste Sicherheit bei ihrem Arbeiten gewährleistet.

Es wurde bereits bei der Besprechung der Stufenbahn in Band II auf Seite 500 darauf hingewiesen, daß ein zwar langsam, aber ständig laufendes Beförderungsmittel eine höhere Reisegeschwindigkeit ermöglicht als raschere Fahrzeuge, die in weiteren Abständen aufeinander folgen. Der Wegfall der Wartezeit überwiegt die Nachteile des Schneckengangs. Man hat sich diese Überlegung auch im Fahrstuhlbetrieb zunutze gemacht. Bei der gewöhnlichen Anordnung verkehrt auf jeder Strecke nur Ein Wagen. Wer gerade an die Zugangtür im Erdgeschoß gelangt, wenn der Fahrstuhl sich von hier aus in Bewegung setzt, um im vierten Stock Fahrgäste aufzunehmen, der muß sich beträchtliche Zeit in Geduld fassen. Die laufende Kammer macht zwar geschwind ihren Weg, das Anhalten, der Stillstand zur Aufnahme von Fahrgästen, das Wiederanfahren und das Aussteigen der Beförderten währen jedoch eine recht lang erscheinende Zeitspanne.

Die Pausen fallen fast gänzlich bei Aufzügen der sogenannten Paternoster-Anordnung fort (Bild 179). Es sind hier zwei Fahrbahnen dicht nebeneinander angeordnet, die oben und unten in Verbindung miteinander stehen, also eine endlose Schleifenbahn darstellen. Acht bis zwölf kleine Fahrkammern werden durch zwei Ketten ständig über die Schleife gezogen. In dem einen Schacht gehen sie aufwärts, fahren droben, durch Führungen gehalten, in aufrechter Lage durch die Krümmung, gleiten in dem Nachbarschacht hinab und werden im Keller wiederum aufrecht übergeführt. Jede Kammer ist, wie Bild 180 zeigt, vorn links an der Kette befestigt, die im Auffahrt-Schacht, hinten rechts an der Kette, die im Niederfahrt-Schacht liegt. Die Ketten laufen richtungsgleich und mit derselben Geschwindigkeit. Es ist leicht zu erkennen, wie jede Kammer am oberen und unteren Ende der Fahrt, ohne daß ihre Befestigungen gelöst werden, über die Führungsrollen von den aufwärtssteigenden Kettenteilen zu den abwärtssteigenden übergehen.

Die Anordnung stellt, recht betrachtet, ein Becherwerk für Personen-Beförderung dar. Den Empfindungen der beförderten Last entsprechend, und weil diese selbstbeweglich ist, fällt das Auskippen freilich fort.

Die seltsame Benennung Paternoster-Aufzug ist bildhaft zu verstehen. Die Kammern sind an den Ketten hintereinander aufgereiht wie die Perlen am Faden des Rosenkranzes, mit denen der fromme Katholik die Zahl der gebeteten Vaterunser abzählt.

Bei diesen Umlauf-Fahrstühlen gibt es keine Türen oder Schachtverschlüsse irgendeiner Art. Die Zugänge in jedem Stockwerk sind ständig offen (Bild 181). Wenn der Boden einer Kammer bündig mit dem Hausfußboden steht, kann man

ohne weiteres ein- oder aussteigen. Man muß sich freilich rasch entschließen, da der Kammerboden im nächsten Augenblick schon wieder versunken ist oder sich um ein Stück gehoben hat. Akrobatenfertigkeit ist jedoch nicht notwendig, denn die Kammer legt in jeder Sekunde nur 0,25 Meter zurück, so daß man sehr sanft mitgenommen wird.

181. Paternosteraufzug in Betrieb
Carl Flohr, Berlin

Die Paternoster-Aufzüge sind in Preußen erst im neuen Jahrhundert zugelassen worden. Die übervorsichtige Polizei hielt ihren Betrieb immer noch für gefährlich, als sich die Vorrichtungen zum Beispiel in Hamburg schon seit langem bestens bewährt hatten. Eine Unfall-Statistik der Hamburger Polizei hat festgestellt, daß auf 20 Millionen beförderte Personen 4,3 leichte Unfälle kommen. Das ist gewiß nicht mehr Unglück, als sich an Fahrstühlen gewöhnlicher Art zuträgt. Seit ihrer Zulassung sind die Umlauf-Fahrstühle in allen großen Büro-Neubauten Berlins eingerichtet worden.

Es bestehen für sie besondere Sicherheits-Vorschriften. Die einzelne Fahrkammer darf nicht mehr als zwei Personen Platz bieten. Die Räume zwischen den Kammern sind durch Schutzwände zu verschließen, damit niemand irrtümlich in den Schacht treten kann. Der Vorderteil des Fußbodens jeder Kammer und das letzte Stück des Hausfußbodens sind mit 20 Zentimeter breiten Klappen zu versehen. Hierdurch wird ein Einklemmen vermieden. Bei aufsteigender Kammer klappt ein etwa zu weit hinausragender Körperteil den losen Teil des Fußbodens auf. Wenn die hinuntergehende Kammer anstößt, öffnet sich die Klappe in ihrem Boden. In jedem Geschoß muß sich eine Einrichtung zum Anhalten des Fahrstuhls befinden; meistens wird für diesen Zweck ein Druckknopf angebracht. Die Vorrichtung, durch welche die Anlage wieder in Betrieb gesetzt werden kann, darf den Benutzern des Fahrstuhls nicht zugänglich sein. In jeder Fahrkammer ist neben anderen Hinweisen darauf aufmerksam zu machen, daß die Fahrt über den höchsten und tiefsten Punkt der Anlage mit Gefahren nicht verbunden ist.

In großen Geschäftshäusern werden die Paternoster-Anlagen auch als Warenaufzüge benutzt. Ihre Hauptaufgabe aber ist es, Menschen ganz nach ihrem Willen und Belieben zu befördern. Sie sind jeden Augenblick bereit, ihre Pflicht zu erfüllen, lassen niemals auf sich warten, sind so einfach gebaut, daß ein Versagen nur höchst selten eintritt, und führen tagaus, tagein wahre Menschenströme von einem Tätigkeitsort zum anderen. So sind diese ausgezeichnet wirkenden Anlagen nicht unwürdig, den Abschluß unserer Betrachtungen über die Lastenförderung zu bilden.

# Kraftmaschinen

# 26. Muskel-, Wind- und Wasserkraftmaschinen

## Talsperren

Faust ist vom Osterspaziergang mit Wagner heimgekehrt. Er schickt sich in einsamer Zelle an, beim freundlichen Schein der Lampe das Evangelium des Johannes zu übersetzen.

Gleich im ersten Satz macht ihm die Deutung des griechischen Worts logos Beschwer. Im Anfang war das Wort? Diese platt-wörtliche Übersetzung verwirft Faust. Er kann die Wirkung eines Worts, auch wenn es aus dem Mund des Herrn gekommen ist, nicht so hoch schätzen, um zu glauben, daß hieraus alles Geschaffene entsprungen ist. Besser scheint ihm schon die Deutung: „Im Anfang war der Sinn!" Damit meint Faust die Absicht, den Willen zur Schöpfung.

Doch kann dieser allein etwas hervorbringen? Der Wille hat, wenigstens nach menschlichem Begreifen, ein Mittel notwendig, um die Materie zu bewegen. So läßt denn Faust den Herrn nach einem Werkzeug greifen und schreibt nieder: „Im Anfang war die Kraft!"

Doch von neuem drängen sich Bedenken heran. Sowenig der Wille ohne Vollzugsmittel etwas zu leisten vermag, so wenig kann das Werkzeug ohne sinnvolle Lenkung wirken. Und so faßt der suchende Mann am Schreibtisch, den die Geister umschweben, Sinn und Kraft zusammen, indem er getrost schreibt: „Im Anfang war die Tat!" Er meint die Tat, die entstand, als der Sinn oder der sinnvolle Wille die Kraft lenkte, als der Schöpfer das vollbrachte, was wir Menschen in unserem Bezirk Arbeit nennen.

Gegen die hier angezogene Stelle werden in vielen kritischen Betrachtungen des Faust-Gedichts Einwendungen erhoben. Und das nicht mit Unrecht. Denn der Folge Wort — Sinn — Kraft — Tat fehlt die beabsichtigte Steigerung der Begriffsinhalte. Aber wenn man annimmt, daß Goethe mit der Tat, die am Anfang war, eine Arbeitsleistung meinte, so muß doch zugegeben werden, daß ein edler Schlußstein das dichterische Gebäude passend krönt.

182. Der Vater des Energie-Gesetzes

Arbeit ist das wahrhaft Schöpferische. Am Ende der Werktätigkeit des biblischen Gotts steht ein Geschöpf, das sich vom Tier hauptsächlich durch die Möglichkeit, selbst zu denken, und durch das Arbeitsvermögen unterscheidet. Durch seines Geistes und seiner Hände Arbeit hat der Mensch die Erde weitgreifend umgestaltet. Die Arbeit, die nach einem Ausspruch Mösers der Fluch ist, mit dem Gott das Menschengeschlecht segnete, hat aus dem kümmerlichen Lebewesen, das mit plumpem Leib und dumpfem Gehirn aus den Händen der Natur hervorging, den Herrn der Welt gemacht. Durch sie stieg der Urmensch, der in der Höhle hockte und das Tier beinahe noch als seinesgleichen ansehen mußte, auf zu dem Mann, der die Bahnen der Sterne aufzuzeichnen vermag und im Atom nach dem letzten Baustein des Alls forscht.

Die Menschheit lebt nicht in einem ewigen Glanz. Wer aber hätte, in der Kulturgeschichte rückschauend, nicht den Eindruck, daß sie doch aus dem Düsteren ans Licht gerückt ist! Ein aufrichtiger und berechtigter Dank klingt aus Heinrich Seidels „Hymne der Arbeit":

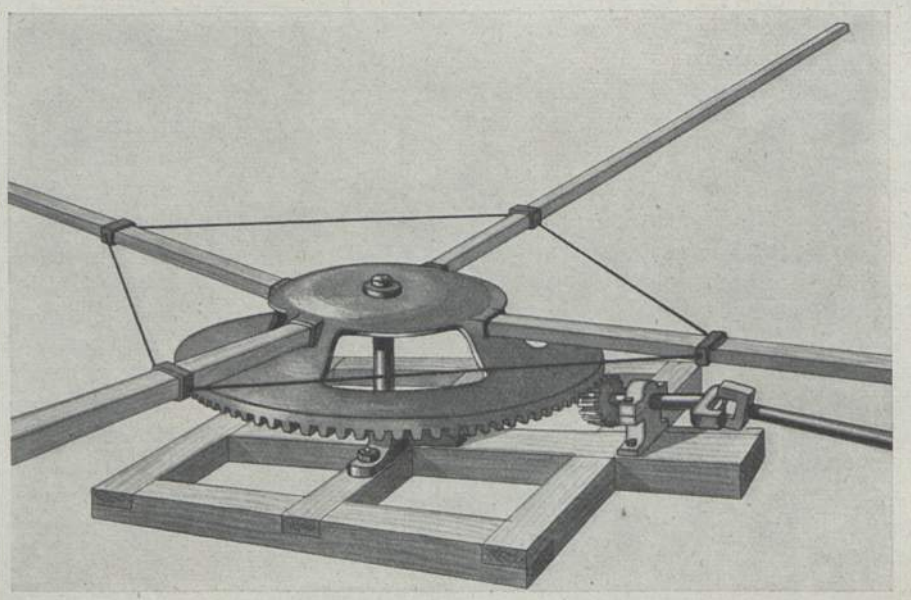
Arbeit! Arbeit! Segensquelle!
Heil und Ehre deiner Kraft!
Die aus Finsternis die Helle,
Edles aus Gemeinem schafft.

Um die Arbeit zu vollbringen, die er zur Fortentwicklung seiner selbst und zur Erleichterung der Lebensmöglichkeiten leisten mußte, hatte der Mensch Jahrzehntausende lang nichts als die Kraft seiner Muskeln zur Verfügung. Wenig bedeutete es, daß er auch die Tiere zur Hilfe heranziehen konnte. Der Wille, gewaltige Werke aufzuführen und mächtige Lasten zu befördern, lebte schon in alter

Zeit, und das Gefühl, daß die vorhandenen Kräfte hierfür nicht ausreichten, sprang schmerzend auf. Rücksichtslose Naturen kamen auf den Gedanken, die Unterbilanz durch Gewalt auszugleichen. Es entstand die Sklaverei, die Jahrhunderte lang furchtbare Qualen auf die Schultern der Menschheit lud.

„Zehnmal zehntausend Mann im Dienst des Königs Cheops", so schreibt Matschoß über den Bau der großen Pyramide, „zogen drei Monate hindurch die Steine vom Gewinnungsort zum Nil, während eine gleiche Anzahl das über den Fluß gebrachte Baumaterial zum Bauplatz schaffte. Und diese Sklavenheere bauten vorerst zehn Jahre an dem Weg, worauf sie die Steine zogen — berichtet Herodot.

„Ebenfalls sehr erhebliche Arbeitsleistungen verlangten die alten Ruderschiffe. Die Zahlenangaben der alten Schriftsteller lassen erkennen, mit welchen Mitteln damals die Technik arbeiten mußte, um nach unserer Vorstellung doch noch immer kleine Kräfte in dem kleinen Raum eines Schiffs unterzubringen. Die Begriffe von Grausamkeit und menschlicher Härte verbinden sich auch hier sofort mit den Worten: Ruderknecht, Galeerensklave. Cervantes läßt Sancho, als er zum erstenmal auf einer Galeere fuhr und sah, wie der Galeerenvogt die nackten Rücken der Ruderknechte mit der Karbatsche bearbeitete, um durch die verzweifelte Kraftanstrengung dieser menschlichen Kraftmaschinen die Geschwindigkeit des Schiffs zu steigern, ausrufen: ‚Nun, wenn dies nicht die Hölle ist, so ist es doch wenigstens das Fegefeuer!' ...



183. Einrichtung des Pferdegöpels

„Das sind nur wenige Bilder aus der Leidensgeschichte der menschlichen Kraftmaschine. Und was läßt sich für den Menschen, als denkendes und empfindendes Wesen, Würdeloseres denken, als tagaus, tagein in einförmigster Weise nur als Glied einer Maschine mit seiner Muskelkraft und dem Gewicht seines Körpers ausgenutzt zu werden? Eine unglaubliche Härte und Grausamkeit machte den einen Teil der Menschheit zum Arbeitstier des anderen. Galeerensklave zu werden oder in den alten römischen Bergwerken in Spanien und Sizilien und anderen Orten zu arbeiten, war härter als sterben. Eine gewaltige Tragik menschlichen Leidens liegt in dieser jahrtausendlangen Ausnutzung menschlicher Muskelkraft."

Alle Lehren und Gesänge von Menschenliebe und Brüderlichkeit wären unfähig gewesen, die Sklaverei zu beseitigen, wenn es nicht möglich geworden wäre, an die Stelle der lebenden die eisernen Knechte zu setzen. Was Hunderte von Menschen früher mit triefenden Stirnen und keuchendem Atem vollbringen mußten, das schafft heute eine einzige Kraftmaschine, an der das nimmermüde Gestänge lustig blinkt und die Räder mit freudigem Gesang umlaufen. Arbeits- und Leistungsfähigkeit stehen jetzt in jedem beliebigen Maß zur Verfügung, und die Kraftmaschinen sind stets bereit, ihren Dienst zu versehen. Sie brauchen nicht mit Peitschenhieben angehalten zu werden. Es ist doch eine herrliche Leistung des Menschengeschlechts, daß es vermocht hat, durch kluge Formung toter Materie Gebilde zu schaffen, die auf einen Wink stets den Dienst verrichten, der ihnen auferlegt ist!

Die Maschine ist heute nicht mehr nur ein einfacher Lastenheber, als den sie Vitruvius, der Baumeister des Augustus, bezeichnete (Seite 39). Wir dürfen nun die Begriffsbestimmung sehr viel weiter fassen als jener römische Schriftsteller. Reuleaux sagte: „Eine Maschine ist eine Verbindung widerstandsfähiger Körper, welche so eingerichtet ist, daß mittels ihrer mechanische Naturkräfte genötigt werden können, unter bestimmten Bewegungen zu wirken." Sombart sagt: „Die Maschine ist ein Arbeitsmittel oder ein Kompler von solchen, welches derart eingerichtet ist, daß es eine Arbeit, die sonst ein Mensch verrichten müßte, an Stelle des Menschen ausführt, ein Arbeitsmittel also, welches nicht wie das Werkzeug menschliche Arbeit unterstützt, sondern menschliche Arbeit ersetzt."

Die Bezeichnung Kraftmaschine darf nicht zu der Meinung verführen, daß Vorrichtungen dieser Art Kraft erzeugen. Ein solches Wirken, das göttlich wäre, liegt außerhalb ihres Könnens. Die kunstvollen Bauten vermögen nicht mehr, als die vorhandenen Naturkräfte so zu leiten, daß sie über eine Zwangsspur schreiten müssen.

Kraft kann weder erzeugt noch zerstört werden. Wohl aber ist es möglich, die eine Kraftart in eine andere zu wandeln, eine Umformung zu vollziehen, durch die eine für den bestimmten Zweck nicht brauchbare Kraftgattung in eine solche umgestaltet wird, die passend und brauchbar ist.

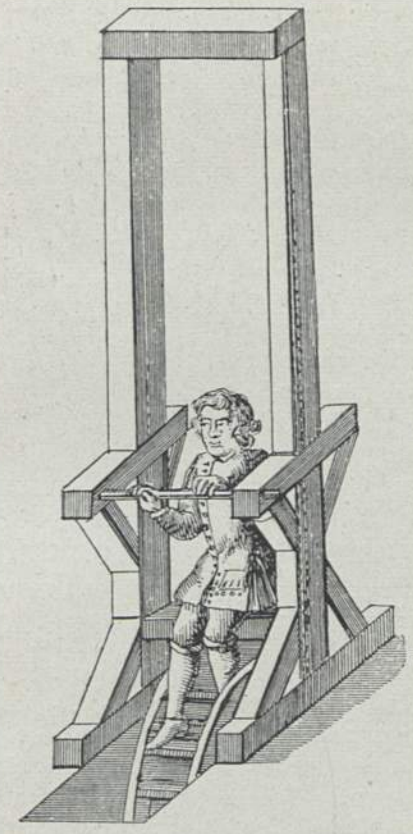
Das Weltall erscheint mit einer bestimmten Kraftmenge ausgerüstet. Diese ist, wie das Universum selbst, ewig. Das ungeheure und für uns unübersehbare Spiel der Kräfte im Weltall, das von jeher bestand und immerdar bestehen wird, vollzieht sich in einem Kreislauf. Wie der Wassertropfen, der heute niederfällt, schon unendlich viele Male gefallen ist, so ist die Kraft, deren Wirken wir im Augenblick wahrnehmen, schon unzählige Male in dieser Form aufgetreten. Sie hat sich gewandelt, ist wieder zurückgewandelt und von neuem verwandelt worden, hat sich immer schon in dem Zirkel bewegt, der um die Unendlichkeit gespannt ist.

Die Kenntnis dieser Tatsache, die ein Fundament des menschlichen Wissens um den wahren Aufbau der Welt und den Ablauf der Geschehnisse im Universum ist, besitzen wir noch nicht lange. Der Satz, daß Kraft nur aus Kraft geboren werden

und nur in Kraft übergehen kann, wurde zum erstenmal im Jahre 1840 ausgesprochen. Er hellte plötzlich mit der Macht von tausend Sonnen eine Finsternis auf, in der Naturwissenschaftler und Techniker bis dahin umhergetappt waren.

Die Geschichte dieser Entdeckung von ungeheurer Tragweite gehört zu den merkwürdigsten Begebnissen im Bezirk der Kultur. Ein Mann, dessen geistige Leistungen sich bis dahin niemals über das ganz gewöhnliche Durchschnittsmaß erhoben hatten, wurde jäh mit dem köstlichsten Gedanken begabt, und dieser Mensch ist nachher niemals wieder mit einer irgendwie beachtenswerten Leistung hervorgetreten. Ja, er vermochte nicht einmal, seiner Idee die rechte Ausdrucksform zu geben.

Julius Robert Mayer (Bild 182), der in dem schwäbischen Städtchen Heilbronn als Arzt wirkte, machte 1840, in seinem 26. Lebensjahr, als Schiffsarzt eine Reise nach Java. Auf der Reede von Surabaya ließ er einen Matrosen zur Ader und bemerkte hierbei, daß das Blut, welches der Arterie entquoll, keine so hellrote Färbung zeigte, wie er sie in der Heimat stets beobachtet hatte. Er glaubte deshalb zuerst, daß er aus Versehen eine Vene angeschlagen habe. Das in diesen Bahnen zum Herzen zurückfließende Blut ist bekanntlich sehr viel dunkler als das arterielle, weil es mit der durch den Lebensprozeß abgeschiedenen Kohlensäure beladen ist. Diese wird erst wieder in der Lunge abgestoßen, das Blut nimmt dort von neuem Sauerstoff auf, wodurch es seine hellrote Farbe wiedergewinnt.



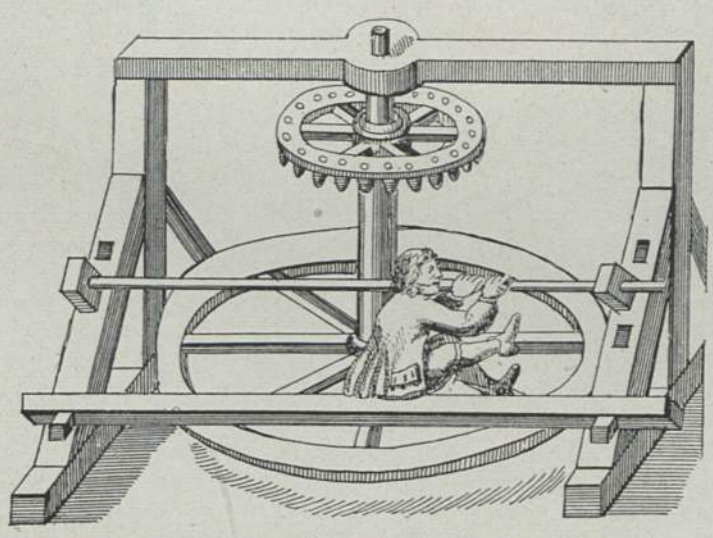
184. Senkrechtes Tretrad mit sitzendem Mann
Aus Jacob Leupold, Theatrum machinarum generale, Leipzig 1724

Mayer besprach seine Beobachtung mit den ansässigen Ärzten, und diese sagten ihm, daß das Arterienblut in den Tropen stets dunkler aussähe als in Europa. Der Deutsche begann über diese Seltsamkeit nachzusinnen, und der Gegenstand packte ihn derart, daß er sich um die ihm fremden Schönheiten der exotischen Insel überhaupt nicht kümmerte, sondern ständig, in tiefes Nachsinnen versunken, auf dem Schiff verweilte. Er hat selbst hierüber berichtet: „Ich hing dem Gegenstand mit solcher Vorliebe nach, daß ich, worüber mich mancher auslachte, wenig nach dem fremden Weltteil fragte, sondern mich am liebsten an Bord aufhielt, wo ich unausgesetzt arbeiten konnte, und wo ich mich in mancher Stunde gleichsam inspiriert fühlte, wie ich mich zuvor oder später nie etwas Ähnlichen erinnern kann. Einige Gedankenblitze, die mich durchfuhren, wurden sofort eifrig verfolgt und führten wieder auf neue Gegenstände."

Es wurde Mayer schließlich klar, daß der Körper in der Wärme der südlichen Länder weniger Lebenswärme aus der Nahrung aufzunehmen brauche und aufnähme als in kälteren Zonen, und daß das Blut sich deshalb in der Lunge auch weniger mit Sauerstoff anreichere, so daß es eine dunklere Färbung haben müsse. Er erkannte hieraus die Beziehungen, die zwischen der Wärmezufuhr und der Arbeitsleistung des Körpers bestehen, es wurde ihm klar, daß die Heizung, die der Körper durch die Verbrennung der Nahrungsmittel im Organismus erhält, ihm die Fähigkeit zur Arbeitsleistung verleiht.

Damit war zum erstenmal erkannt, daß Wärme eine Form der Energie — der, wenn wir vorläufig sagen wollen, werktätigen Kraft — ist. Bis dahin hatte man nicht gewußt, was Wärme eigentlich sei, und deshalb zahlreiche Wege der Energie nicht zu deuten vermocht. Man sah zum Beispiel, wenn ein Stein auf den Boden fiel oder eine Kanonenkugel das Ziel traf, die Energie, welche diesen bewegten Körpern doch unzweifelhaft innewohnte, verschwinden; sie schien vernichtet. Seit Mayer wissen wir, daß die Bewegungsenergie im fallenden Stein oder in der Kanonenkugel sich beim Aufprallen in Wärme-Energie verwandelt, und zwar entspricht eine bestimmte Menge verschwindender Bewegungs-Energie stets einer bestimmten Menge neu auftretender Wärme-Energie. Wenn ein Gas verdichtet wird, erwärmt es sich gerade so sehr, daß die neu auftretende Wärme der für das Zusammenpressen aufgewendeten Arbeit gleichwertig ist.

Wir nennen die Lehre Mayers das Gesetz von der Erhaltung der Kraft oder der Energie. Ohne die Kenntnis dieses Gesetzes wäre das genaue Vorausberechnen von Kraftmaschinen nicht möglich, weil man z. B. nicht bestimmen könnte, wieviel an Wärme-Energie verbrennender Kohle im Dampfkessel aufgewendet werden muß, damit man eine bestimmte Menge Bewegungs-Energie an der Schwungradwelle der Dampfmaschine abnehmen kann.



185. Wagerechtes Tretrad mit sitzendem Mann
Aus Jacob Leupold, Theatrum machinarum generale, Leipzig 1724

Mayer schrieb nach der Rückkehr in die Heimat die Gedanken, die er an seine Entdeckung knüpfte, in einer Abhandlung nieder und sandte diese zur Veröffentlichung an die führende naturwissenschaftliche Zeitschrift jener Zeit, „Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie". Der Herausgeber Poggendorff aber erkannte den Wert der Arbeit nicht, die freilich nach Mayers Art recht unklar geschrieben war und viele grobe Irrtümer enthielt. Er hat den Aufsatz nicht gedruckt und ihn dem Verfasser auch niemals zurückgeschickt. Die

Urschrift wurde in Mayers hinterlassenen Papieren gefunden. Erst 1842 hörte die wissenschaftliche Welt von dem großen Gedanken durch einen Aufsatz Mayers, der unter dem Titel „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" in „Liebigs Annalen" erschien. Der Entdecker aber wurde nicht etwa stürmisch geehrt, sondern hatte die schärfsten Angriffe und Verunglimpfungen zu erdulden. Nur allmählich setzte sich die unsterbliche Wahrheit gegen eine Unzahl schmählichster Widerstände durch.

Mayer, der in recht mißlichen Verhältnissen lebte, wurde durch die Widerwärtigkeiten, die seine Entdeckung ihm eintrug, derart verbittert, daß er 1850 einen Selbstmordversuch machte. Er wurde dann gewaltsam in eine Irrenanstalt gesperrt und dort länger als ein Jahr durch körperliche Zwangsmaßregeln auf das roheste mißhandelt. Man wollte ihn durchaus zwingen, zuzugeben, daß seine Behauptung, eine große wissenschaftliche Entdeckung gemacht zu haben, auf Größenwahn beruhe. Er hat sich aber standhaft geweigert, ein solches Zugeständnis zu machen.

Der englische Physiker Tyndall war 1862 der Erste, der für Mayer öffentlich eintrat und ihm das Erstrecht auf seine große Entdeckung zusprach. Auf der Versammlung der Naturforscher und Ärzte, die 1869 zu Innsbruck stattfand, hielt Mayer selbst einen Vortrag „Über notwendige Konsequenzen und Inkonsequenzen der Wärmemechanik", der zur Folge hatte, daß selbst Helmholtz, nachdem er jahrelang dagegen gekämpft hatte, anerkennen mußte, daß der Arzt aus Heilbronn „das Prinzip der Erhaltung der Energie zuerst rein und klar erfaßt und seine absolute Gültigkeit auszusprechen gewagt hat".

Helmholtz ist es dann auch hauptsächlich gewesen, durch den die Lehre das mathematische Gewand erhielt. Joule erbrachte den experimentalen Nachweis für ihre Richtigkeit und rüstete sie für ihren Siegeszug über die ganze Erde aus. 1878 ist Mayer als ein hochgeehrter Mann gestorben.

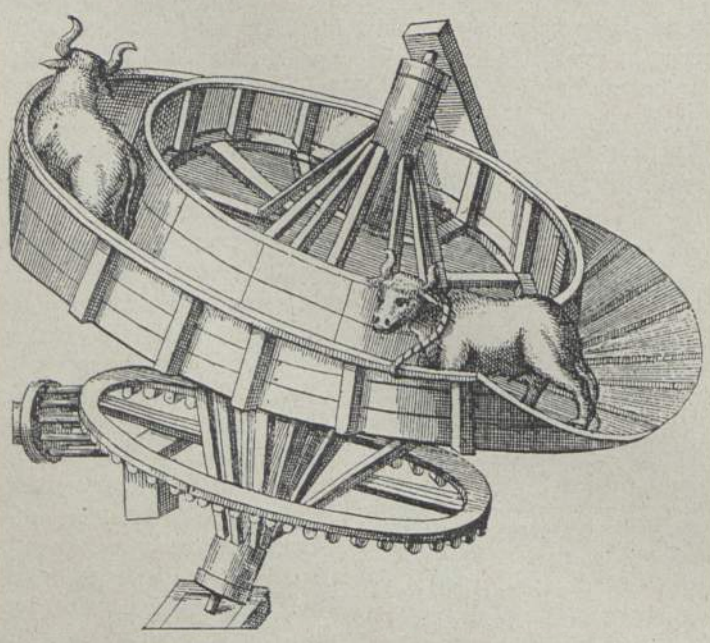
Eine der nächstliegenden Folgerungen aus dem Gesetz von der Erhaltung der Energie ist die Erkenntnis, daß ein Perpetuum mobile nicht geschaffen werden kann. Denn da Energie nur aus Energie zu entstehen vermag, so kann unmöglich eine Maschine Kraft abgeben, der keine Kraft zugeführt wird. Trotzdem gibt es auch heute noch genug Menschen, die sich mit der Lösung dieser sinnlosen Aufgabe beschäftigen, nachdem in früheren Jahrhunderten viele Dutzend Male die Behauptung aufgestellt worden war, das Perpetuum mobile sei tatsächlich geschaffen, und nun wäre die Welt für immer von aller Not befreit. Sie steckt aber leider auch heute noch in nicht geringen Kümmernissen.

Sehr witzig ist die Energie-Verwandlung von Wilhelm Busch dargestellt worden:

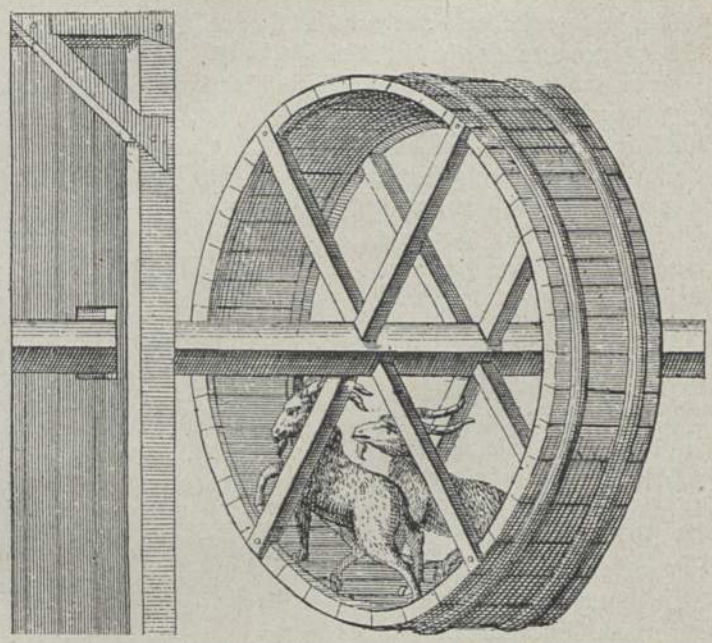
Hier strotzt die Backe voller Saft;
Da hängt die Hand, gefüllt mit Kraft.
Die Kraft, infolge der Erregung,
Verwandelt sich in Schwungbewegung.
Bewegung, die in schnellem Blitze
Zur Backe eilt, wird hier zur Hitze.
Die Hitze aber, durch Entzündung
Der Nerven, brennt als Schmerzempfindung
Bis in den tiefsten Seelenkern,
Und dies Gefühl hat keiner gern.
Ohrfeige heißt man diese Handlung,
Der Forscher nennt es Kraftverwandlung.

Indes die Energieströme das Weltall in ewigem Lauf durchfluten, greift der Mensch hier und da in das Gewoge, um ein Strömungsteilchen für seine Zwecke herauszuholen. Seine suchende Hand findet die Kräfte der Natur in zwei verschiedenen Formen: als schlummernde oder potentielle Energie und als tätige oder kinetische Energie. Die erste wird auch Energie der Lage, die zweite Bewegungs-Energie oder lebendige Kraft genannt.

Wenn ein Gewicht vom Fußboden auf einen Tisch hinaufgehoben wurde, so ist die Energie, welche der hebende Muskel geleistet hat, in dem gehobenen Gewicht gespeichert. Dieses ist aber jetzt nicht imstande, die aufgenommene Energie wieder abzugeben, die Arbeitskraft schlummert in ihm. Sie wird geweckt und sofort tätig, wenn die Unterstützung des Gewichts fortgenommen wird. Alsdann fällt es hinab, und kann, falls eine geeignete Anordnung vorhanden ist, hierbei Arbeit leisten. In die aufgezogene Feder eines Uhrwerks ist gleichfalls Energie gewissermaßen eingesargt. Hat die Feder Gelegenheit, sich zu entspannen, so ruft sie Bewegung hervor.



186. Schräges Tretrad für Ochsenantrieb



187. Von zwei Ziegenböcken angetriebenes Tretrad

Aus Jacob Leupold, Theatrum machinarum generale, Leipzig 1724

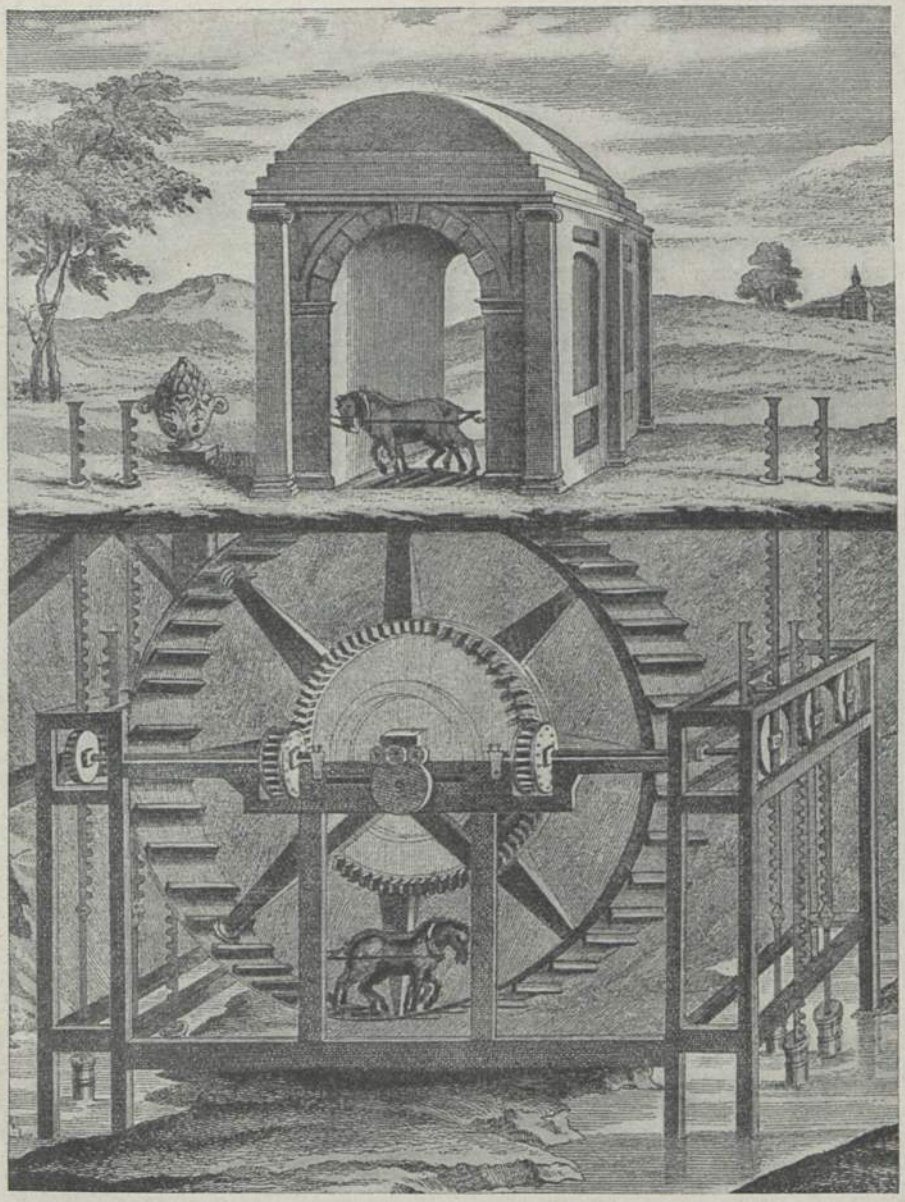
Das in einem Bergsee ruhende Wasser ist mit Energie erfüllt, und wenn man ein hinabführendes Gerinne schafft, so ist es jederzeit bereit, Energie abzugeben.

Die Energie macht einen unaufhörlichen Formwechsel durch. Die kinetische Energie der Handmuskeln wird in der Uhrfeder zur potentiellen, und, wenn das Werk läuft, wieder zur kinetischen. Ein noch besseres Beispiel für dieses Kräftespiel ist das freischwingende Pendel. Wenn es gerade im Begriff ist, in der äußersten Lage rechts seine Bewegung umzukehren, befindet es sich einen Augenblick in Ruhe. Die ihm innewohnende Kraft ist jetzt potentiell. Sie verwandelt sich, bis das Pendel die senkrechte Stellung erreicht hat, vollkommen in kinetische Energie, die nun das Pendel nach links weiter treibt, bis es hier die äußerste Stellung erreicht hat. Dann ist wieder die gesamte Bewegungsenergie in Energie der Lage verwandelt, und das Spiel beginnt von neuem.

Alle unsere Kraftmaschinen beruhen darauf, daß wir ein Gefälle bereitstellen, in das droben unaufhörlich potentielle Energie hineingezwängt wird, die während ihres ideellen Niederstürzens sich in Bewegungs-Energie verwandelt, um, drunten angekommen, sogleich wieder in potentielle Energie überzugehen. Das wird noch an einigen Beispielen erörtert werden.

Die beiden Energieformen sind in sehr vielen verschiedenen Arten zum Dienst für den Menschen bereit. Wir verwenden insbesondere

Spannungs-Energie,
Wärme-Energie,
Elektrische Energie,
Chemische Energie.



188. Walter Churchmans Kraftmaschine
Aus Veit Balthasar Denning, Sammlung nützlicher Maschinen und Instrumente

Spannung enthalten die Bogensehne, die Uhrfeder und der arbeitende Muskel. Aber auch die bewegten Luftmassen, deren Umlagerung uns als Wind bemerkbar wird, das Wasser in einem Fluß oder in einem Bergsee befinden sich in Spannung. Die verbrennenden Heizstoffe geben Wärme ab. Werden zwei verschiedene Metalle in eine leitende Flüssigkeit getaucht, so bilden sich zwischen der Oberfläche der beiden Metalle und der Flüssigkeit elektrische Unterschiede aus; sie rufen in einem Draht, der die Metalle verbindet, das Auftreten elektrischer Energie hervor. Die Stromerzeugung durch Dynamomaschinen gehört nicht hierher, da wir augenblicklich noch nicht in der Lage sind, eine Dynamo unmittelbar durch eine Naturkraft antreiben zu lassen, sondern immer erst eine andere Maschine dazwischen schalten müssen.

Auch die chemische Energie vermögen wir nicht unmittelbar zu nutzen. Sie ist in allen Körpern vorhanden, da sie deren kleinste Teile, die Moleküle oder Atome, zusammenhält. Wenn wir aber z. B. die chemische Energie der Kohle verwenden wollen, müssen wir sie auf hohe Temperatur bringen, damit sie sich sehr lebhaft mit Sauerstoff verbindet und in Kohlensäure mit geringem chemischen Energiegehalt übergeht. Die großen Wärmemengen, welche die Kohle, nachdem von außen her der Anstoß gegeben ist, bei ihrem chemischen Zerfall dauernd entwickelt, ist die Nutz-Energie.

Daß bei all diesen Vorgängen fortwährend die vorhin behauptete Energie-Um- und Rückformung sich vollzieht, ist ohne weiteres erkennbar. Die potentielle Energie der Bogensehne geht nach dem Abdrücken in Bewegungsenergie über, die auf den Pfeil übertragen wird. Ist dieser am Zielort, etwa auf einem Hausdach, angelangt, so enthält er wieder Energie der Lage. Das fallende Wasser setzt, aus der Ruhelage in einem Hochbecken hinaustretend, Maschinen in Bewegung, durch deren Lagerreibung tote Wärmeenergie entsteht. Die ruhende Wärmeenergie der verbrennenden Kohle wird an das Wasser abgegeben, der Dampf verleiht dem Kolben der Maschine kinetische Energie, diese wandert zur Dynamomaschine, aus der elektrische Energie zu zahlreichen Glühlampen fließt; in deren leuchtenden Fäden geht die Energie wieder in die untätige Form der Wärme über.

Die großen Kraftmaschinen, mit denen die Technik heute ihre Leistungen und Wirkungen hervorbringt, leben fast ausnahmslos von der Wärme oder der Energie des fallenden

Wassers; in bescheidenem Maß wird auch noch die Windkraft verwendet.

Letzten Endes ist die Quelle aller Energien die Königin unseres Planetensystems, die segnende Sonne. Denn sie hebt das Wasser aus dem Meer, damit es nach einer Wanderung in der Höhe auf das Gebirge niederfallen und von neuem dem Meer zuströmen kann. Sie ist es, die Druckunterschiede im Luftozean erzeugt, indem sie Luftmassen durch Erwärmung leichter macht und andere, kältere, hierdurch veranlaßt, in die Gebiete niederen Drucks nachzuströmen. Sie hat die Brennstoffe werden lassen, da die Pflanzen und Bäume nur emporwachsen können, wenn ihre Blätter Sonnenlicht trinken, und weil aus dem Holz der Torf, die Braunkohle und die Steinkohle entstanden sind.

Auch die Muskelkraft, die Mensch und Tier abzugeben vermögen, wurzelt in der Strahlung des Muttergestirns. Denn ohne pflanzliche Nahrung hätte das Tierreich sich nicht entwickeln und nicht im Menschen gipfeln können. Die Erdöle, und damit das in ihnen enthaltene Benzin, die immer häufiger für den Antrieb von Kraftmaschinen verwendet werden, sind Reste von Kleinlebewesen, die vor Jahrhunderttausenden gelebt und sich von Geschöpfen der Sonne genährt haben.

Es ist ebenso merkwürdig wie bedauerlich, daß wir heute noch, man kann ruhig sagen, zu dumm sind, die Wärme-Energie der Sonne unmittelbar zu nützen. Einige mehr spielerische Anordnungen für solchen Zweck ändern an der Tatsache nichts. Die Sonnen-Energie strahlt in ungeheuren Mengen ständig auf die Erde nieder, aber es geht uns in diesem Überfluß wie dem Verdurstenden inmitten des Ozeans. Wir darben in der Fülle. Die eben frisch ankommende Sonnen-Energie ist für unsere Technik unverdaulich, nur in konserviertem Zustand kann sie genossen werden. Wir verwerten die Tropfen in den Wasserfällen, die von den Sonnenstrahlen des vorigen Tags oder der vorigen Woche gehoben worden sind, die Kohle oder das Öl, in denen uralte Sonnenstrahlen auferstehen.

Einst werden klügere Geschlechter auf der Erde wandeln, denen es möglich sein wird, den mit Sonnenkraft gefüllten Becher unmittelbar zum Mund zu führen.

Aber auch auf der Erde gibt es einen bis zu den Dachsparren gefüllten, weitest gedehnten Energiespeicher der Natur, zu dem der Schlüssel noch nicht gefunden werden konnte. Bei der Verbrennung der Kohle werden durch die Verbindung mit Sauerstoff nur ihre Moleküle zerspalten. Gelänge es uns aber, die Atome aufzubrechen, so wandelte sich das heute ausfließende Energie-Brünnlein in einen gewaltig speienden Energie-Vulkan. Mit wenigen Kilogramm Kohle könnte dann ein Schiff von der Größe des „Imperator" den Ozean queren.

Daß eine Zerspaltung der Atome überhaupt möglich ist, hat uns das Radium gelehrt. Seine kleinsten Bauteile zerfallen freiwillig. Rutherford ist es gelungen, in äußerst bescheidenem Ausmaß eine gewaltsame Atom-Zersprengung vorzunehmen. Wann die Fortführung seiner Arbeiten praktische Bedeutung erlangen wird, ist nicht abzusehen.

Wir haben in den vorhergehenden Teilen dieses Werks und auch in dem laufenden Abschnitt sehr häufig die Ausdrücke Kraft, Energie und Leistung gebraucht, ohne eine scharfe Begriffsscheidung zwischen ihnen vorzunehmen. Im allgemeinen Sprachgebrauch fließen die Bedeutungen dieser Worte ineinander, aber die Maschinentechnik macht scharfe Unterschiede.

Kraft ist für den Ingenieur nur die Ursache für Bewegungsänderungen. Kraft muß vorhanden sein, wenn ein Körper von der Ruhe in Bewegung übergehen oder ein bewegter Körper stillgesetzt werden soll, wenn die Geschwindigkeit oder die Richtung einer Bewegung sich ändern. Aber Kraft allein kann, wie auch Faust erkannte, nichts wirken. Will die Kraft etwas vollbringen, so muß sie sich als Vollstrecker eines Werkzeugs, eines Körpers bedienen. Sie ist nur der Wille oder Sinn, der erst durch den Körper zur Tat werden kann.

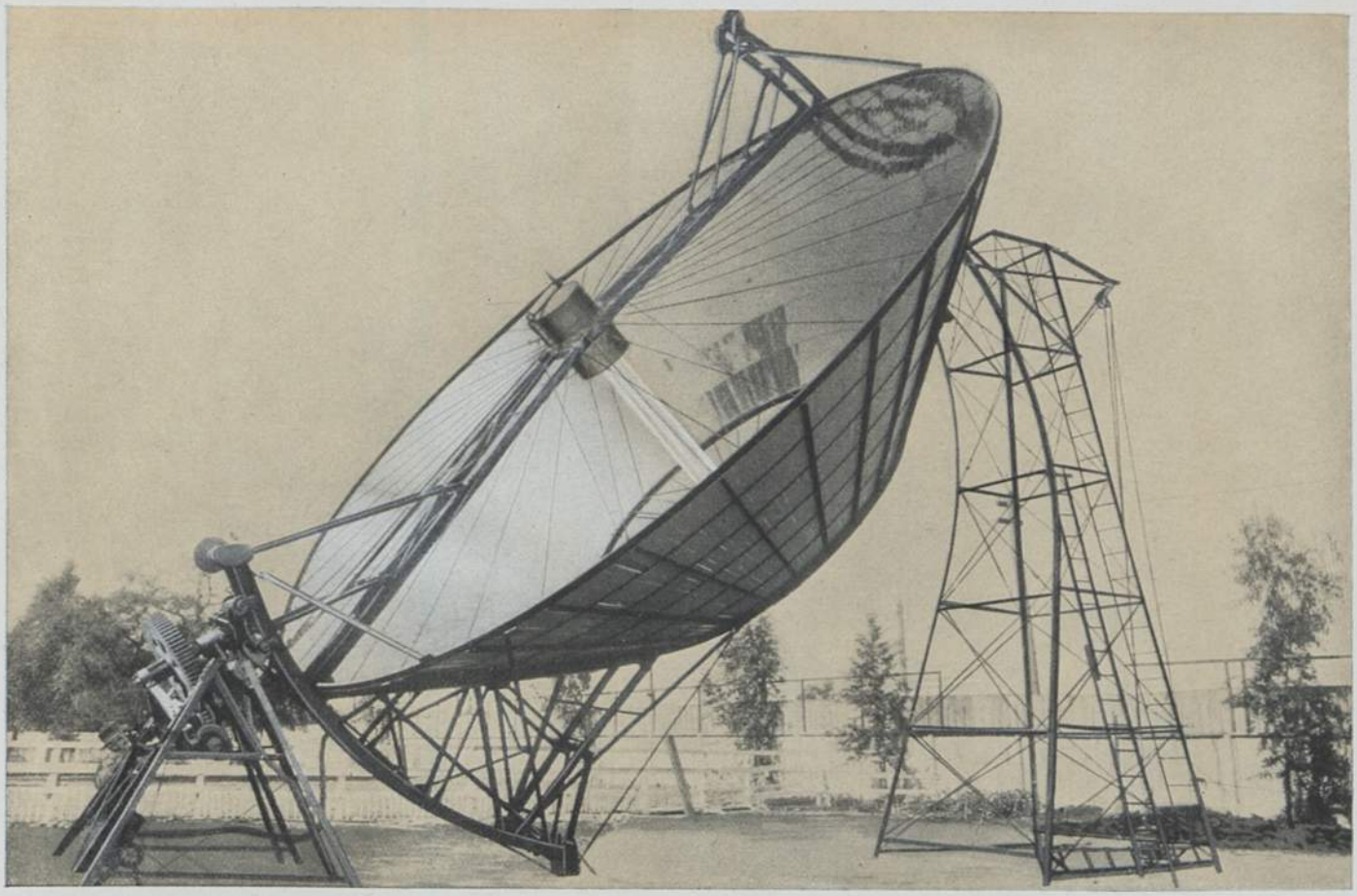
Der mit Kraft begabte Körper kann Energie oder Arbeit abgeben. Jegliche Arbeit auf der Erde wird von krafterfüllten Körpern vollbracht, indem sie einen Weg zurücklegen. In der Mechanik, der Grundlehre der Technik, ist Arbeit stets ein Produkt aus einer Kraft und einem Weg (Kraft × Weg).

Die Arbeit, die von einer Dampfmaschine geleistet wird, setzt sich zusammen aus der Dampfkraft, die auf den Kolben wirkt, und dem vom Kolben zurückgelegten Weg. Diese Arbeit kann zum Beispiel für den Antrieb einer Drehbank verwendet werden, wo sie wiedererscheint als der Weg, den das zu bearbeitende Eisenstück zurücklegt, und die Kraft, mit der es gegen die Schneide des Drehstahls geführt wird.

„Mit einer beliebig kleinen Kraft läßt sich", so schreibt Professor Vater, „eine beliebig große Arbeit hervorbringen, wenn man nur dafür sorgt, daß diese beliebig kleine Kraft einen entsprechend langen Weg zurücklegt. Ein sehr anschauliches Beispiel dafür bietet der Flaschenzug (Seite 35). So läßt sich z. B., wenn von Verlusten durch Reibung und sonstigen Verlusten abgesehen wird, unter Aufwendung derselben Kraft vermittels eines Flaschenzugs von zwei Rollen die doppelt so schwere Last heben als ohne Anwendung des Flaschenzugs, unter Benutzung eines vierrolligen Flaschenzugs die vierfache Last, unter Anwendung eines sechsrolligen Flaschenzugs die sechsfache Last usw. Handelt es sich nun darum, mit Hilfe von Flaschenzügen Lasten etwa von der Straße auf einen Speicher zu heben, so wird die Arbeit, welche durch das Hinaufziehen der Lasten verrichtet wurde, verschieden groß sein, je nach der Schwere der Lasten. Ist die zweite hinaufgezogene Last doppelt so schwer wie die erste, so ist auch doppelt soviel Arbeit verrichtet worden wie im ersten Fall, und doch können in beiden Fällen die Arbeiten von demselben Arbeiter unter Aufwendung der gleichen Kraft verrichtet worden sein, nämlich dann, wenn beim Heben der doppelt so schweren Last ein Flaschenzug von einer doppelt so großen Zahl Rollen verwendet wurde. Der Unterschied ist eben nur der, daß die Hand des Arbeiters beim Emporziehen der doppelt so schweren Last infolge des mehrrolligen Flaschenzugs einen doppelt so langen Weg zurückgelegt hat wie beim Heben der ersten, leichteren Last."

Die Arbeit oder Energie wird stets in einer fest bestimmten Einheit gemessen. Diese ist das Meterkilogramm, das heißt die Größe der Arbeit, die erforderlich ist, um eine Last von 1 Kilogramm 1 Meter hoch zu heben. 10 Arbeitseinheiten sind aufzuwenden sowohl wenn 2 Kilogramm 5 Meter hoch, wie wenn 5 Kilogramm 2 Meter hoch gehoben werden sollen.

Für die Praxis ist aber auch der Begriff Arbeit noch etwas Nebelhaftes. Fallende Wassertropfen vermögen, wie bekannt, einen Stein zu höhlen. Trotzdem wird der Steinmetz sich der Tropfen nicht bedienen, um ein Loch in einem Block herzustellen, denn es würde vielleicht ein Jahrhundert dauern,



1. Sonnenkraftmaschine mit rundem Parabolspiegel auf der Straußenfarm Pasadena bei Los Angeles in Kalifornien. Der von der Sonne erzeugte Dampf treibt eine Dampfmaschine von 15 Pferdestärken

2. Sonnenkraftmaschine mit fünf zylindrischen Parabolspiegeln in Meadi bei Kairo, die 50 Pferdestärken erzeugt. Phot. Jacques Boyer, Paris

## Ausnützung der Sonnenwärme zur Krafterzeugung

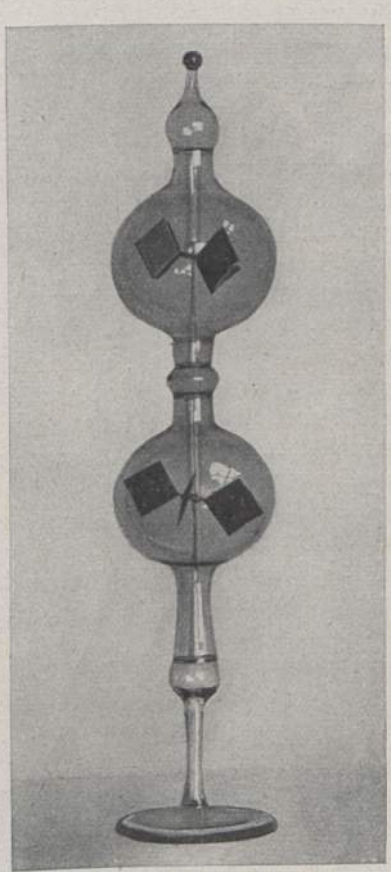
bis es fertiggestellt wäre. Der Techniker will wissen, in welcher Zeit eine Maschine eine bestimmte Arbeit zu vollbringen vermag; das nennt er dann ihre Leistung. Diese muß er kennen, um sich ein Bild von der Verwendbarkeit der Maschine machen zu können. Leistung ist das Produkt von Kraft, Weg und Zeit, wobei aber die Zeit als Divisor auftritt (Kraft × Weg : Zeit). Denn je länger die Zeit ist, die eine Maschine zur Vollbringung einer Arbeit braucht, desto geringer ist ihre Leistung.

Die Einheit, in der die Leistung gemessen wird, ist das Sekundenmeterkilogramm. Sind 10 Kilogramm in einer Sekunde 20 Meter hoch oder 20 Kilogramm in einer Sekunde 10 Meter hoch oder 20 Kilogramm in 2 Sekunden 20 Meter hoch gehoben worden, so ist jedesmal eine Leistung von 200 Sekundenmeterkilogramm vollbracht worden. Meist ist die Grundeinheit für die technischen Messungen zu klein, und man bedient sich bei ihnen deshalb, um Zahlen von unbequemer Größe in den Rechnungen zu vermeiden, als Einheit der Pferdestärke (PS) = 75 Sekundenmeterkilogramm.

Die Bezeichnung ist recht unglücklich gewählt, denn ein Pferd ist keineswegs imstande, auf die Dauer eine Pferdestärke zu leisten. Allenfalls kann es eine solche Leistung beim Anziehen eines Wagens für wenige Sekunden hergeben. Der Begriff wurde von dem großen Vervollkommner der Dampfmaschine, James Watt, in die Technik eingeführt; er ist in recht eigenartiger Weise dazu gekommen.

Eine der ersten von Watt erbauten Dampfmaschinen sollte in einer Brauerei aufgestellt werden, um ein Pumpwerk anzutreiben, das bisher durch ein Pferd in Bewegung gesetzt worden war. Der Brauer wollte sicher sein, eine Maschine von genügender Leistungsfähigkeit zu erhalten, und stellte daher die Wassermenge, die sein Pferd in 8 Stunden zu pumpen vermochte, fest, indem er das Tier während dieser Zeit mit Peitschenhieben unausgesetzt und bis zur äußersten Erschöpfung zur höchsten Kraftanstrengung an der Pumpmaschine zwang. Auf diese Art waren in den 8 Stunden 2 Millionen Kilogramm Wasser gefördert worden, woraus unter Berücksichtigung der Förderhöhe errechnet werden konnte, daß in jeder Sekunde 75 Kilogramm Wasser 1 Meter hoch gehoben worden waren. Hiernach maß Watt fortab die Leistung seiner Maschinen und nannte die Einheit Horse Power, was wörtlich übersetzt Pferdekraft bedeutet.

Wir haben nun erfahren, daß die Begriffe Energie und Arbeit in der Sprache des Technikers das gleiche bedeuten, daß aber Kraft etwas anderes und Leistung wiederum etwas anderes ist. Trotzdem werden wir nicht umhin können, auch in den folgenden Auseinandersetzungen keine scharfe Scheidung dieser Ausdrücke vorzunehmen. Denn es ist nun einmal üblich, von Kraftmaschinen zu sprechen, die eigentlich Arbeitsmaschinen heißen sollten, und selbst Ingenieure gebrauchen bei der Unterhaltung so trübe Mischworte wie Kraftleistung, Arbeitsleistung oder Arbeitskraft! Es wäre besser, wenn für die strengen Begriffe Bezeichnungen aus dem Griechischen oder Lateinischen gewählt worden wären; der lebendige Strom der Sprache ebnet schroffe Abfälle immer wieder ein.



189. Lichtmühle

Die Leistung, die von einer Maschine abgenommen werden kann, wird stets kleiner sein als die Leistung, die auf irgendeine Art an der Stelle gemessen wird, wo die Energie in die Maschine eintritt. Denn das Getriebe verzehrt durch Reibung und sonstige Widerstände einen Teil der Energie. Das Verhältnis der zugeführten Energie zur nutzbringenden Arbeit der Maschine nennt man ihren mechanischen Wirkungsgrad oder ihren Nutzeffekt. Wenn z. B. von 100 Energie-Einheiten, die der Maschine zugeführt werden, nur 35 wiedergewonnen werden können, so hat die Maschine einen Nutzeffekt von 35 v. H.

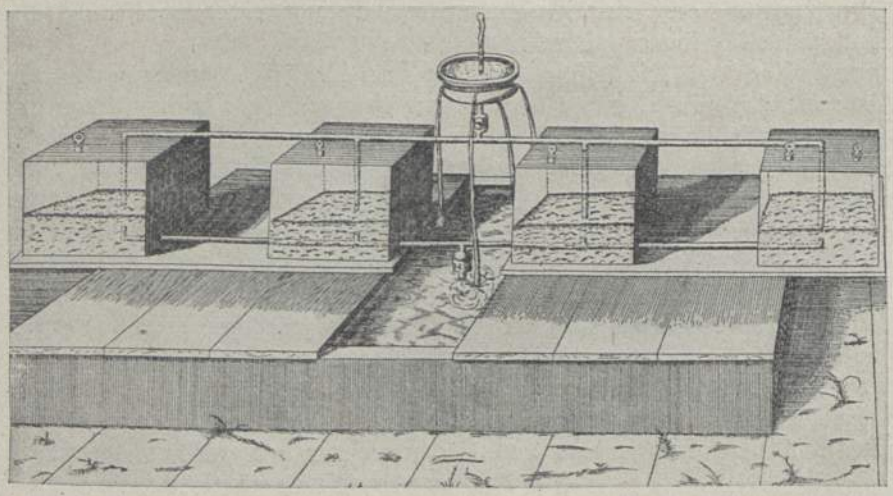
Da die Umwandlung von Wärme-Energie in mechanische Energie und das Übergehen von mechanischer Energie in Wärme-Energie Vorgänge sind, die im Bereich der Kraftmaschinen außerordentlich oft vorkommen, so ist es zur rechnerischen Verfolgung des Energieflusses unbedingt notwendig, zu wissen, wieviel an mechanischer Arbeit man eigentlich aus einer bestimmten Wärmemenge gewinnen kann, und umgekehrt, welche Wärmewirkung eine bestimmte Menge mechanischer Energie auszuüben vermag.

Der Weg hierzu ist bereits durch Julius Robert Mayer gewiesen worden, in dessen Lehre ja gerade die Energie-Wanderung den wichtigsten Platz einnimmt.

Die genauen Rechnungswerte wurden aber erst später durch den Engländer Joule und durch Helmholtz bestimmt. Sie verwandelten eine gemessene Menge mechanischer Arbeit, indem sie diese durch Reibung vernichteten, vollständig in Wärme und stellten deren Menge ebenfalls genau fest. Es ergab sich das Erwartete, daß nämlich einer bestimmten Menge mechanischer Arbeit stets dieselbe Wärmemenge entspricht und umgekehrt. Mayer hat diese Wandlung als das mechanische Äquivalent der Wärme und das thermische Äquivalent der Arbeit bezeichnet. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge bedeutet einen Besitz der Menschheit, der an Kostbarkeit den Entdeckungen Newtons wohl an die Seite gestellt werden kann.

Zur Durchführung der Rechnungen braucht man eine Einheit der Wärme-Energie. Gewählt wurde als solche die Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1 Kubikdezimeter oder 1 Kilogramm Wasser um 1 Grad Celsius wärmer zu machen, als es bisher gewesen ist. Man nennt diese Wärmemenge Kalorie — vom lateinischen calor = Wärme — auch Kilogramm-Kalorie oder große Kalorie. Es gibt nämlich daneben noch eine kleine Kalorie, die Gramm-Kalorie, die ausreicht, um 1 Kubikzentimeter oder 1 Gramm Wasser um 1 Grad Celsius zu erwärmen. Für technische Rechnungen aber ist die Gramm-Kalorie zu klein, weshalb hierbei stets die große Kalorie verwendet wird. Sie ist fortab stets gemeint, wenn von der Einheit der Wärmemenge gesprochen wird.

Sehr sorgfältige und oft wiederholte Messungen, die weit genauer waren als die Bestimmungen von Helmholtz und Joule, haben ergeben, daß aus einer Kalorie stets eine



190. Springbrunnen von de Caus, den die Sonnenwärme antreiben sollte
Aus Salomon de Caus, Die Ursachen der bewegenden Kräfte, 1615

Energie-Menge von 427 Meterkilogramm entsteht. Danach ist die Arbeitsfähigkeit, die einer Kalorie innewohnt, imstande, 1 Kilogramm 427 Meter hoch oder 427 Kilogramm 1 Meter hoch zu heben. Wenn ein Stein von 1 Kilogramm Gewicht aus einer Höhe von 427 Metern hinabfällt, so entsteht beim Aufschlagen, von den unvermeidlichen Verlusten abgesehen, eine Wärmemenge, die ausreicht, um 1 Kilogramm oder 1 Liter Wasser um 1 Grad Celsius zu erwärmen.

Nach diesen allgemeinen Darlegungen wollen wir ganz kurz den menschlichen und tierischen Körper bei seiner Tätigkeit als Kraftmaschine betrachten, um alsdann über die Episode der sofortigen Verwertung von Sonnenwärme zu den Maschinen überzugehen, die heute von der Technik als Großlieferer der Energie benutzt werden. Es würde bei den Ausführungen sehr unbequem sein, stets der Tatsache eingedenk zu bleiben, daß alle diese Vorrichtungen keine Erzeuger, sondern nur Umformer von Energie sind. Daher soll es erlaubt sein, der Kürze halber von Krafterzeugung zu sprechen, da das nun einmal bei der Verborgenheit der tatsächlichen Hergänge eine übliche Redewendung ist.

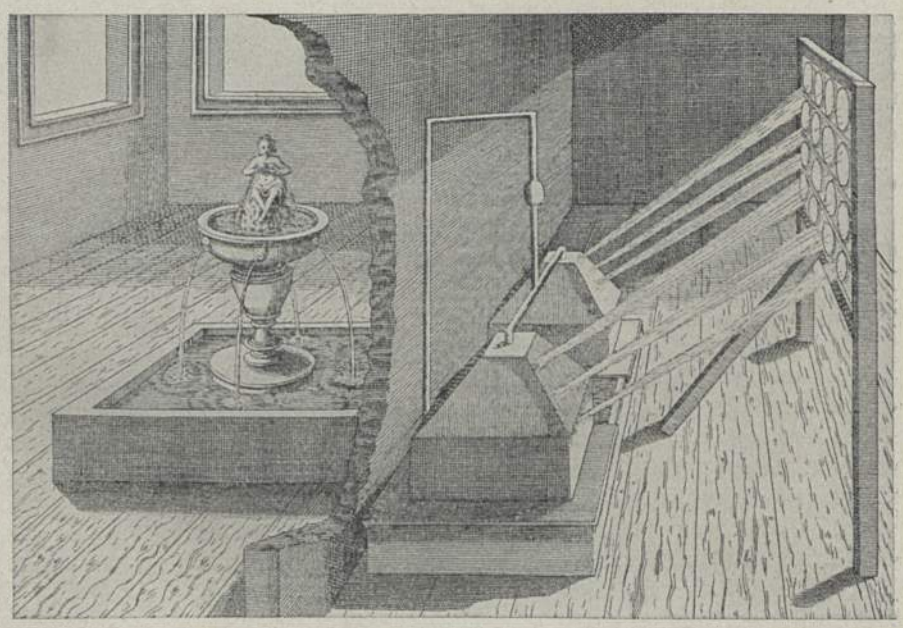
Der menschliche Körper ist eine Kraftmaschine mit sehr schlechtem Wirkungsgrad. Nur ein geringer Teil der Wärme-Energie, die aus den Speisen durch langsame Verbrennung im Körperinneren bereitet wird, kann als Arbeit genutzt werden. Das übrige dient dazu, den Körper zu erhalten, den Ablauf der Lebensprozesse zu ermöglichen. Das Gefühl für den geringen Nutzeffekt seiner Körper-Maschine wohnt unbewußt im Menschen. Schreber meint, „daß der Widerwille des Menschen gegen körperliche Arbeit im Bau seines Körpers begründet ist".

Es wird angenommen, daß der Mensch bei achtstündiger Tagesarbeit nicht mehr als 5½ Meterkilogramm in der Sekunde zu leisten vermag. Es ist das der 13,6. Teil einer Maschinen-Pferdestärke. Gewöhnlich setzt man, nach Matschoß, bei vergleichenden Berechnungen die Leistung von 12 Menschen der einer Maschinen-Pferdestärke gleich. Es darf aber nicht vergessen werden, daß die menschliche Leistung nur für 8 Stunden innerhalb eines Tags aufgebraucht werden kann, während die Maschine ununterbrochen Tag und Nacht zu arbeiten vermag. Einer Dampfmaschine von 100 Pferdestärken sind deshalb nicht 1200, sondern bestenfalls 3600 menschliche Arbeitskräfte der Leistung nach gleichwertig.

Im Gegensatz zu den toten Gebilden aus Eisen und Stahl ist das denkende Wesen nicht immer in gleicher Weise zur Arbeit aufgelegt. Die menschliche Leistungsfähigkeit wechselt mit der Stimmung, aber auch mit der Art, in der die Körpermaschine benutzt wird. Wenn es notwendig ist, kann für kurze Zeit Übermenschliches geleistet werden; für Sekunden bringt der Mensch wohl auch einmal mehr als eine Pferdestärke hervor. Blix hat die folgende Liste über Arbeitsleistungen des Menschen zusammengestellt, in der besonders die ganz kurzen Hochleistungen in den letzten beiden Zeilen beachtenswert sind.

| Art der Arbeit | Dauer | Leistung in Sekunden-Meter-kilogramm |
|---|---|---|
| Beim Berg- und Treppensteigen | 8 Stunden | 10,5 |
| Als Träger | 8 Stunden | 11,0 |
| Auf dem feststehenden Fahrrad (im Turnsaal) | 3 Stunden | 13,6 |
| An der Handkurbel | 1½ Stunden | 12,5 |
| Beim Wettrudern | 7 Minuten | 18,7 |
| An der Spritze | 2 Minuten | 28,6 |
| Beim Ziehen | 48 Sekunden | 30,0 |
| Beim Treten | 30 Sekunden | 60,9 |
| Beim Treppensteigen mit Last | 4 Sekunden | 95,4 |
| Beim Treppensteigen ohne Last | 4 Sekunden | 101,2 |

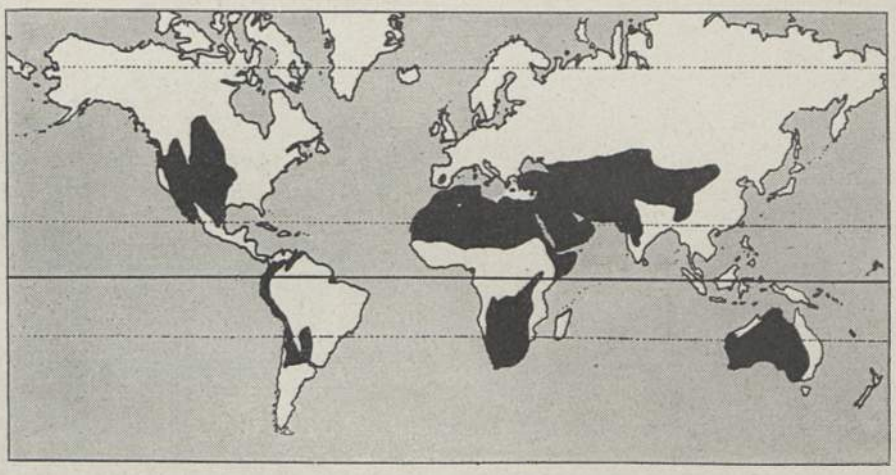
Von den Vorrichtungen, die erdacht wurden, damit die Muskelkraft des Menschen bei Dauerarbeit bestens ausgenutzt werden kann, ist die Kurbel die älteste und wichtigste. Das



191. Wie sich de Caus die Einrichtung seines Sonnenmotors dachte
Aus Salomon de Caus, Die Ursachen der bewegenden Kräfte, 1615

Heben von Lasten war wohl die erste schwere Aufgabe, die dem Arbeiter gestellt wurde, und gerade hierbei vermag die Kurbel vorzügliche Dienste zu leisten. Bei ihrer Bewegung wirken nicht nur die Armmuskeln, auch das Gewicht des Körpers wird genutzt. Das ist noch weit mehr der Fall, wenn statt der Armmuskeln die Beinmuskeln in Tätigkeit treten.

So wurde, wie wir bereits in Abschnitt 23 gehört haben, zum Antrieb von Hebezeugen, aber auch zur Erzeugung einer Drehbewegung für andere Zwecke lange Zeit das Tretrad verwendet. Um kleine Maschinen in Bewegung zu setzen, bedient man sich des Trittbretts mit Triebstange, so für Schleifstein und Nähmaschine. Es ergibt sich hierbei der große Vorteil, daß die Hände zur Verrichtung anderer Arbeit frei werden.



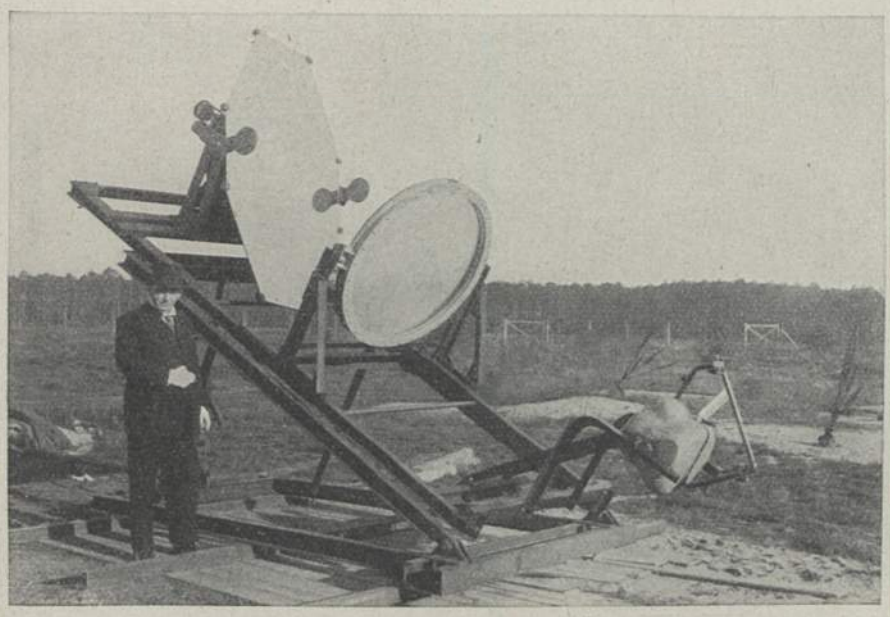
192. Ausnützung der Sonnenwärme

Die schwarzen Flächen bezeichnen die Gebiete der Erdoberfläche, die für eine wirtschaftliche Ausnutzung in Frage kommen. Techno-Photographisches Archiv, Berlin

Was eben über die Maschine Mensch gesagt wurde, gilt ebenfalls für die Maschine Tier. Auch für die Tiere sind die Kraftmaschinen Erlöser geworden. Dauererzeugung von Arbeit durch Ochs oder Pferd ist heute selten, sie kommt wohl nur noch auf dem Land vor für den Antrieb von kleinen Pumpwerken oder Erntemaschinen. Zur Umwandlung der tierischen Muskelkraft in drehende Bewegung wird hier der Göpel benutzt, eine bereits hochbetagte Maschine.

Bild 183 zeigt die Einrichtungen eines neuzeitlichen Pferdegöpels. In den Körper eines Zahnrads mit senkrechter Drehachse sind vier Holzbalken gesteckt, an deren Enden ebenso viele Pferde gespannt werden können. Die Arme sind durch Spannstangen gegeneinander verstrebt, so daß die Abstände stets die gleichen bleiben. Das große Zahnrad greift in ein kleineres mit wagerechter Drehachse ein. Hieran ist eine Welle befestigt, in der sich ein Universal- oder Kardan-Gelenk (Band II, Seite 107) befindet. Die anzutreibende Maschine braucht daher nicht genau in der Verlängerung der Getriebe-Achse aufgestellt zu werden, sondern kann ohne Nachteil für den Antrieb in beliebigem Winkel hierzu stehen.

In Amerika werden auch Tretgöpel benutzt. Hier sucht das Pferd eine geneigte Bahn hinaufzusteigen, die sich aber unter dem Druck seiner Hufe ständig zurückschiebt. Sie wird von einem endlosen breiten Band gebildet, auf dem Querhölzer für den sicheren Angriff der Hufe befestigt sind. Ein Tretgöpel mit Rad ist bereits im 23. Abschnitt auf Bild 101, Seite 41, dargestellt. Der im gleichen Abschnitt erwähnte Jacob Leupold beschreibt in seinem Werke „Theatrum machinarum generale" eine ganze Reihe Tretgöpel. Wir bringen davon zwei von sitzenden Männern betriebene Treträder (Bild 184 und 185), die Leupold dem Buche „Schatzkammer mechanischer Künste" von Rammelli entnimmt und wegen ihrer mangelhaften Ausnutzung der menschlichen Kraft heftig kritisiert, sowie zwei von Tieren angetriebene Tretgöpel (Bild 186 und 187). Ein Denkmal des Kraftmaschinenbaus längst vergangener Zeiten ist die auf Bild 188 dargestellte Anlage. Die oben wie die unten fest angeschirrten Pferde drehen beim Vorwärtsschreiten das Tretrad in gleicher Richtung. Es bewegt die Kolben mehrerer Pumpen. Diese wurden auf- und abwärts bewegt, und deshalb war es notwendig, daß die beiden Zahnräder, die in das mittlere Kammrad eingriffen, die Drehrichtung wechselten. Wie dies bei immer gleichsinnigem Umlauf des Kammrads bewerkstelligt wurde, ist aus der Erklärung in Hennings Buch „Sammlung nützlicher Maschinen und Instrumente" nicht ausreichend zu erkennen.

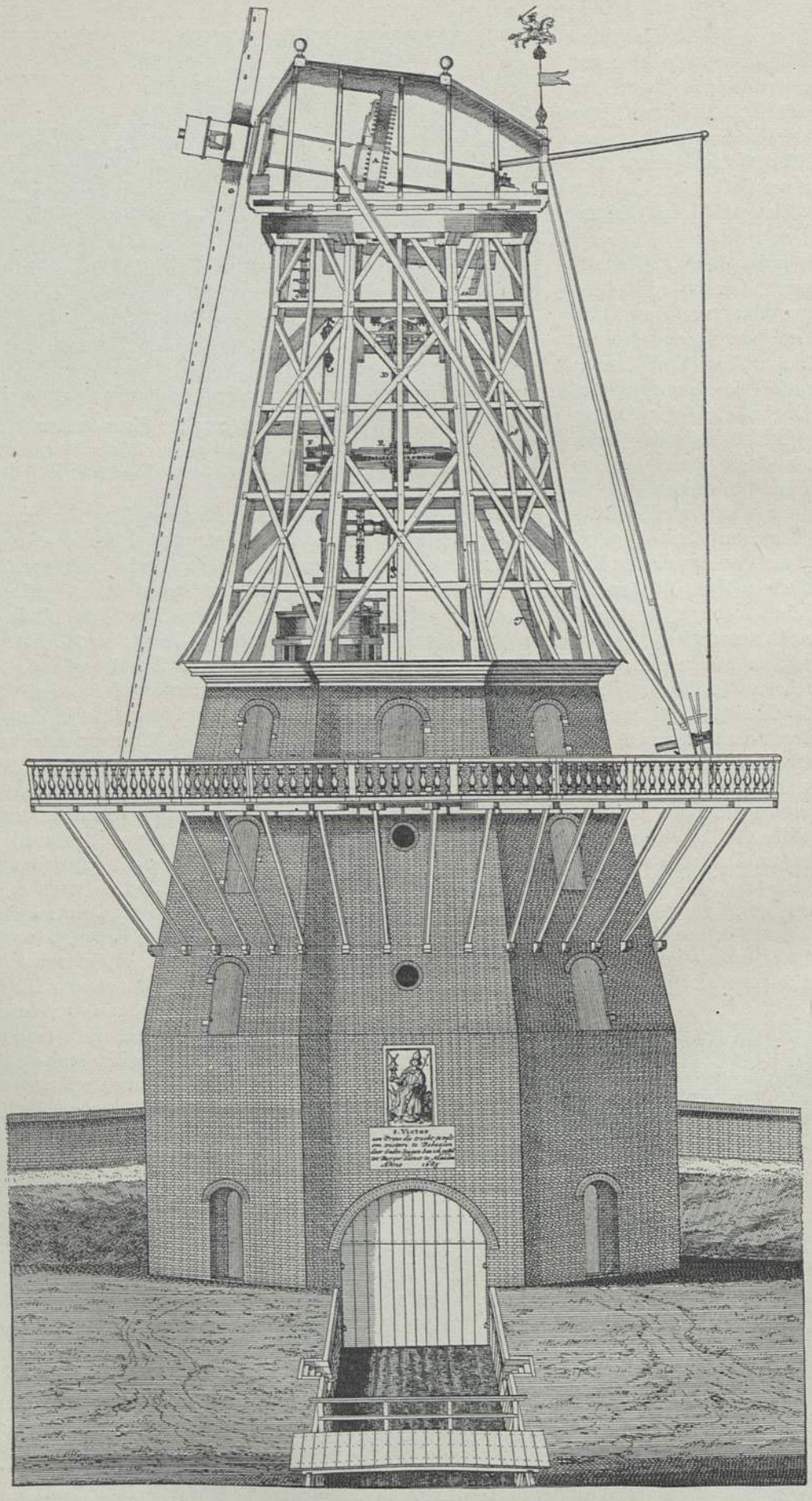


193. Sonnenkraftmaschine von Professor Dr. A. Marcuse

Die von der Spiegelfläche zurückgeworfenen Sonnenstrahlen werden durch die Linse restlos auf den im Brennpunkt angebrachten Kessel geworfen

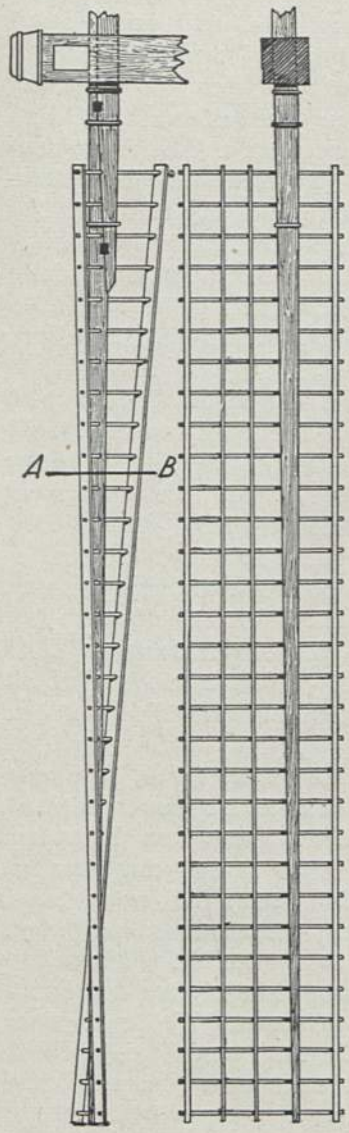
In das Zeitalter des Tierschutz-Vereins passen derartige Vorrichtungen, die das Tier zur stumpfsinnigsten Arbeit zwingen, nicht mehr hinein, und sie werden selbst bei weitergebildeten Formen nur noch in Ausnahmefällen angewendet.

Die Natur mit ihren unerschöpflichen Energie-Quellen kann sich eine Energie-Vergeudung ungeheuerster und für uns Menschen völlig unbegreiflicher Art gestatten. Die Sonne, deren Temperatur 6000 bis 8000 Grad beträgt, strahlt von ihrer Oberfläche, die 12 000 mal größer ist als der Mantel der Erde, unermeßliche Energie-Mengen in den Weltenraum. Sie werden zum weitaus größten Teil unnütz ausgesendet, denn der Raum um die Sonne ist fast

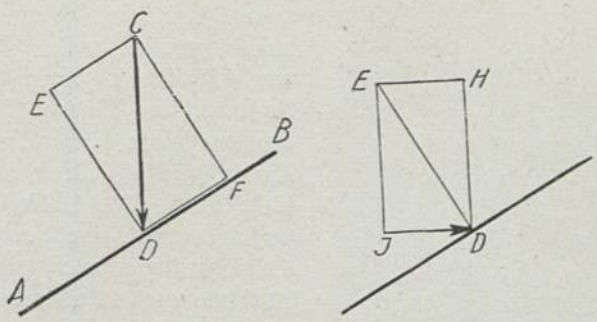


194. Holländische Windmühle

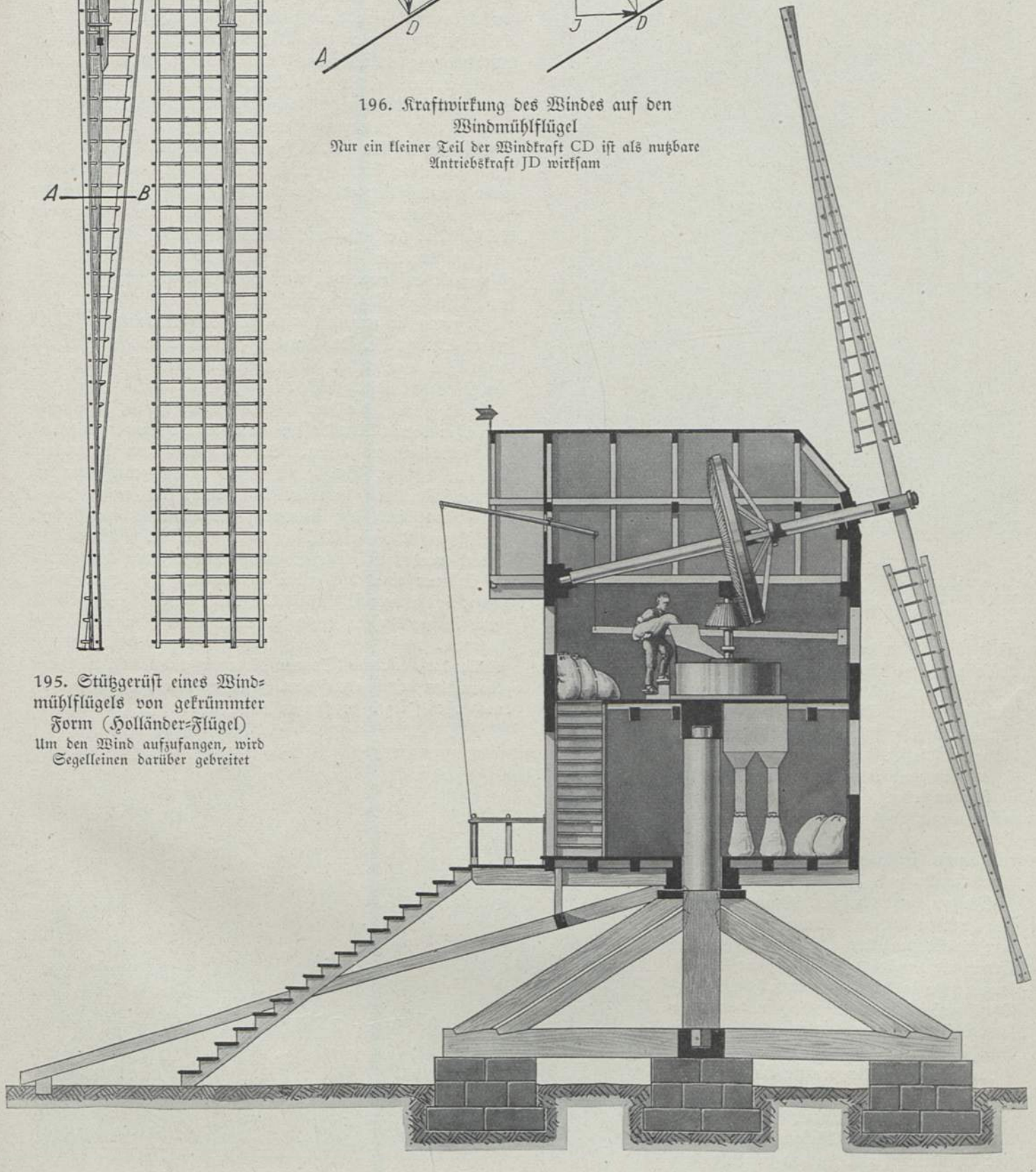
Das Mühlenhaus steht fest, nur das Dach mit der Hauptwelle und den Flügeln ist drehbar. Aus Pieter Linperch, Architectura mechanica of Moole-Boek van eenige opstallen van Moolens nevers hare Gronden, Amsterdam 1727




195. Stützgerüst eines Windmühlflügels von gekrümmter Form (Holländer-Flügel)
Um den Wind aufzufangen, wird Segelleinen darüber gebreitet




196. Kraftwirkung des Windes auf den Windmühlflügel
Nur ein kleiner Teil der Windkraft CD ist als nutzbare Antriebskraft JD wirksam



197. Schnitt durch eine deutsche Bockmühle
Das ganze Mühlenhaus ist auf dem Bock drehbar gelagert

198. Windmotor auf einem Wasserturm
Die selbsttätige Regelung der Flügelstellung erfolgt durch Zusatzfahne. Vereinigte Windturbinenwerke A.-G., Dresden-Reick

völlig leer. Nur an ganz wenigen Stellen schweben darin kleine rundliche Gebilde, die Planeten mit ihren Monden.

Auf die Erde gelangt nur $^1/_{225}$ Milliontel der ausgestrahlten Sonnen-Energie. Dieser Teilbetrag ist immer noch so riesig, daß am Aquator jährlich 700 Billionen Kubikmeter Wasser verdampfen, das ist ein Ozean, der ganz Europa mit einer Tiefe von 66 Metern bedecken könnte. Ständig langt so viel Energie von der Sonne auf unserem Heimatstern an, daß sie, voll und verlustlos ausgenutzt, imstande wäre, 350 Billionen Pferdestärken zu leisten.

Wie wir bereits wissen, ist uns aber eine irgendwie in Betracht kommende, unmittelbare Ausbeutung des Arbeitsvermögens der Sonne nicht möglich. Es gibt zwar Vorrichtungen hierfür, die in einzelnen Fällen Nützliches wirken, sie treten jedoch auf dem Gesamtbild der Kraftmaschinen-Technik völlig in den Hintergrund.

In unseren Breiten, wo die Sonnenwärme mit Ausnahme weniger Wochen im Jahr nur schwach einstrahlt, bringen wir es in der Gattung der Sonnen-Maschinen nicht über eine Spielerei hinaus. In den Schaufenstern von Geschäften, in denen optische oder feinmechanische Geräte verkauft werden, sieht man öfters einen kleinen Apparat ausgestellt, der Lichtmühle genannt wird. In einem Glasgefäß befinden sich vier Flügel aus feinem Blech, die sich um eine senkrechte Achse drehen können (Bild 189). Jedes der Bleche ist auf der einen Seite blank, auf der anderen durch Ruß schwarz gefärbt. Wenn das Sonnenlicht auf die Vorrichtung fällt, wird es von den ihm zugekehrten blanken Flächen zurückgeworfen, von den schwarzen aber aufgenommen. Die einseitige Erwärmung der Bleche bewirkt, daß eine leichte Luftbewegung entsteht, durch welche die Flügel in Drehung versetzt werden. Statt Lichtmühle müßte man besser Wärmemühle sagen, denn nicht die Licht-, sondern die Wärmestrahlung ruft die Bewegung hervor.

Salomon de Caus, dessen Anteil an der Erfindung der Dampfmaschine lange Zeit stark überschätzt worden ist, ein mehr phantastischer als erfindungsreicher Kopf, gab in seinem 1615 erschienenen Werk „Die Ursachen der bewegenden Kräfte" an, wie man mittels Sonnenwärme einen Springbrunnen betreiben könne. Durch Linsen fallen die Strahlen gesammelt auf zwei oder vier geschlossene Behälter, die etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllt sind. Die darüber liegende Luft preßt, wenn sie erwärmt wird, das Wasser durch ein Rohr zu der Springdüse. Der Apparat (Bild 190 und 191) ist nie ausgeführt worden, er hätte auch auf europäischem Boden das Erwartete nicht geleistet.

In Gegenden, die dem Aquator näher liegen, kann man immerhin beträchtliche Leistungen durch die Sonne unmittelbar hervorbringen lassen. Schon Heron von Alexandria hat um 100 v. Chr. einen Apparat angegeben, der bei Sonnenbestrahlung imstande sein sollte, Wasser zu heben. Mouchot baute auf Anregung Napoleons I. verschiedene Vorrichtungen dieser Art, mit denen tatsächlich Wasser gefördert worden ist. Der Schwede Ericsson, den wir bereits als Erbauer eines der ersten Schraubenschiffe kennengelernt haben, beschäftigte sich sehr lebhaft mit dem Gegenstand und baute in den Jahren 1868 bis 1883 etwa zehn verschiedene Apparate.

Alle diese älteren Sonnen-Motoren und auch die heute gebrauchten beruhen auf dem Grundgedanken, Sonnenwärme durch Hohlspiegel zu fangen und sie konzentriert auf Ge-

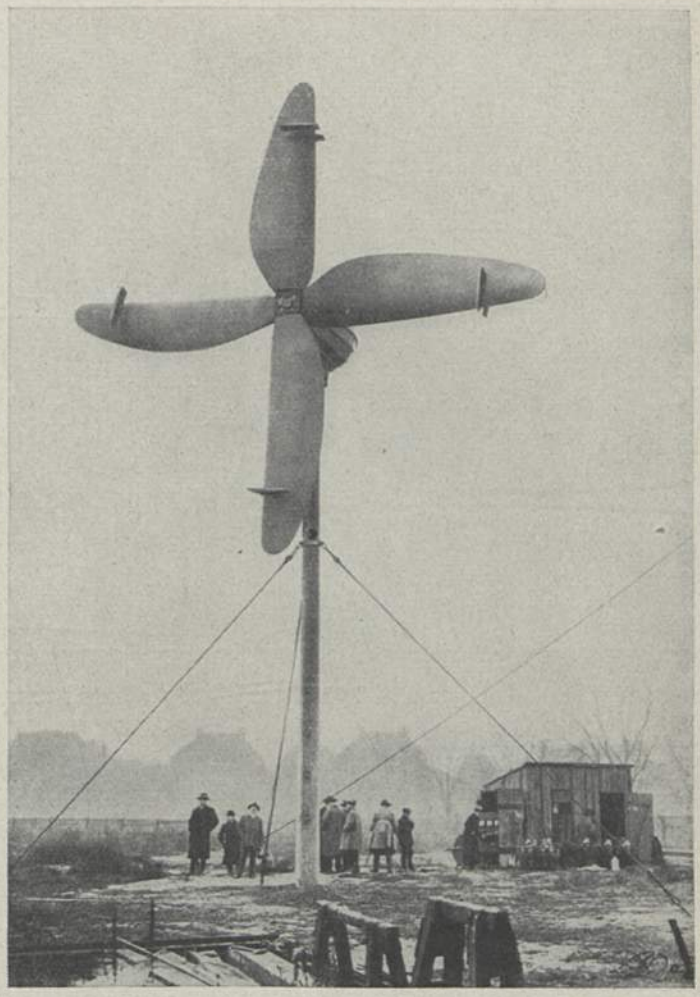
199. Windmotor mit Wasserbehälter im Gerüst
Ausführung der Vereinigten Windturbinenwerke A.-G., Dresden-Reick

fäße zu werfen, in denen durch die Hitze Wasser in Dampf verwandelt wird. Man sollte daher eigentlich nicht von Sonnenmaschinen, sondern von Sonnenkesseln sprechen. Die Einrichtungen sind gedanklich gar zu einfach, als daß man Nutzen in großem Ausmaß von ihnen erwarten könnte.

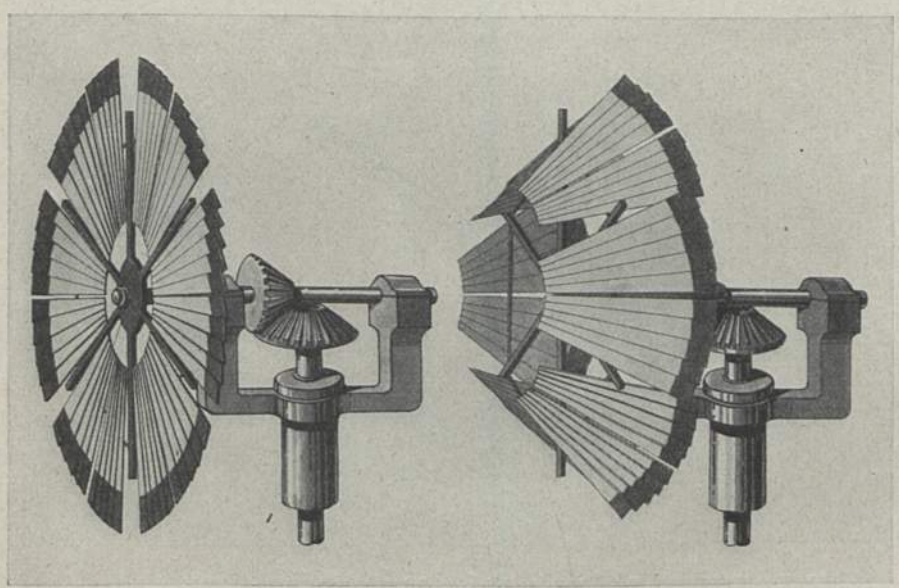
Auf der Straußenfarm Pasadena bei Los Angeles im Sonnenland Kalifornien ist seit 1901 ein parabolisch gekrümmter Schirm (Tafel VI, 1) aufgestellt, der 11 Meter größten Durchmesser hat und 5 Meter Tiefe besitzt. Er ist auf der einen Seite mit mehr als 1700 kleinen Spiegeln ausgelegt. In der gemeinsamen Brennlinie aller dieser Spiegel befindet sich ein 4 Meter langer Dampfkessel, der ½ Kubikmeter Wasser faßt. Durch ein Uhrwerk werden der spiegelnde Schirm und der Kessel ständig der scheinbaren Sonnenbewegung nachgeführt. Der Kessel ist zur besseren Festhaltung der Wärme mit einer schwarzen Schicht bedeckt und erzeugt genügend viel Dampf zum Betrieb einer Dampfmaschine von 15 Pferdestärken. Diese treibt eine Pumpe, eine Dynamo-Maschine, mit der Akkumulatoren geladen werden, und mehrere Ventilatoren. Es sind in Kalifornien und Peru noch mehrere Anlagen dieser Art in Betrieb; ihre Konstruktion geht auf Entwürfe von Ericsson zurück.

In Meadi bei Kairo sind seit 1913 nach den Angaben von Shuman fünf Parabolspiegel von zusammen 1220 Quadratmetern Fläche aufgestellt, deren jeder einen röhrenförmigen Kessel beheizt. Die halbrunden Gerüste der Spiegel können sich leicht auf Rollen drehen und werden mit ihren Kesseln selbsttätig dem Gang der Sonne nachgeführt. Der erzeugte Dampf treibt eine Maschine von 50 Pferdestärken, mit deren Hilfe eine Baumwoll-Pflanzung von 200 Hektar bewässert wird (Tafel VI, 2). Shuman hat für die Errichtung weiterer Anlagen dieser Art, obgleich die erste die in sie gesetzten Erwartungen nicht erfüllt hat, in London die Sun Power Company (Sonnenkraft-Gesellschaft) begründet, die in vielen Ländern, darunter auch in Deutschland, Patente auf Drehvorrichtungen für große Spiegel genommen hat.

Auf Anregung des bayerischen Ministeriums für Landwirtschaft hat Dr. Oscar Kausch im Jahre 1920 ein Buch mit dem Titel „Die unmittelbare Ausnutzung der Sonnen-Energie" geschrieben. Er stellt darin, größtenteils aus Patentschriften, alle Einrichtungen zusammen, die bisher für den genannten Zweck geschaffen worden sind. Das Ministerium beabsichtigte nämlich, ein „Forschungsinstitut für die direkte Ausnutzung der Sonnen-Energie" zu gründen, dessen erste vorbereitende Tat dieses Werk sein sollte. Die Errichtung der Gesellschaft hat bisher aber noch nicht stattgefunden, und es ist fraglich, ob Bayern, in dessen Gebiet die durchschnittliche Jahrestemperatur ja recht niedrig bleibt, hierfür das geeignete Land ist. (Vergleiche die Übersichtskarte auf Bild 192.)



200. Aerodynamo von K. Bilau
mit Bremsklappen zur selbsttätigen Regulierung der Umlaufgeschwindigkeit. Phot. R. Sennecke, Berlin

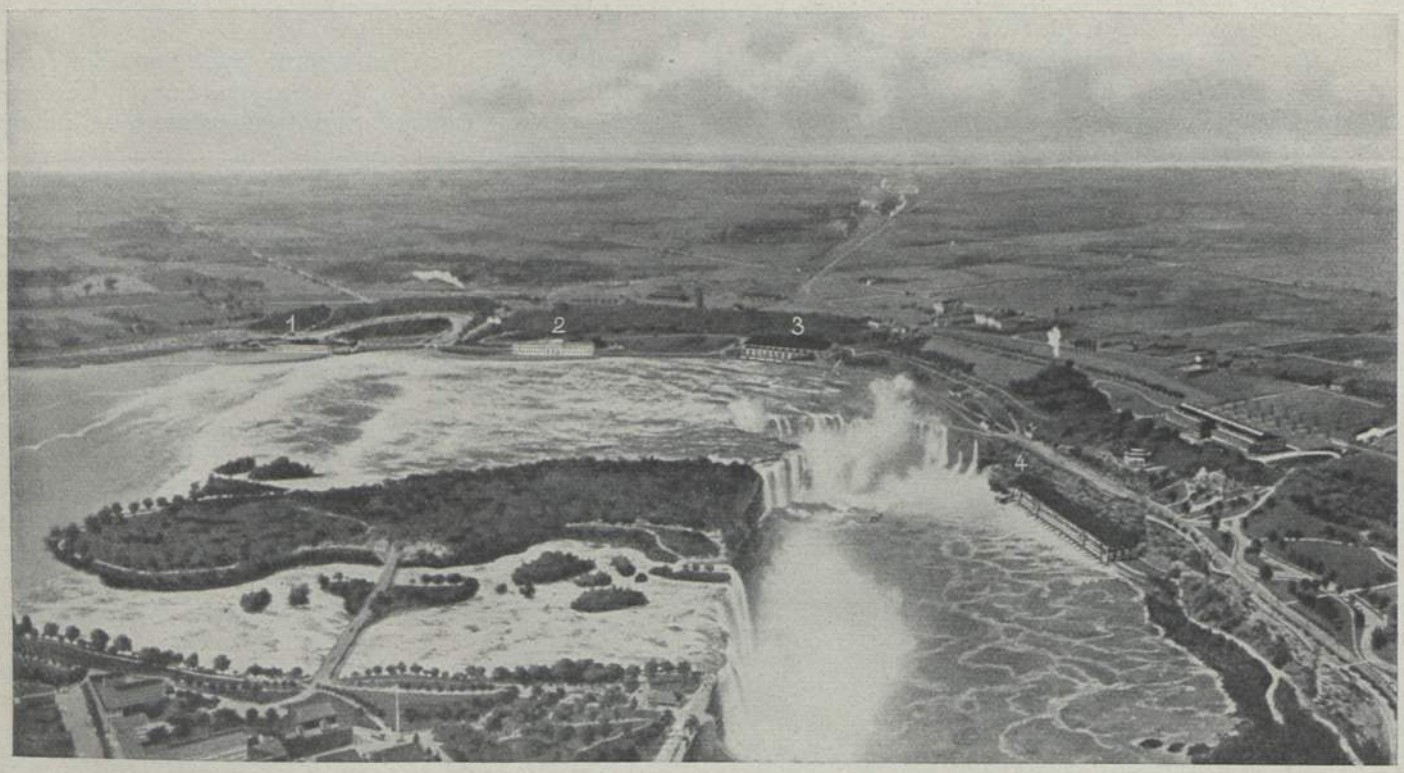


201. Selbsttätige Regelung der Flügelstellung nach dem System von Halladay

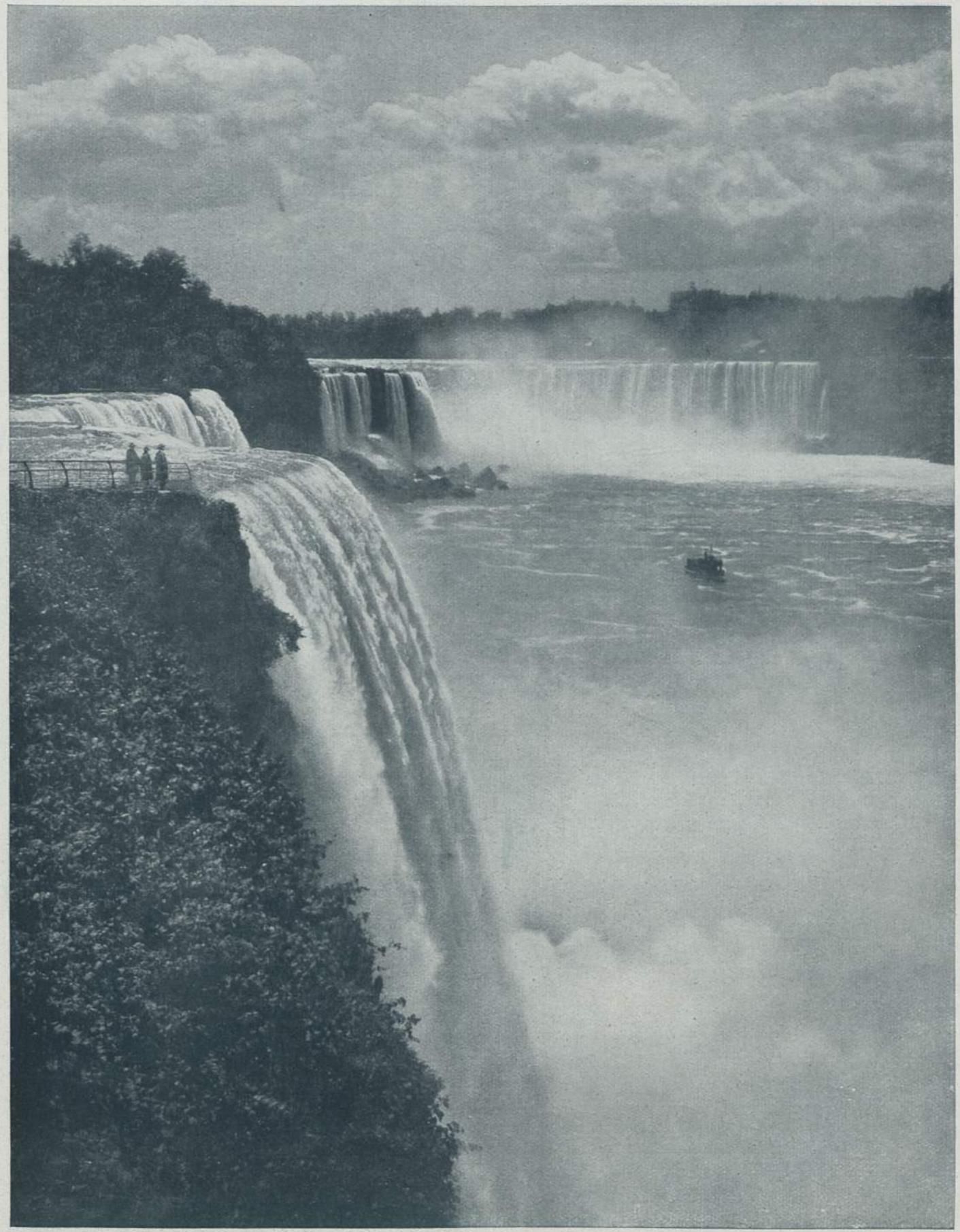
Alle diese Anlagen erfüllen zwar insofern ihren Zweck, als mit Hilfe der Sonnenstrahlen tatsächlich gespannter Kesseldampf erzeugt wird, der zum Betrieb von Dampfmaschinen dient. Aber der Wirkungsgrad läßt noch außerordentlich viel zu wünschen übrig. Beispielsweise müßte die zuletzt erwähnte Anlage in Meadi mit einer Spiegelfläche von 1220 Quadratmetern eine Sonnenstrahlung mit einer Dauerleistung von 1580 Pferdestärken aufnehmen. Rechnet man selbst mit einem sehr schlechten Wirkungsgrad von nur 20 %, so sollte sie also immerhin etwa 300 effektive Pferdestärken erzeugen. Tatsächlich aber liefert sie nur 50 Pferdestärken, was einem Wirkungsgrad von nur etwa 3 % entspricht.

202. Übersichtskarte des Stromversorgungsgebietes der Niagarafälle

Nun könnte man sich ja auf den Standpunkt stellen, daß die Sonnenenergie nichts kostet und der Wirkungsgrad daher ziemlich gleichgültig sei. Das wäre aber ein Trugschluß, denn die Anlagen selbst werden bei einem derartig schlechten Wirkungsgrad für eine gegebene Leistung unverhältnismäßig groß und entsprechend teuer. Berechtigtes Interesse dürfen daher die neuen Arbeiten eines deutschen Erfinders, des Professors Dr. Adolph Marcuse von der Berliner Universität, auf diesem Gebiete beanspruchen. Marcuse geht von dem Grundsatze aus, die einmal auf die Spiegel fallende Sonnenenergie nun auch möglichst restlos festzuhalten und ihr jedes nachträgliche Entweichen durch besondere Mittel (Wärmefallen) unmöglich zu machen. Zu diesem Zweck arbeitet er mit aus Preßglas bestehenden Hohllinsen, die mit einer lichtbrechenden Flüssigkeit gefüllt sind. Die Herstellung dieser Linsen gestaltet sich begreiflicherweise sehr viel billiger als diejenige geschliffener Massivlinsen. Außerdem ist man in der Lage, sie so zu formen, daß sie die sämtlichen von dem Spiegel darauf geworfenen Sonnenstrahlen verlustlos und beinahe punktförmig konzentrieren. Im Brennpunkte der Linse befindet sich dann

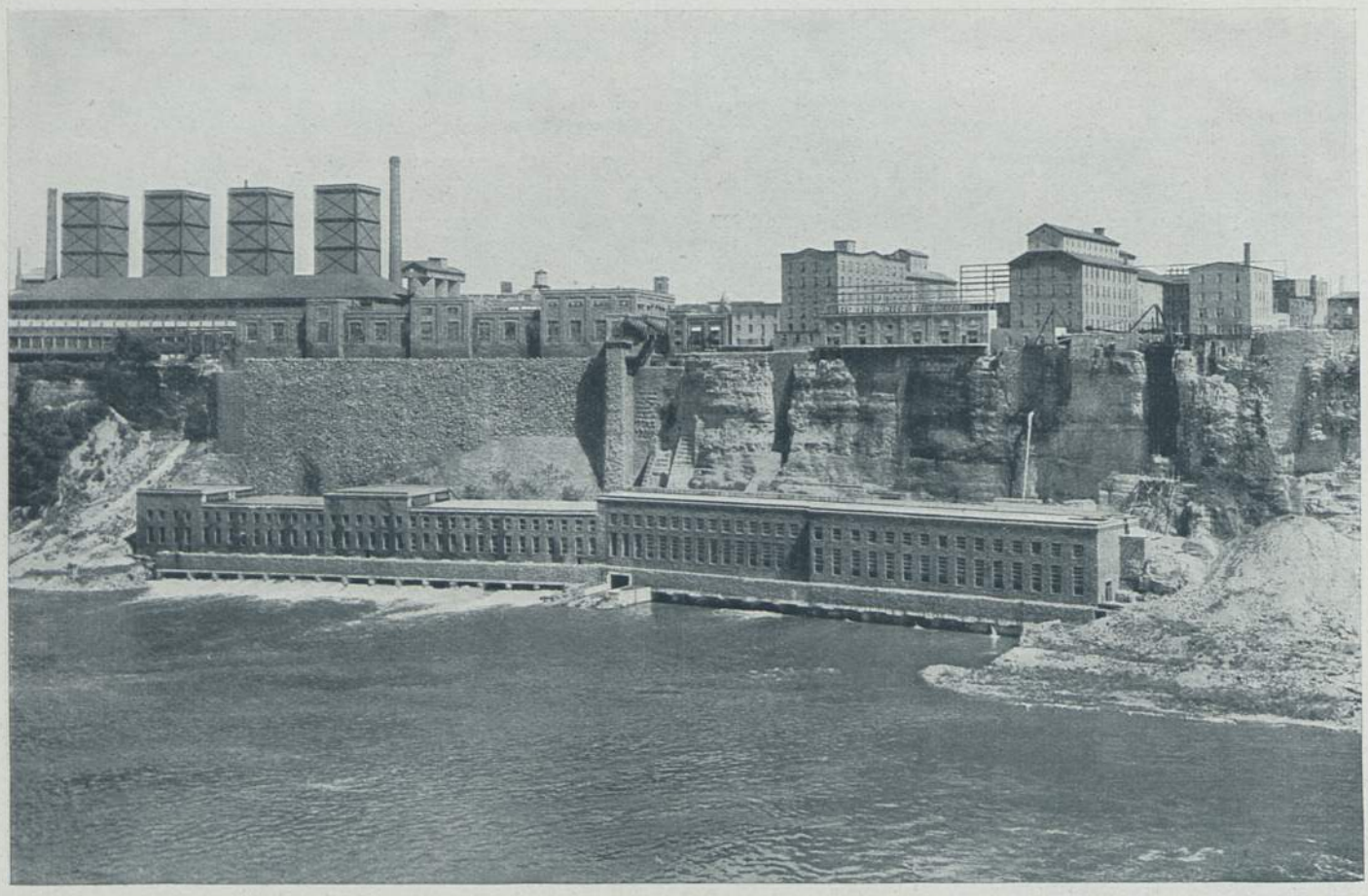



203. Ansicht der Niagarafälle mit den Kraftwerken auf kanadischer Seite aus der Vogelschau
1. Einlauf zum Kraftwerk der Ontario Power Company. 2. Kraftwerk der Canadian Niagara Company. 3. Kraftwerk der Electrical Development Company. 4. Kraftwerk der Ontario Power Company (Siehe Tafel XII)

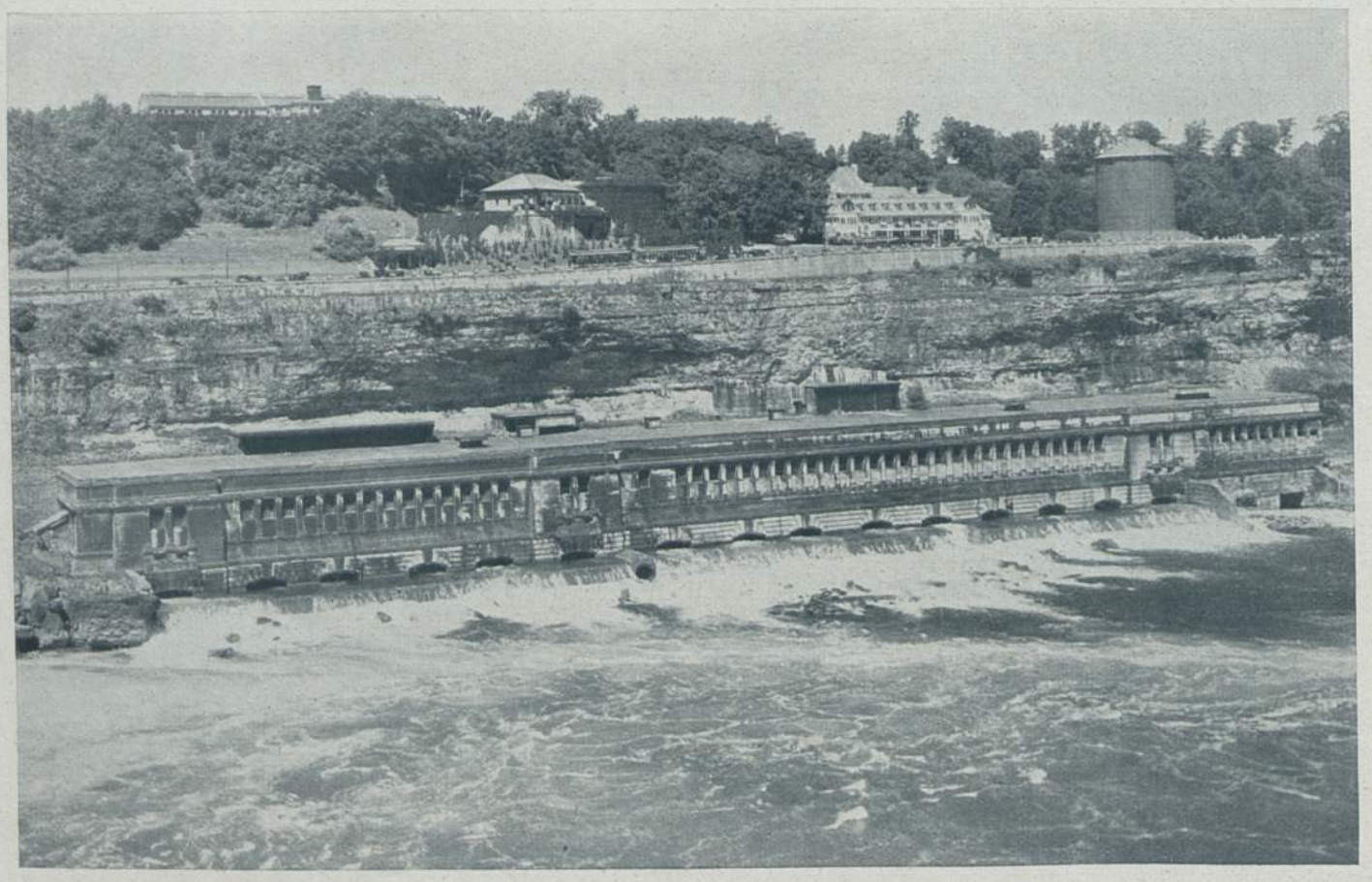


1. Blick auf die Niagarafälle: Links im Vordergrund der 300 Meter breite „Amerikanische Fall", im Hintergrund der 900 Meter breite kanadische „Hufeisenfall"

## Der Niagarafall und seine Kraftwerke



2. Verwaltungsgebäude und drei nebeneinanderliegende Kraftstationen der Niagara Falls Power Company. Sie liegen auf dem amerikanischen Ufer etwa 800 Meter unterhalb des „Amerikanischen Falls" und erzeugen rund 460 000 Pferdestärken. Phot. Galloway



3. Kraftwerk der Ontario Power Company. Diese Kraftstation liegt auf dem kanadischen Ufer unmittelbar neben dem „Hufeisenfall" (Siehe Bild 203) Phot. Galloway

weiter ein Kessel (Bild 193), der, wie bereits gesagt, als Wärmefalle ausgebildet ist, so daß die einmal in dieses System gelangende Sonnenenergie in keiner Weise mehr ausstrahlen kann, sondern ausnahmslos für die Dampferzeugung ausgenutzt wird.

Ein Apparat der hier dargestellten Anordnung mit einem Quadratmeter Linsenfläche gibt in den Tropen eine Dauerleistung von 1¾ Pferdestärken. Für größere Leistungen sind mehrere derartiger Elemente zusammenzusetzen.

Im Gegensatz zu den älteren Apparaten entwickelt der zuletzt besprochene einen mindestens dreimal, wahrscheinlich fünfmal so großen Wirkungsgrad und macht in sonnenstarken Ländern die Ausnutzung der Sonnenenergie überall dort wirtschaftlich möglich und vorteilhaft, wo die Tonne Kohle mehr als 16.— Goldmark kostet. Was das für die Zukunft bedeutet, dürfte aber aus der Tatsache erhellen, daß der Kohlenpreis in Ägypten und im Innern Süd-Afrikas rund 70.— Goldmark beträgt.

Sonnenwärme kann unter Benutzung von Thermo-Elementen auch unmittelbar in Elektrizität umgesetzt werden. Ein Thermo-Element ist einfach ein aus zwei verschiedenen leitenden Stoffen gebildeter Stromkreis, in welchem Strom fließt, sobald die Stoßstellen der beiden Metalle verschiedene Temperatur haben. Als die Thermo-Elektrizität entdeckt wurde, setzte man gewaltige Hoffnungen auf diese Form der Energiewandlung. Aber leider erwies sich der Wirkungsgrad aller Thermo-Elemente als so niedrig, daß diese Hoffnungen nur allzu schnell verflogen. Selbst wenn man sich auf den Standpunkt stellt, daß Sonnenwärme in jeder beliebigen Menge kostenfrei zur Verfügung steht, so würden doch die Kosten für die Herstellung einer Thermo-Batterie so groß werden, daß die Gewinnung der Elektrizität unmittelbar aus der Sonnenenergie wirtschaftlich vorläufig unmöglich erscheint.

*

Die Sonnenstrahlen fallen auf die verschiedenen Gegenden der Erde in verschiedenen Winkeln. Die Dicke des Luftmantels, den sie bis zur Ankunft auf der Erdoberfläche zu durchdringen haben, ist jedesmal eine andere, und die unteren Luftschichten, in denen wir leben, werden deshalb nicht gleichmäßig erwärmt. Es entstehen, wie vorhin bereits angedeutet und in dem Abschnitt „Das Flugzeug" (Band III, Seite 501) näher ausgeführt wurde, Druckunterschiede im Luftozean, da erwärmte Luftmassen dünner, also leichter sind als kältere. Die Störungen im Gleichgewicht werden durch Luftbewegungen ausgeglichen, und so entstehen die Winde.

Sie bieten eine Triebkraft dar, die ausgenutzt werden kann. Aber diese Energiequelle hat arge Launen; sie wechselt ihre Stärke fortwährend und versiegt oft genug völlig. Schillers Worten über den Sturmwind in seinem Gedicht „Der Graf von Habsburg": „Man weiß nicht, von wannen er kommt und

204. Der Rheinfall bei Schaffhausen
Aus Leo Galland, Die Wasserkräfte in der Natur. M. Krayn Verlag, Berlin

braust!", kann noch hinzugefügt werden: man weiß auch nicht, wann er kommt und braust.

Deshalb ist die Windkraft nur für Arbeiten verwendbar, bei denen auf gleichmäßige Wirkung verzichtet werden kann, oder für Vorrichtungen, die eine Speicherung der Energie für die toten Zeiten gestatten. Es gibt immerhin auch heute eine ganze Anzahl von Betrieben, bei denen das Begehren nach einem stets bereiten, immer gleichmäßig arbeitenden Motor von dem Vorteil übertönt wird, daß die Antriebkraft des Windes völlig umsonst zur Verfügung steht. Daher arbeiten in allen Ländern Windmotoren, die besonders in ihrer neuzeitlichen maschinentechnisch hochentwickelten Ausbildungsform auf beschränktem Gebiet viel Nützliches leisten.

205. Wirkungsbereich der am Viktoria-Fall des Sambesi geplanten Kraftwerke

Die älteste und einfachste Windkraftmaschine ist das Segelschiff. Es verwendet den Wind in seiner ursprünglichen Form, indem es sich von ihm geradlinig forttreiben läßt. Überall sonst aber will man durch die wehenden Luftmassen drehende Bewegung erzeugen, wozu bereits recht verwickelte Maschinen-Anlagen notwendig sind.

Auch die Mahlmühle ist uralt; sie stellt eine der am längsten von der Menschheit benutzten technischen Einrichtungen höherer Ordnung dar. Nachdem die Mahlgänge zuerst ausschließlich durch Menschen- oder Tierkraft angetrieben worden waren, wurde als Energiequelle hierfür das fallende Wasser herangezogen. Sehr viel später erst entstanden die Windmühlen, die den Griechen und Römern noch unbekannt waren. Es wird angenommen, daß diese Maschine in Deutschland erfunden worden ist. Bis zum heutigen Tag hat sich die Gattung der deutschen Windmühlen, auch Bockmühlen genannt, wahrscheinlich ohne grundsätzliche Abänderungen erhalten.

Kennzeichnend für die deutsche Windmühle ist, daß beim Hineindrehen der Flügel in die beste Lage zur Windrichtung das ganze Gebäude mitbewegt wird. Ein Untergestell aus schweren Balken, der Bock (Bild 197), trägt den senkrechten Hausbaum oder die Königswelle, um die herum das Mühlengebäude bewegt werden kann. Um die Drehung zu erleichtern, ist hinten ein Langbaum angebracht, der Sterz, an dessen Ende eine versetzbare, leicht im Boden zu verankernde Winde angreifen kann. Die Flügelwelle droben ist stets mit einer Neigung von 10 bis 15 Grad gegen die Wagerechte angebracht. Diese geneigte Stellung wird angeordnet, weil man aus Beobachtungen weiß, daß der Wind fast stets in einer Richtung weht, die einen kleinen Winkel zur Erdoberfläche bildet, und sein senkrechter Aufprall auf die Flügelebene die beste Kraftwirkung übt. Die schräge Lage der Welle hat weiter die Wirkung, daß die Flügel, wenn sie über den unteren Halbkreis gehen, in größerer Entfernung von der Vorderwand des Mühlenhauses bleiben. Die Übertragung der Wellenbewegung auf die senkrechte Achse des Mahlgangs geschieht durch Kegelräder.

Wenn der Müller mahlen will, stellt er die Mühle so, daß der Wind in der Richtung der Flügelwelle auftrifft. Damit aus der so gerichteten Windkraft ein Antrieb entsteht, der die Flügel dreht, müssen die Flügelflächen schräg gestellt sein. Lägen sie genau in der Ebene, die senkrecht zur Wellenachse steht, so würde der Wind nur das Bestreben haben, sie abzubrechen, aber keinen Schub nach der Seite ausüben. Daß aber die schräg angebrachten Flügel sich unter dem Druck des Windes drehen müssen, wird klar, wenn man die Kraft nach dem bekannten und in den vorhergehenden Abschnitten schon oftmals benutzten Parallelogramm der Kräfte zerlegt.

AB ist eine Windangriffslinie auf einem Flügel (Bild 195), die Linie CD (Bild 196) stellt die Windkraft in Richtung und Größe dar. Wir zerlegen diese Kraft in zwei Teilkräfte oder Komponenten, von denen DF in die Flügelebene fällt und unwirksam bleibt, DE senkrecht zur Flügelebene steht. Die Teilkraft ED spalten wir noch einmal, in dem zweiten Teilbild, in DH und DJ. Die erste dieser Komponenten wirkt in Richtung der Welle, kann also nur einen Druck auf deren Stirnlager ausüben, die Komponente DJ aber äußert ihre Kraft genau in Richtung der Drehebene für die Flügel. Sie stellt die Triebkraft dar, die, wie wir sehen, nur einen Teil der ursprünglichen Windkraft ausmacht; das übrige geht als unnützer Druck auf Flügel und Welle verloren.

Die Grundfeste jedes Flügels ist die Windrute, ein kräftiger 8 bis 10 Meter langer Balken, der in dem Kopf der Welle befestigt wird. In Abständen von etwa 50 Zentimetern sind die Windruten durchlocht und durch die Öffnungen Querarme, die Sprossen, gesteckt. Ihre Enden werden durch Sammellatten zusammengehalten. Zwischen diese sind noch mehrere Zwischenlatten gesetzt, so daß der ganze Flügel ein Sprossenwerk (Bild 195) mit viereckigen Öffnungen darstellt. Um den Wind aufzufangen, wird hierüber Segelleinen gebreitet.

Das Stillsetzen der Mühle erfolgt durch Anziehen eines Bremsbands, das sich um die Flügelwelle legt. Hierauf werden die Segel zusammengelegt, indem der Müller einen Flügel nach dem anderen senkrecht nach unten dreht und auf dem Sprossenwerk emporklimmt. Wenn der Wind während der Arbeitszeit so stark weht, daß die Mühle bei völlig ausgebreiteter Leinwand zu rasch gehen würde, so wird der Stoff nur zum Teil entfaltet.

In Holland, wo seit Jahrhunderten zahllose Mühlen sich drehen, weil dort fast ständig ein kräftiger Seewind über das ebene Land weht, ist eine andere Mühlengattung ausgebildet worden, welche man die holländische nennt. Hier wird das Mühlenhaus feststehend, oft aus Steinen aufgeführt, nur der Kopf oder die Haube mit der Hauptwelle und den Flügeln ist drehbar. Auf diese Art können sehr geräumige Mühlenhäuser mit schweren Maschinen eingerichtet werden. Während der einzelne Flügel der deutschen Windmühle meist eben ausgebildet ist, hat er an der holländischen Mühle stets eine gekrümmte Form. Der Neigungswinkel der Sprossen zur Drehebene nimmt hier von innen nach außen immer mehr ab, weil die Umdrehungsgeschwindigkeit ja mit dem Abstand von der Achse wächst. Der gewundene Holländer-Flügel (Bild 195) bewirkt eine gleichmäßige Verteilung der Antriebskraft über die ganze Flügelfläche.

Die Windmühle ist eine altertümliche Vorrichtung, die aus einer längst vergangenen Zeit des Maschinenbaus bis in unsere Tage hineinragt. Für den Bau des Triebwerks wird zum größten Teil noch jetzt Holz verwendet. Die Flügelwelle, aus einem Baumstamm zugehauen, läuft oft noch in Lagern aus Stein, die Zapfen werden geschmiert, indem mittels eines Bretts eine Speckschwarte dagegen gedrückt wird. Die Windmühlen fristen ihr Dasein noch immer, weil ihnen ja die Triebkraft umsonst zur Verfügung steht, und weil sie sozusagen Kleinhändler mit Energie sind, die auf dem Land gute Dienste leisten. Wenn jedes Dorf seine Windmühle hat, braucht der Bauer keine großen Wege zu machen, um seine paar Sack Getreide mahlen zu lassen. Es hat wenig zu bedeuten, wenn diese „Fabrik" öfter mehrere Tage lang stillstehen muß. Die Kunden, die alle Nachbarn sind, legen keinen entscheidenden Wert auf genaue Einhaltung der Lieferfrist.

Das Aufkommen der Dampfmühlen, die ständig schnurren und große Kornmassen in kurzer Zeit zu Mehl verwandeln, hat aber die Mühlenbauer aus ihrem hundertjährigen Schlaf aufgerüttelt. Neben den behäbigen Einrichtungen alter Art, die wohl lange ihre malerische Form bewahren werden, gibt es jetzt kleine hurtige Gesellen, die sich jenen gegenüber ausnehmen wie der Renner neben dem Ackerpferd.

Die Windräder oder Windturbinen passen durchaus in die Technik des zwanzigsten Jahrhunderts hinein. Sie haben nicht mehr das weitausgreifende schwerfällige hölzerne Flügelkreuz, sondern nutzen die Windkraft durch kleine eiserne Räder weit besser aus. Ihr Heimatland ist Amerika, wo zuerst auf der Weltausstellung zu Philadelphia im Jahre 1876 die neue Windmaschine den Europäern gezeigt wurde.

206. Der Viktoria-Fall des Sambesi im südöstlichen Afrika

Die Räder werden heute nicht allein zum Antrieb von Mahlgängen verwendet, sondern sehr häufig auch zum Pumpen von Frisch- und Abfallwasser herangezogen. Sämtliche Teile dieser Kraftmaschinen bestehen aus Eisen, sie sind nach den neusten Erfahrungen des Maschinenbaus ausgebildet und haben deshalb ein viel geringeres Gewicht für die geleistete Pferdestärke als die alten Mühlengetriebe. Deshalb können diese Windmotoren sich stets selbsttätig in die günstigste Lage zur Windrichtung einstellen. Sie bewahren auch eine gleichmäßige Umdrehungsgeschwindigkeit, da die Angriffsfläche für den Wind sich ja nach dessen Stärke von selbst entsprechend ändert.

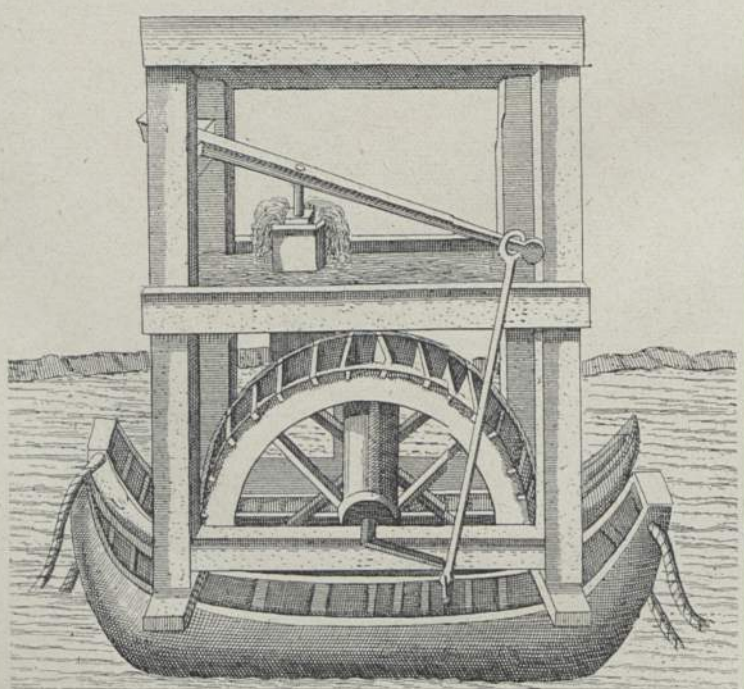
Manches Dorf und manche kleine Villenkolonie besitzen heute eine Wasserleitung, deren Pumpwerk durch ein Windrad angetrieben wird. Es ist nicht allzu kostspielig, einen Behälter zu erbauen, der eine für vier bis fünf Tage ausreichende Wassermenge aufzunehmen vermag, und dann werden die Unsicherheit und Unregelmäßigkeit der Energiezufuhr nicht mehr fühlbar. Für kleine Anlagen, die etwa nur zur Bewässerung eines Gartengrundstücks dienen, genügt das Aufstellen eines Blechgefäßes im Radgerüst (Bild 199) selbst. Auch die Wassertürme an Eisenbahn-Nebenlinien, über die nur kleine Lokomotiven fahren, werden öfters mittels Windmotoren (Bild 198) gespeist. Dient die angetriebene Pumpe dazu, Abfallwasser fortzuschaffen, solches z. B., das durch die Entwässerung eines Geländes anfällt, dann muß ein größeres Sammelbecken im Boden vorgesehen werden.

Immer häufiger erhält der Windmotor die Aufgabe, elektrischen Strom zu bereiten, sei es für ein Einzelhaus oder für eine Gruppe von Siedlungen. Die Möglichkeit, Elektrizität in Akkumulatoren zu speichern und aus diesen nach Bedarf zu entnehmen, läßt die toten Stunden oder Tage überwinden. Bei größeren Anlagen wird freilich immer eine Hilfsantriebmaschine für die Dynamo bereit gehalten werden müssen, wozu heute wohl stets die einfach zu bedienenden Gas- oder Ölmotoren benutzt werden. Ein solcher Helfer ist meist auch dann notwendig, wenn der Windmotor gebraucht wird, um in einem landwirtschaftlichen Betrieb Dreschmaschinen, Häckselmaschinen, Schrotmühlen, Rübenschneider und ähnliches anzutreiben. Ist dafür gesorgt, daß man bei lang andauernder Windstille nicht in Verlegenheit kommt, dann bringt die Windmaschine, die ohne Entlohnung arbeitet und nur in längeren Abständen einfache Wartungsmaßregeln erfordert, große Vorteile.

Auf den Bildern 198 und 199 ist die Form des bis vor kurzer Zeit allgemein verwendeten eisernen Windrads klar zu erkennen. Dicht an dicht sitzen die einzelnen, auch hier natürlich schräg gestellten Flügel daran. Die wagerechte Radwelle überträgt ihre Bewegung mittels Kegelräder auf die senkrechte Antriebswelle, und das Rad kann dieser gegenüber jede beliebige Stellung einnehmen. Die selbsttätige Drehung in den Wind erfolgt in einfachster Weise durch eine hinten angebrachte Fahne mit großer Fläche, die vom Wind genau so eingestellt wird wie eine Wetterfahne. Nur dann, wenn sie genau in der Windrichtung steht, sind die Drücke auf beide Seiten der Fahnenfläche gleich, und nur in diesem Fall kommt die Fahne zur Ruhe. Das Rad steht dann stets so, daß der Wind wie bei der Mühle in der Achsrichtung auftrifft.

Da die Windmotoren erhebliche Leistungen abgeben, bis zu 40 Pferdestärken und wohl auch darüber hinaus, so muß dafür gesorgt sein, daß sie bei sehr starkem Wind nicht durchgehen, d. h. die schweren und oft recht verwickelt gebauten Teile der angetriebenen Maschinen, z. B. die Anker von Dynamos, nicht überrasch zu drehen vermögen. Wechselnde Einstellung von Hand würde meist zu spät kommen und auch nicht mit genügender Genauigkeit ausführbar sein, da der Wind auf der Höhe des Gerüstes nicht selten eine andere Geschwindigkeit hat als dicht über dem Boden. Deshalb ist stets selbsttätige Regelung vorgesehen, die auf verschiedene Arten bewirkt werden kann. Es sind aber bei den älteren Radformen hauptsächlich die zwei im folgenden beschriebenen Methoden in Anwendung. Beide wirken so, daß mit stärker werdendem Wind ein immer geringerer Teil der Flügelflächen der Windrichtung zugekehrt ist.

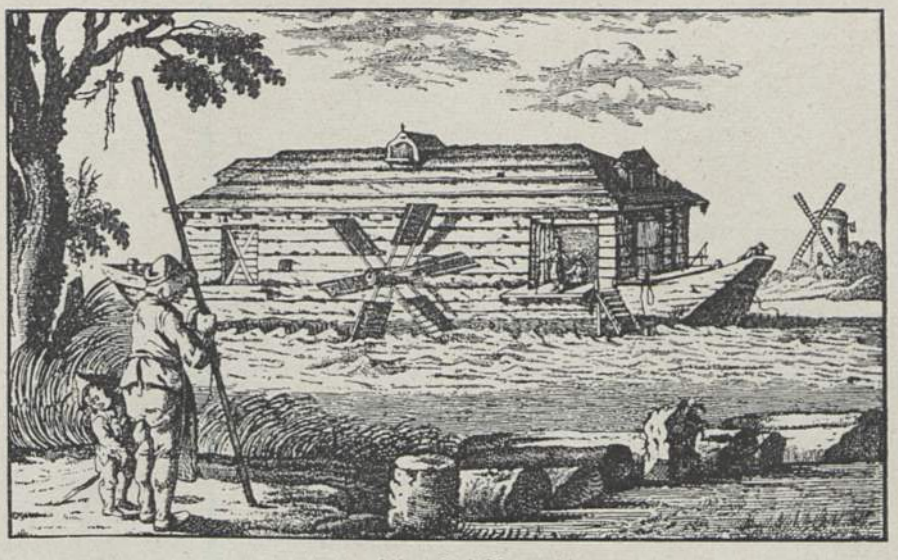
Beim Halladay-System besteht das Rad aus 6 bis 8 getrennten Flügelgruppen. Die einzelnen Flügel jeder Gruppe können gemeinsam um eine Achse kippen, die eine Seite eines Vielecks bildet, in dessen Diagonalen-Schnittpunkt die Radwelle liegt. Die Flügelfläche jedes Sektors, die außerhalb des Achsen-Vielecks liegt, ist größer als die Flügelfläche, die nach innen gerichtet ist. Hat der Wind eine gewisse Stärke erreicht, so bewirkt die außen angreifende Mehrkraft, daß die Flügel sich zurücklegen, so wie Bild 201 es zeigt. Sie haben hierbei den Widerstand von Gegengewichten zu überwinden, die an einem verschiebbaren, auf der Radwelle sitzenden Ring angreifen. Je weiter die Flügelgruppen sich nach rückwärts neigen, desto geringer wird die Angriffsfläche für den Wind.



207. Alte Schiffsmühle, die ein Pumpwerk antreibt
Aus Jacob Leupold, Theatrum machinarum hydraulicarum, Leipzig 1724

Das zweite System benutzt für die Regelung eine Zusatzfahne, wie Bild 198 sie zeigt. Sie steht gewöhnlich im rechten Winkel zu der Hauptfahne, welche die Einstellung in den Wind besorgt, und ragt mit ihrer Fläche über den Raddurchmesser hinaus. Eine kräftige Feder hält die Zusatzfahne in dieser Grundstellung. Starker Wind überwindet die Federspannung und drückt die Zusatzfahne näher an die Hauptfahne heran. Bei Sturm liegt sie in gleicher Richtung mit dieser. Der Radkörper macht diese Bewegung der Zusatzfahne mit, die Flügel werden also in immer ungünstigere

Stellung zum Wind gebracht, bis dieser auf die Flügelspitzen trifft und jetzt nur noch ganz geringe Wirkung zu üben vermag. Windmotoren mit dieser Regelung haben Orkane, durch welche Häuser beschädigt wurden, ohne Zerstörung eines ihrer Teile überdauert.



208. Alte Schiffsmühle
Aus „Schauplatz der Natur und Künste", Wien 1775

Neuerdings ist man bestrebt, die Windräder so zu bauen, daß die in der bewegten Luft enthaltene Energie von ihnen gründlicher ausgenutzt wird als bisher. Während die Enden der Flügel an den Rädern älterer Bauart nur etwa die doppelte Geschwindigkeit annehmen konnten, wie der treibende Wind sie hatte, gelingt es jetzt, sie auf das Dreifache der Windgeschwindigkeit zu bringen. Die Leistung wird dadurch vergrößert, und man kann eine einfachere Übersetzung zwischen die Radachse und die Welle der Dynamo schalten, die ja stets eine hohe Umdrehungszahl haben muß. Die Radfläche ist nun nicht mehr mit dicht an dicht stehenden Flügeln besetzt, sondern man begnügt sich oft mit einem Antriebkreuz (Bild 200). Jeder der vier Flügel ist aber auf das sorgsamste nach aerodynamischen Grundsätzen ausgebildet, die man von den Flugzeugbauern gelernt hat. Der Windradflügel wird jetzt häufig ähnlich gestaltet wie eine Luftschraube, deren Form ja für den stetigen, besonders heftigen Kampf mit der Luft herausgebildet worden ist.

Die modernen Radflügel sind sehr kräftig ausgeführt und völlig starr. Sie werden nicht mehr umlegbar gemacht und auch nicht aus dem Wind gedreht, da sie selbst dem Anprall des stärksten Orkans zu widerstehen vermögen. Nur die Umlaufgeschwindigkeit muß bei Sturm hinabgesetzt werden, damit die Zahnräder und andere Übertragungsglieder nicht übermäßige Beanspruchung erfahren. Das geschieht, während die Flügel selbst ihre normale Stellung beibehalten, durch die selbsttätige Wirkung einer einfachen, aber sehr gründlich arbeitenden Zusatzeinrichtung.

Wie Bild 200 zeigt, ist in der Nähe jeder Flügelspitze eine Klappe angebracht, eine Fahne, die auf beiden Seiten jedes Flügels für gewöhnlich so steht, daß ihre Erstreckung einen rechten Winkel zur Längslinie des Flügels bildet. Bei allen Drehgeschwindigkeiten, die das beabsichtigte Höchstmaß nicht überschreiten, stoßen daher nur die schmalen Stirnflächen der Fahnen gegen die Luft, wodurch keine hemmende Wirkung entsteht. Sobald das Rad aber sich übermäßig geschwind zu drehen beginnt, werden die Klappen, die nicht in der Mitte, sondern einseitig auf Drehzapfen gelagert sind, ausgeschleudert, die längeren schweren Enden entfernen sich infolge der Fliehkraft soweit wie möglich vom Drehungsmittelpunkt. Nun prallen die Breitseiten der Klappen gegen die Luft und wirken als kräftige Bremsen. Es ist erstaunlich, wie fein und wie gründlich die konstruktiv so bescheidenen Vorrichtungen, die noch dazu keiner Abnutzung unterworfen sind, den Lauf des Rads einregeln, es an jeder allzu leidenschaftlichen Betätigung hindern.

Die Gerüste oder Türme, welche die Räder tragen und meist aus Eisen aufgeführt werden, müssen so hoch sein, daß der Wind die Flügel ungehindert treffen und nach der anderen Seite hin frei abstreichen kann. Der niedrigste Punkt jedes Rads muß über allen Windhindernissen liegen, wie Bäume oder Häuser es sind, die sich in einem Abstand bis zu 400 Metern befinden. In bergigen Gegenden sind breite Täler für gewöhnlich gute Aufstellungsorte für Windmotoren; sanft ansteigende Erhebungen wirken meist nicht abschirmend. Die vorzüglichsten Arbeitsstellen für die Windmaschinen sind Küstengegenden und Bergkuppen.

Zur Messung der Windgeschwindigkeiten bedient man sich willkürlich aufgestellter Stufenleitern. Die älteste ist die Beaufort-Skala, benannt nach dem Kommandanten des englischen Kriegsschiffs „Woolwich", der sehr gründliche Beobachtungen der Winde gemacht hat, um Regeln für die wechselnde Einstellung der Schiffsbesegelung zu gewinnen. Die folgende Liste gibt die zwölfteilige Beaufort-Skala wieder:

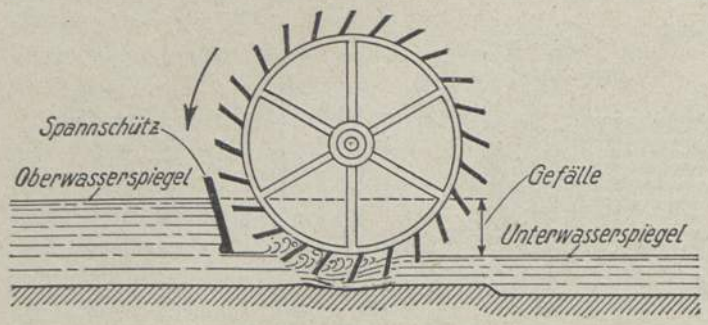
| Windgeschwindigkeit in Sekundenmetern | Stufen | Winddruck auf das Quadratmeter | Bezeichnung | Wirkung |
|---|---|---|---|---|
| 4—5 | 1 | 2,7 kg | leicht | Zweige bewegen sich |
| 6—7 | 2 | 5 „ | mäßig | Äste biegen sich |
| 8—9 | 3 | 8 „ | frisch | Baumkronen rauschen |
| 10—11 | 4 | 13 „ | sehr frisch | Pappeln biegen sich |
| 12—14 | 5 | 19 „ | stark | Zweige und Laub reißen ab |
| 15—16 | 6 | 27 „ | stürmisch | dünne Äste brechen |
| 17—19 | 7 | 40 „ | Sturm | starke Äste brechen |
| 20—23 | 8 | 56 „ | starker Sturm | Kiefern werden entwurzelt |
| 24—28 | 9 | 76 „ | schwerer Sturm | |
| 29—33 | 10 | 103 „ | Orkan | verheerend |
| 34—39 | 11 | 137 „ | | |
| 40 | 12 | 195 „ | | |

Den Bezeichnungen der Windstärken in den deutschen Wetterkarten liegt eine zehnteilige Skala mit folgenden Stufen zugrunde:

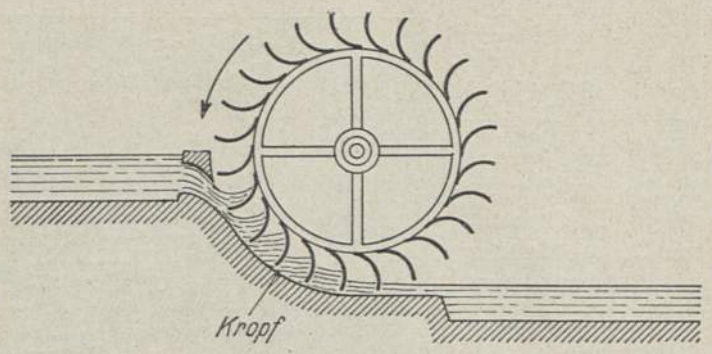
1. Sehr still
2. Still
3. Leicht
4. Schwach
5. Mäßig
6. Frisch
7. Stark
8. Steif
9. Stürmisch
10. Voller Sturm

*

Als die ersten Windmühlen ihre Flügel zu drehen begannen, waren die Wassermühlen bereits ein hochbetagtes Geschlecht. Die von der Strömung eines Bachs oder eines Flusses




209. Unterschlächtiges Wasserrad




210. Mittelschlächtiges Wasserrad

getriebenen Kraftmaschinen sind die ältesten Einrichtungen der ganzen Gattung. Schon Jahrhunderte vor dem Beginn unserer Zeitrechnung zerrieb man mit ihrer Hilfe das Getreide. Antipater, der von 106 bis 43 vor Christo lebte, ist wahrscheinlich der Verfasser eines Dichtwerks, in dem sich die folgenden Zeilen finden; sie sind hier in Herders Übersetzung wiedergegeben:

Laßt die Hände nun ruh'n, ihr mahlenden Mädchen, und schlafet
Lang; der Morgenhahn störe den Schlummer euch nicht.
Ceres hat eure Mühe den Nymphen künftig empfohlen,
Hüpfend stürzen sie sich über das rollende Rad,
Das mit vielen Speichen um seine Achse sich wälzend
Mahlender Steine vier, schwere zermalmende, treibt.
Jetzt genießen wir wieder der alten goldenen Zeiten,
Essen der Göttin Frucht ohne belastende Müh'!

Aus diesen Strophen spricht die Freude darüber, daß wenigstens ein Teil der Sklavenarbeit von einer Naturkraft, nämlich dem fallenden Wasser, abgelöst ist. Durch Vitruv wissen wir, daß zur Zeit des Kaisers Augustus Wasserkraftanlagen häufig benutzt wurden. „Die Räder leisten", so schreibt er in seinem Buch „De Architectura", „ohne die Arbeit des Tretens, umgewälzt durch die Strömung des Flusses, die nötigen Dienste." In Nordeuropa sind Anlagen solcher Art wahrscheinlich erst sehr viel später bekannt geworden.

Doch bis zum Ende des vorigen Jahrhunderts haben alle Einrichtungen zur Gewinnung von Kraft aus dem Wasser überall ein recht beschauliches, zurückgezogenes Dasein geführt. Es gab nur vereinzelte Anlagen, die alle zusammen im Kreis der technischen Kraftlieferer eine recht bescheidene Rolle spielten. Der Siegeszug der Energie-Erzeugung aus dem fallenden Wasser begann erst, als es der Menschheit gelungen war, eine Strömung anderer Art in besonderer Weise zu meistern.

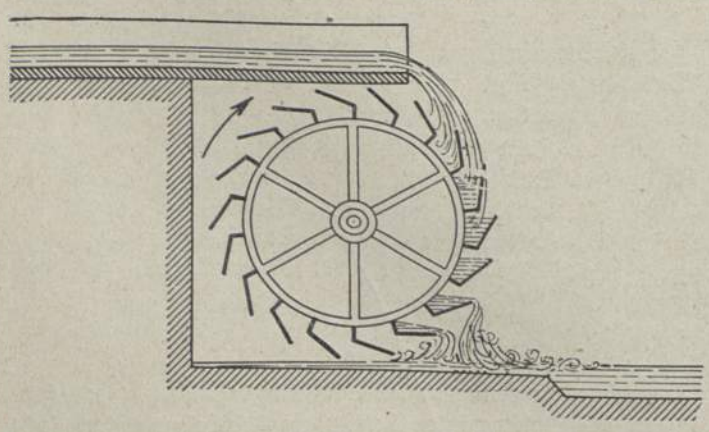
Das Jahr 1891 sah die erste Fernübertragung elektrischer Energie, und jetzt erst wurde es möglich, Wasserkräfte ganz allgemein auszubeuten. Ungefähr um dieselbe Zeit erhielt der alte Gedanke der künstlichen Wasserstauung neues Leben. Überall wurden großartige Bauten zur Veredelung der Wasserkräfte unternommen, und man getraute sich mit immer kühnerer Hand, diese Naturkraft selbst dort in Fesseln zu schlagen, wo sie in erhabenster Wildheit auftrat.

Durch Maßnahmen solcher Art wurden zwei Grundfehler, die der Energie-Erzeugung aus Wasser anhaften, beseitigt oder doch zur Unmerkbarkeit abgeschwächt.

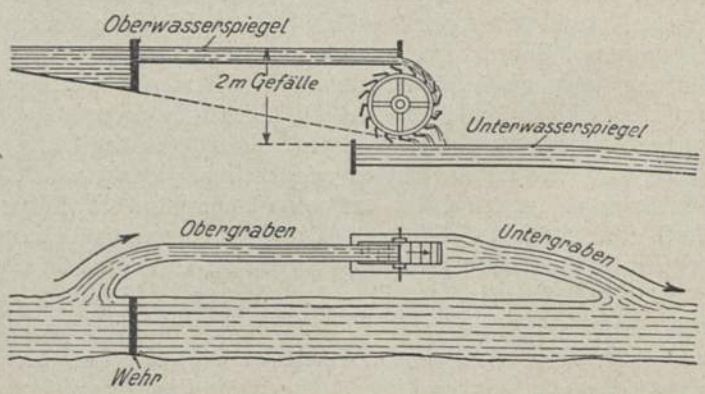
Während eine Dampf- oder Gasmaschine überall aufgestellt werden kann, ist die Wasserkraftmaschine an die Stelle gebunden, wo die Natur fallendes Wasser zur Verfügung stellt. Meist befinden sich ausnutzbare Strömungen oder Fälle in abgelegenen Gegenden, weit entfernt von größeren Menschensiedlungen, so daß Fabriken, die unmittelbar an der Kraftquelle erbaut werden, wegen der hohen Kosten der Zu- und Abfuhr und der Notwendigkeit, die Arbeiter neu anzusiedeln, meist nicht wirtschaftlich arbeiten können. Seit es aber möglich ward, die Wasserkraft in elektrische Kraft zu verwandeln und diese in Form hochgespannter Ströme ohne erhebliche Verluste über weite Strecken fortzuleiten, ist die Wasserkraft freizügig geworden. Losgelöst vom Heimatort kann man sie nun in weitem Umkreis nutzen, ohne für die Fernübertragung allzu große Opfer bringen zu müssen.

Hierdurch erst ist die Wasserkraftmaschine zum Wettbewerber der Dampf- und Gasmaschine geworden. Sie rückt immer mehr in gleiche Reihe mit diesen Energieerzeugern, die sie durch viele hervorragende Eigenschaften sogar übertrifft. Die Zahl der Lampen und Elektromotoren, gespeist aus Netzen, deren stromgebende Maschinen durch Wasserkraft angetrieben werden, wächst in unseren Tagen immer mehr und immer rascher an.

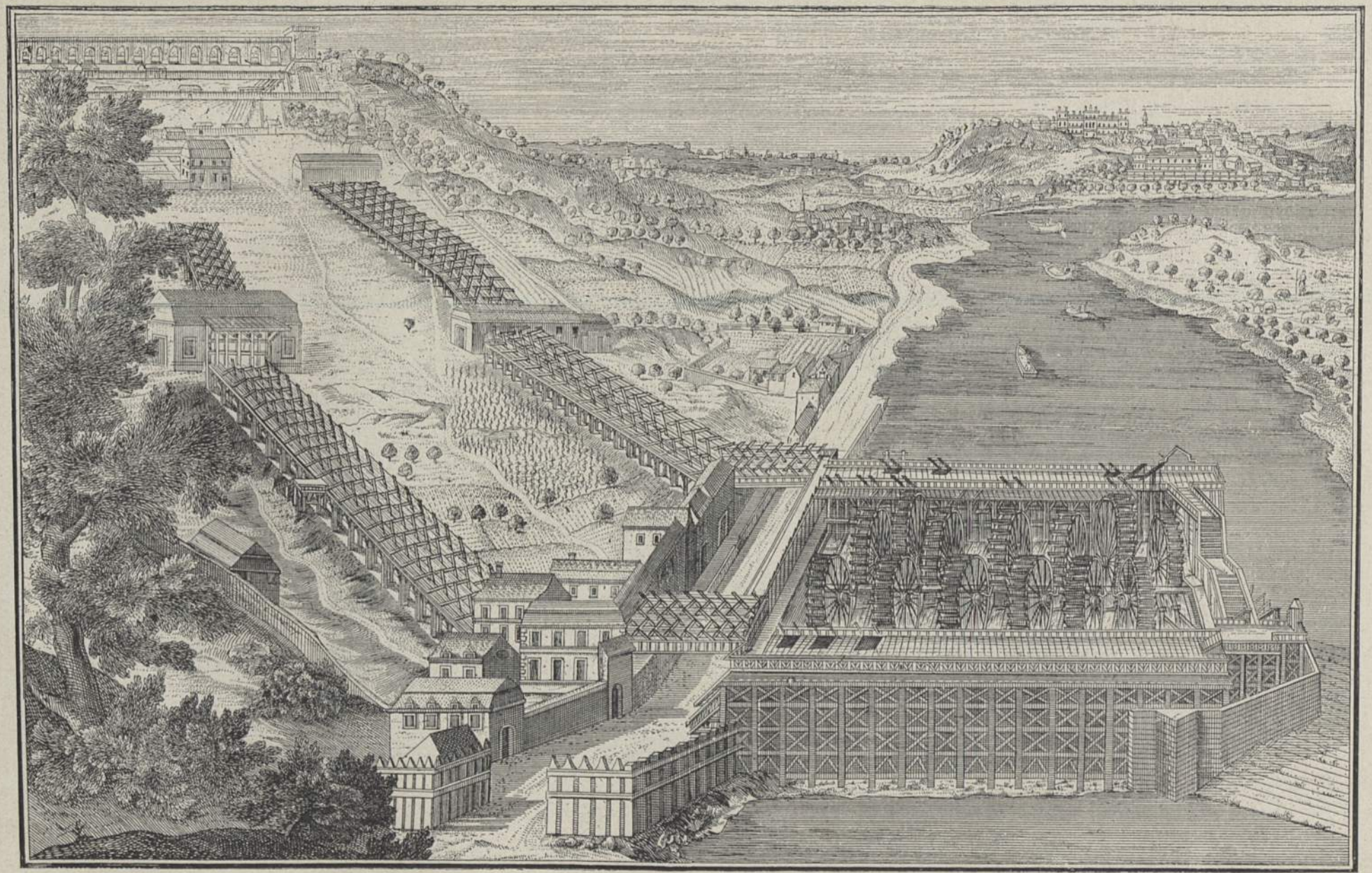
Während die Kohle und das Öl, die zur Erzeugung von Maschinenkraft dienen, mühsam aus dem Bauch der Erde herausgeholt und in breiten Arbeitsgängen aufbereitet



211. Oberschlächtiges Wasserrad




212. Künstliches Gerinne für ein oberschlächtiges Wasserrad



213. Die Wasserwerke von Marly

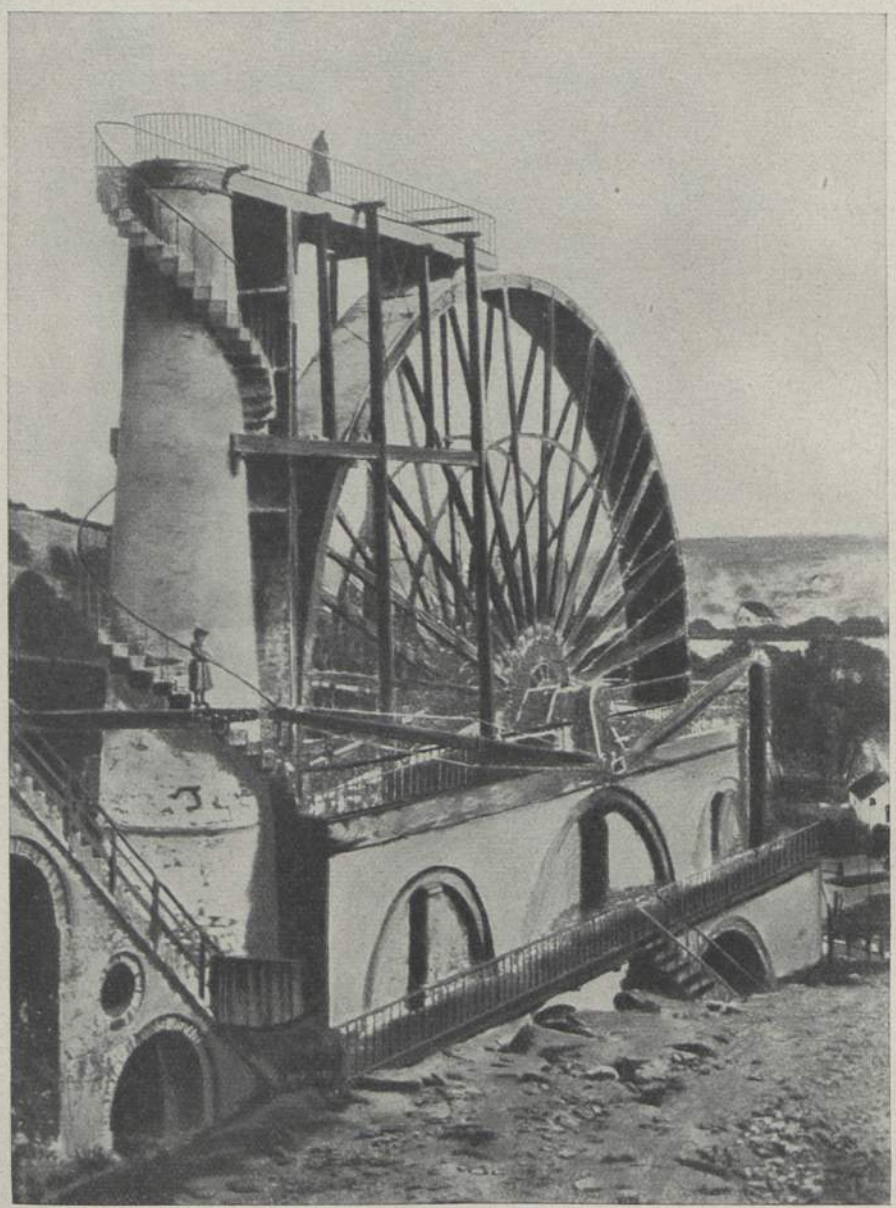
Erbaut 1682. 13 Wasserräder betrieben 235 Saug- und Druckpumpen, die das für die Gärten zu Versailles, Marly und Trianon benötigte Wasser aus der Seine in zwei Absätzen auf 160 Meter Höhe pumpten

werden müssen, scheint das Triebwasser an vielen Stellen sogleich in der geeigneten Form zur Verfügung zu stehen. Es sieht daher auf den ersten Blick so aus, als ob die aus Wasserkraft erzeugten Energiemengen unbedingt billiger sein müßten als dasselbe Arbeitsquantum, das von einer Wärmekraftmaschine bereitet wird.

Aber hier trügt der Schein gar sehr. Oft zeigt die Rechnung, daß es selbst in unmittelbarer Nähe fallenden Wassers vorteilhafter ist, Kohle in Kesseln, Gas oder Öl in Zylindern zu verbrennen, um die begehrten Pferdestärken zu gewinnen. Denn das Kraftwasser ist ein Edelstein, der gefaßt werden muß, und die Fassung wird — dies ist der zweite Grundfehler — oft so teuer, daß man darauf verzichtet, das von der Natur geschenkte Kleinod anzunehmen.

Die Technik kann für Großanlagen nur Energiequellen verwenden, die in jedem Augenblick bereit sind und immer die gleiche Arbeitsleistung zur Verfügung stellen. Gerade aber in dieser Beziehung versagt das Kraftwasser in seiner natürlichen Form sehr oft. Die Menge des Wassers, dessen Strömung ausgenutzt wird, ändert sich meist mit den Jahreszeiten. Bäche und Flüsse, die im Frühling hochgehen, sind im Sommer nicht selten gänzlich versiegt. Die Winterkälte schlägt flache Gerinne so stark in ihren Bann, daß sie bis auf den Grund zufrieren. Diese bösen Schwankungen sind Ursache, daß die Wasserkraft vielerorts nur dann verwertbar ist, wenn eine Dampf- oder Gasmaschine zur Aushilfe bereit gehalten wird. Eine solche Doppelanlage jedoch ist sehr teuer und unbequem. Glücklicherweise aber wird es oft möglich, statt dieses Nebenpfads einen geradeaus gerichteten Hilfsweg einzuschlagen, indem man den Überfluß der wasserreichen Zeiten speichert, um ihn in den mageren Monaten zu verwenden.

Das Werkzeug zur Ausführung dieser technisch weit besseren Ausgleichmaßregel ist die Sperrmauer, die von Menschenhand quer über das Gerinne gestellte Abschlußwand. Hinter dieser sammelt sich das Wasser oft in ungeheuren Mengen an, die jederzeit abgezapft werden können. Wenn ringsum alle Bach- und Flußbetten ausgetrocknet sind, ist der Stausee immer noch hoch angefüllt. Im Winter überzieht er sich wohl mit einer Eisdecke, ihre Stärke bleibt aber stets nur ein ganz geringer Teil der Wassertiefe. Nun hat der Besitzer der Kraftanlage immer „Wasser auf seiner Mühle".

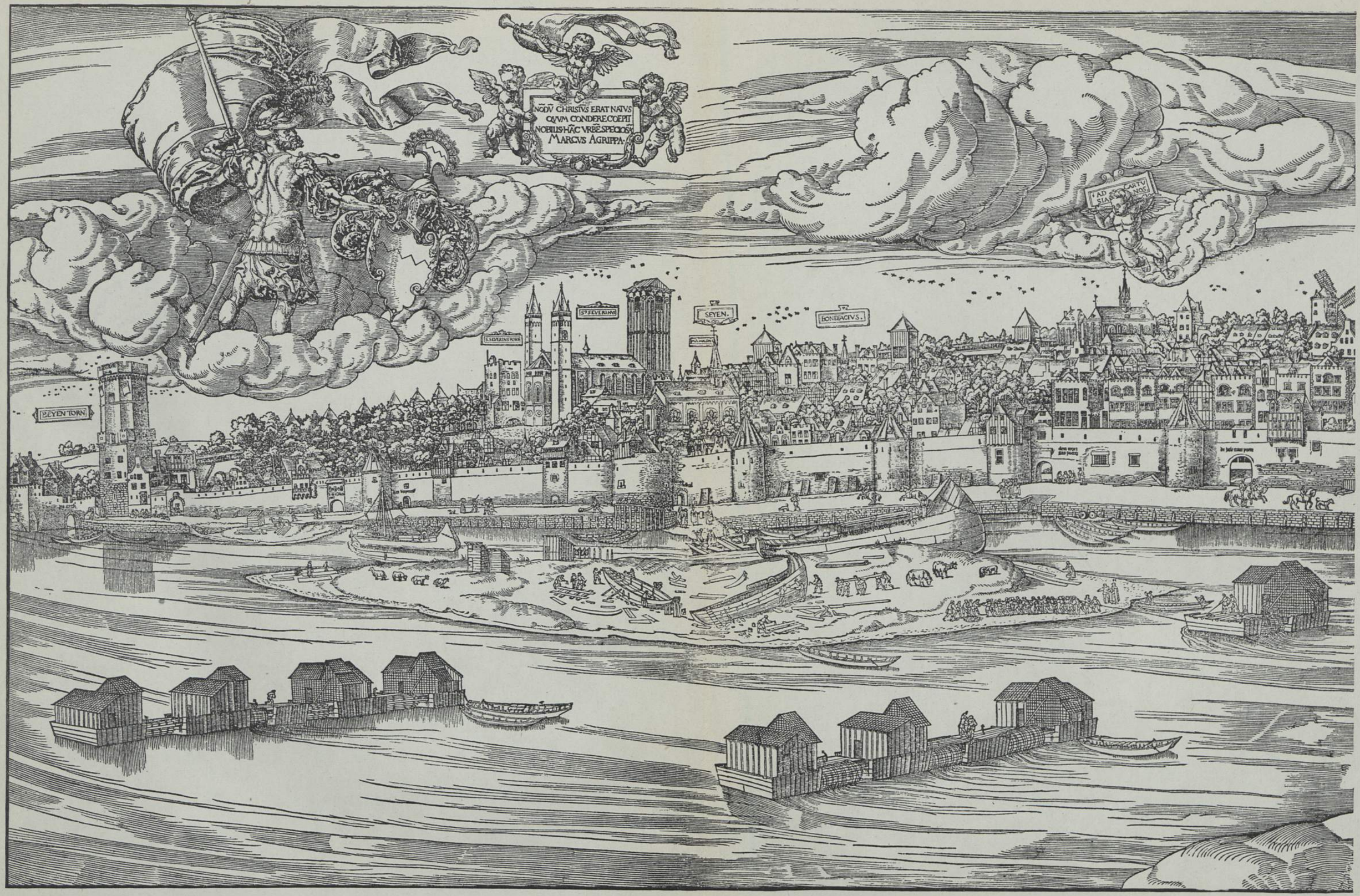


214. Das größte Wasserrad der Welt
Es treibt heute noch Pumpen in den Laxey-Glen-Gruben auf der Insel Man
Deutsches Museum, München

Die Staueinrichtungen veredeln nicht nur Wasserkräfte, die ohnedies, wenn auch nicht in ausreichendem Gleichmaß, nutzbar wären, sie schaffen oft erst Energiequellen in Wasserläufen, die ohne Stauung gar nicht verwertet werden könnten. Sperrmauer und Hochspannungsleitung sind die Bundesgenossen der Wasserkraft, die ihr die Eroberung des gebührenden Platzes an der technischen Sonne ermöglicht haben.

Nur durch sorgfältige wirtschaftliche Berechnungen kann festgestellt werden, ob es unter gegebenen Umständen günstiger ist, Wasser- oder Wärmekraftmaschinen anzuwenden. Hierbei darf aber niemals übersehen werden, daß ein Wasserkraftwerk, wenn auch seine Errichtung bedeutend mehr kostet als die Schaffung eines Wärmekraftwerks, doch im Betrieb sehr viel billiger arbeitet als dieses. Denn nach Beendigung des Baus strömt das Kraftmittel ja umsonst zu.

In ewigem Kreislauf — denn die Dauerzeit der Erde erscheint uns kurzlebigen Menschlein unendlich — rinnt das von der Sonne aus dem Meer gehobene Wasser wieder ins Meer zurück, um von neuem aufzusteigen und als Tau, Reif, Nebel, Schnee, Regen oder Hagel abermals niederzufallen. Sein Arbeitsvermögen, das wir auf dem über den Erdboden führenden Teil seines Wegs ausnutzen, entsteht aus der Masse des Wassers und seiner Fallhöhe. Es ist ein glücklicher Zufall, daß die Flüssigkeit ein hohes




Alte Schiffsmühlen im Rhein

Ausschnitt aus der Kölner Stadtansicht des Anton Woensam von Worms. Holzschnitt aus dem Jahre 1531

spezifisches Gewicht besitzt. Deshalb können wir weit größere Energiemengen daraus gewinnen als aus der sehr viel leichteren bewegten Luft. Strömendes Wasser ist auch weit bequemer einzufangen und nach unseren Wünschen zu lenken als die wehenden Luftmassen.

Wenn wir auch Ursache haben, der Natur zu grollen, daß sie sehr viel Wasser derart zu Tal gehen läßt, daß wir seine Arbeitsfähigkeit nicht nutzen können, so haben wir doch auch häufig Anlaß, ihre göttliche Freigebigkeit dankbar zu bewundern. Denn an manchen Stellen bietet sie ganz ungeheure Energiemengen in einer solchen Form dar, daß wir sie ohne allzu große Schwierigkeiten zu Sklavendiensten heranziehen können. Und derartige Kraftquellen bewahren stets ihre ursprüngliche Stärke. Während Kohle- und Ollager durch den Abbau verringert und schließlich erschöpft werden, verjüngt sich das Kraftwasser stets von selbst. Doch wegen der Kostspieligkeit der Ausbauten sind die Großquellen für Wasserkraft heute längst noch nicht voll ausgenutzt. Davon einige Beispiele.

Aus dem Bodensee fließen in der Hochwasserzeit in jeder Sekunde 1100 Kubikmeter Wasser in das Rheinbett. An diesem Strom befinden sich bereits zahlreiche große Kraftwerke, so bei Neuhausen, Rheinfelden, Eglisau, Laufenburg und Augst-Whylen, die ungefähr 100 000 Pferdestärken liefern. Es wäre aber möglich, allein aus dem Gefälle zwischen Basel und Straßburg 600 000 Pferdestärken zu gewinnen. Der Rheinfall (Bild 204), eine Naturschönheit seltenster Art in Mitteleuropa, könnte hierbei unberührt bleiben.

Die Technik brauchte nicht den Eindruck der hier niedergehenden Wassermassen zu zerstören, den Mörike, mit vielleicht allzu stürmischer Dichterphantasie, also beschreibt:

Halte dein Herz, o Wanderer, fest in gewaltigen Händen!
Mir entstürzte vor Lust zitternd das meinige fast.
Rastlos donnernde Massen auf donnernde Massen geworfen,
Ohr und Auge, wohin retten sie sich im Tumult?
Wahrlich, den eigenen Wutschrei hörete nicht der Gigant hier,
Läg' er, vom Himmel gestürzt, unten am Felsen gekrümmt.
Rosse der Götter, im Schwung, eins über dem Rücken des andern,
Stürmen herunter und streun silberne Mähnen umher;
Herrliche Leiber, unzählbare, folgen sich, nimmer dieselben,
Ewig dieselben — wer wartet das Ende wohl aus?

Es gibt gewaltigere Wasserfälle. Der große Ontario-See an der Grenze der Vereinigten Staaten von Nordamerika und Kanada liegt 100 Meter höher als das benachbarte Becken des Erie-Sees. Nachdem das Wasser in Stromschnellen über viele kleine Stufen um 50 Meter niedergegangen ist, überwindet es das Restgefälle in einem einzigen jähen Sprung. Schon aus sehr weiter Ferne hört man das Tosen des Niagara-Falls, der bei den Indianern das „Donnerwasser" hieß. Die Hauptgefällstufe besteht aus dem 300 Meter breiten „Amerikanischen Fall" und dem 900 Meter breiten, zu Kanada gehörigen „Hufeisen-Fall". Sie werden durch die bewaldete Ziegeninsel getrennt (Tafel VII, 1).

Die Elektrizitäts-Industrie wurde frühzeitig auf dieses gewaltige Energiebecken aufmerksam. Nach dem Abschluß eines Vertrags zwischen den Vereinigten Staaten und Kanada begannen 1891 die ersten Ingenieurarbeiten an den Fällen. 1905 waren drei große Kraftwerke auf der kanadischen Seite im Betrieb und auf dem Boden der „Staaten" die riesigen Anlagen der Niagara Falls Power Co. fertiggestellt. Ein Teil der in majestätischer Freiheit niederströmenden Wasser wurde schon damals in Fesseln geschlagen, durch Staudämme und Leitwerk gezähmt und durch offene Gerinne oder felsdurchbrechende Tunnel zu den Turbinen geleitet. Seitdem haben sich Fabriken jeder Art bei den Fällen angesiedelt, die alle den verhältnismäßig billig erzeugten Strom nutzen. Der Krieg insbesondere hat den Industriebezirk mächtig heranwachsen lassen. Während aber aus dem Sturz dauernd 7 Millionen Pferdestärken gewonnen werden könnten, sind bis heute kaum der vierte Teil in Kraftwerken (Bild 202, 203 und Tafel VII) ausgenutzt. Trotz mancher harten Angriffe gegen ihre Schönheit sind die Fälle daher immer noch das geblieben, was sie von jeher waren: eines der größten Naturwunder.

Inmitten der Vereinigten Staaten, in dem Gebiet von Idaho, liegt der Shoshone-Fall, den der Snake-Fluß bildet. Dieser Wassersturz ist noch gewaltiger als der Niagara, denn die Gefällstufe beträgt hier 63 Meter. Sehr wenige nur kennen den herrlichen Shoshone-Fall, weil er abseits liegt, und nur ein äußerst geringer Bruchteil der gischtenden Wassermassen wird vorläufig verwertet.

Der berühmte Afrikareisende Livingstone entdeckte im Jahre 1855 im Lauf des Sambesi, des größten Flusses im südöstlichen Afrika, einen Sturz, dem er den Namen Victoriafall (Bild 206) gab. Hier schießt das Wasser aus einem Bett von 1800 Metern Breite nicht weniger als 120 Meter tief hinab in eine Schlucht, die nur 100 Meter breit ist. Dieser gewaltigste Wasserfall auf der Erde birgt eine Leistungsfähigkeit von so vielen Millionen Pferdestärken, daß es noch nicht lohnend erschienen ist, ihre Anzahl durch Messungen festzustellen. Denn der umfassendste Plan, diese Kraftquelle zu nutzen, will vorläufig nur 250 000 Pferdestärken daraus ziehen und diese in einem Umkreis mit einem Halbmesser von 1100 Kilometern durch elektrische Hochspannungsleitungen verbreiten. Bild 205 zeigt, daß der so entstehende Wirkungsbezirk rund das halbe Europa umfassen würde. Tatsächlich bestehen vorläufig nur schwache Anfänge einer Nutzung des Falls in so großartiger Form, die aber selbst bei ihrer völligen Durchführung doch immer nur einen ganz geringen Teil der wirklich zur Verfügung stehenden Energie verwerten würde.

Im Gegensatz zu diesen Glanzleistungen der Natur stehen die kleinen Flüßchen, die im Hügelland über ein ganz geringes Gefälle zu Tal rinnen. Aber auch sie können zum Betrieb von Wasserkraftmaschinen herangezogen werden. Auch im Flachland gibt es Wasserkraftanlagen, die freilich nur durch künstliche Stauung des Wassers betrieben werden können. So arbeitet an der Schwentine bei Kiel ein Elektrizitätswerk mit einer Leistung von 660 Pferdestärken. Die Radaune, ein bescheidenes Nebenflüßchen der Mottlau, die bei Danzig in die Weichsel geht, speist das Oberland-Kraftwerk in Straschin-Prangschin, das mit einer Leistung von 1400 Pferdestärken den Kreis Danziger Höhe mit elektrischem Strom versorgt. An der Stolpe sind die Wasserkraftwerke Krien mit 1200 und Klaushof mit 3300 Pferdestärken errichtet. Selbst in Ostpreußen, das doch meist flach wie ein Teller ist, können etwa 40 000 Pferdestärken aus fallendem Wasser gewonnen werden (Friedland und Großwohnsdorf).

Die Wasserkraftmaschinen besitzen eben eine Schmiegsamkeit, die unvergleichlich ist. Sie arbeiten in ihrer vortrefflichen neuzeitlichen Form bereits bei einem Gefälle von $1\frac{1}{2}$ Meter und lassen sich ebenso mit einem Wassersturz von 1000 Meter Höhe betreiben. Durch Einfachheit des Baus und hohen Nutzeffekt zeichnen sie sich vor allen anderen ihrer Genossen aus. Dazu kommt, daß die Kraftwerke dieser Art keinen Rauch und keinen Ruß ausstoßen und nicht durch hohe Schornsteinbauten die Gegend verunzieren. Wenn die Menschen es dereinst nicht mehr nötig haben werden, die schwarze Kohle in mühevoller und gefährlicher Arbeit aus dem

Bauch der Erde zu reißen, werden sie sich immer noch der „weißen Kohle" bedienen, die so bequem erreichbar die Furchen im Antlitz der Erde füllt.

Es wird angenommen, daß ständig 200 Millionen Pferdestärken hervorgebracht werden müssen, um den augenblicklichen Gesamt-Energiebedarf auf der Erde zu decken. Alle ausnutzungsfähigen Wasserkräfte vermögen nach annähernder Schätzung 745 Millionen Pferdestärken zu leisten, so daß sie also den gesamten Kraftbedarf mehrfach zu decken vermöchten. Mehr als 22 Millionen Pferdestärken werden aber heute noch nicht der nutzreichen Verwendung zugeführt.

Unter allen Ländern besitzen den größten Reichtum an Wasserkräften die Vereinigten Staaten von Nordamerika. In Europa sind besonders Norwegen, Schweden, Spanien und die Schweiz von der Natur mit solchem kostbaren Eigentum gesegnet. In Norwegen gibt es zahlreiche Wasserfälle, wie den Drammen und den Glommen, von denen jeder viele 100 000 Pferdestärken liefern kann. Aber auch Frankreich und Italien besitzen große Mengen an Kraftwasser. Deutschland hingegen könnte, selbst wenn alle Möglichkeiten ausgewertet würden, doch nur ein Viertel der jetzt bei uns erforderlichen Antriebkraft aus dem fallenden Wasser decken. Augenblicklich werden noch nicht 10 v. H. der deutschen Elektrizitätswerke mit Wasserkraft betrieben.

Die Verteuerung der Kohle, die nach Beendigung des Kriegs eintrat, und die Einsicht, daß Kohle für lange Zeit unser wichtigstes Zahlungsmittel für das Ausland bleiben wird, haben das Streben nach Wasserkraftgewinnung auf deutschem Boden lebhaft gestärkt. Schon vor 1914 sind viele Groß-Kraftwerke dieser Art bei uns entstanden, ihre Zahl steigt aber jetzt weit rascher als früher. Besonders Süddeutschland ist auf diesem Gebiet lebhaft tätig, da hier allein in unseren Landen größere Gefälle vorhanden sind und gerade dorthin die Kohle von weit her herangeschafft werden muß.

Die folgende Liste der Wasserkräfte auf der Erde gibt keine sicheren Zahlen, sondern nur Näherungswerte, die allerdings aus mehrfachen, sehr eindringlichen Schätzungen gewonnen sind:

| | Verfügbare Wasserkräfte | | | je Bewohner | |
|---|---|---|---|---|---|
| Europa | etwa 65 | Millionen | PS | etwa 0,13 | PS |
| Asien | „ 236 | „ | „ | „ 0,27 | „ |
| Afrika | „ 160 | „ | „ | „ 1,14 | „ |
| Nordamerika | „ 160 | „ | „ | „ 1,27 | „ |
| Südamerika | „ 94 | „ | „ | „ 5,25 | „ |
| Australien | „ 30 | „ | „ | „ 3,75 | „ |
| zusammen | etwa 745 | Millionen | PS | | |

Von diesen Kraftquellen sind, wie bemerkt, vorläufig nicht allzu viele erschlossen. Verhältnismäßig am gründlichsten hat Deutschland die geringen ihm zur Verfügung stehenden Kraftwassermassen herangezogen. Am schlechtesten ist die Ausbeute vorläufig in Großbritannien und in den Ländern des ehemaligen Österreich-Ungarn:

| | Ausgenutzte Wasserkräfte in Mill. PS | in % d. verfügb. |
|---|---|---|
| Deutschland | etwa 0,62 | 41,3 |
| Italien | „ 1,30 | 26,0 |
| Frankreich | „ 1,50 | 25,0 |
| Schweiz | „ 0,60 | 24,0 |
| Schweden | „ 1,00 | 17,8 |
| Japan | „ 0,70 | 17,5 |
| Vereinigte Staaten von Nordamerika | „ 9,91 | 16,0 |
| Kanada | „ 2,50 | 13,2 |
| Spanien | „ 0,62 | 12,0 |
| Norwegen | „ 1,36 | 11,5 |
| Rußland | „ 1,00 | 10,0 |
| Gebiet des früheren Österreich-Ungarn | „ 0,60 | 9,6 |
| Großbritannien | „ 0,08 | 8,0 |
| | etwa 21,79 | 15,8 |

Die Kraft des fallenden Wassers wird mit Hilfe von zwei Maschinengattungen ausgenutzt: durch die Wasserräder und durch die Turbinen. Die erstgenannte Art ist sehr viel früher entstanden als die zweite. Die Wasserräder waren schon vor weit mehr als zwei Jahrtausenden im Gebrauch, und ihre ursprüngliche Betriebsform hat sich bis in unsere Tage erhalten.

In einfachster Art wird das Rad bei den Schiffsmühlen verwendet. Seine Welle ruht hier auf zwei durch Balken miteinander verbundenen Kähnen (Bild 207), die im Strom fest verankert sind, und die Strömung trifft frei auf die Schaufeln. Die Schiffsmühle ist sozusagen ein umgekehrter Raddampfer. Dessen durch Maschinenkraft bewegte Radschaufeln drücken gegen das als feststehend angenommene Wasser und schieben das Schiff vorwärts. Hier prallt die Strömung auf die Schaufelarme, die ihr, da die Welle festgehalten wird, nur mit drehender Bewegung ausweichen können (Bild 208).

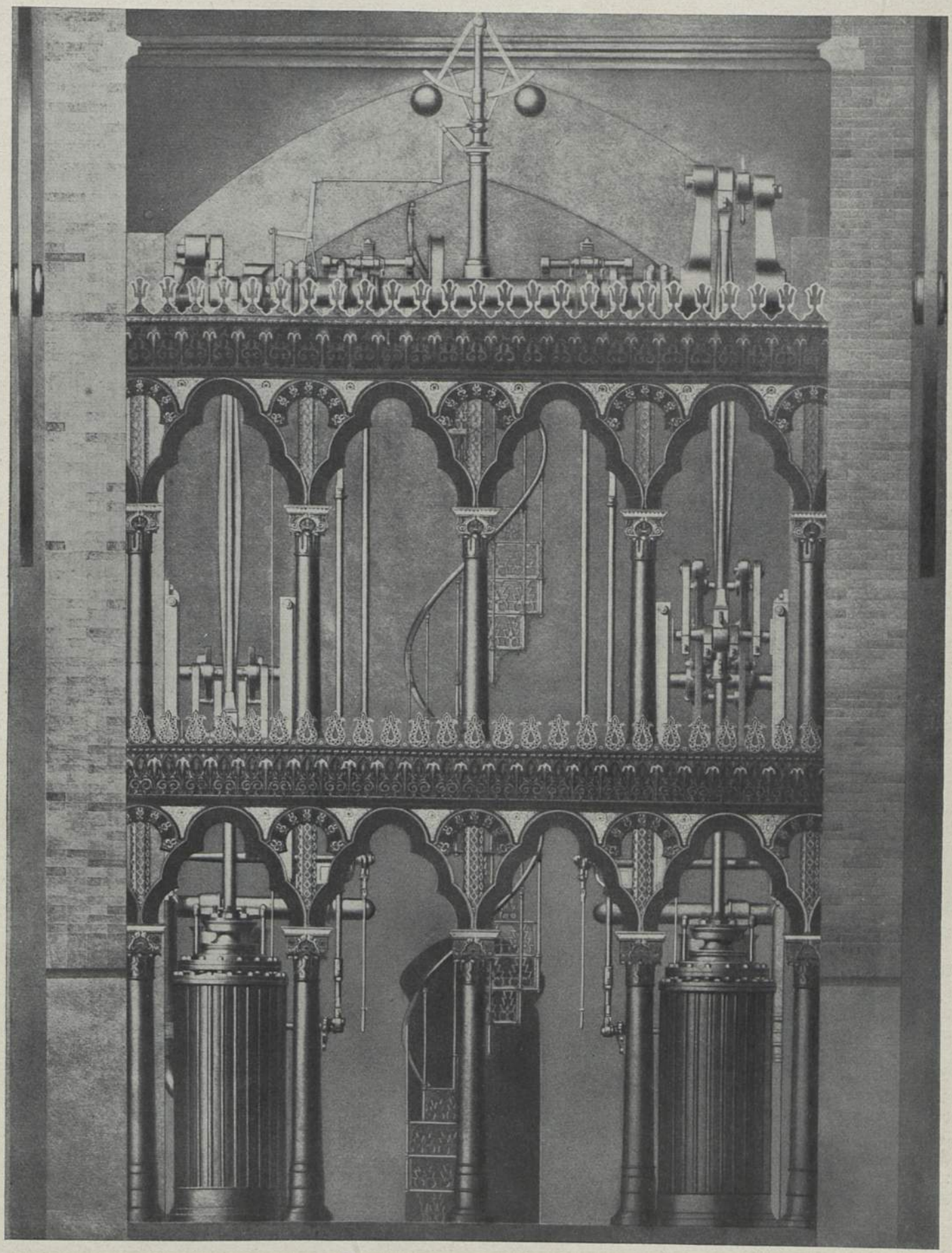
Solche Schiffsmühlen haben schon im sechsten Jahrhundert unserer Zeitrechnung auf dem Tiber gearbeitet. Dort wurden sie zum Mahlen von Getreide verwendet, an anderen Orten dienten sie zum Heben von Wasser. Der Rhein mit seiner scharf gehenden Strömung hat noch im vorigen Jahrhundert sehr viele Schiffsmühlen getragen. Tafel VIII zeigt zwei große Anlagen, die Getreide für die Einwohner von Köln gemahlen haben. Heute sind die Schiffsmühlen im Rhein sämtlich, bis auf zwei, bei Nackenheim und bei Ginsheim, verschwunden, und auch auf anderen Strömen trifft man sie nur noch selten an.

Diese Einrichtungen passen nicht mehr in die Neuzeit. Ihre Leistungsfähigkeit und ihr Wirkungsgrad sind gering, da der weitaus größte Teil des Flußwassers seitlich ausweicht und an den Schaufeln keine Arbeit leistet. Wenn man von den Rädern einen auch nur einigermaßen ausreichenden Nutzen haben will, ist es notwendig, ihnen das Wasser in einem künstlichen Gerinne zuzuführen. Unmittelbar vor dem Rad darf der Lauf nicht breiter sein als der Radkörper, damit alles Wasser zur Arbeit herangezogen wird. Die Anlegung größerer Kunstbauten, wie wir sie später bei der Besprechung der Turbinen kennenlernen werden, rechtfertigen die Wasserräder nicht, weil sie nur für geringes Gefälle und kleine Wassermengen nutzvoll angewendet werden können. Unter solchen Umständen haben sie freilich oft einen besseren Wirkungsgrad als die Turbinen, und darum leben sie noch heute als bescheidene Brüder, die es im Leben nicht sehr weit gebracht haben, neben jenen großmächtigen Herren.

Man unterscheidet unterschlächtige, mittelschlächtige und oberschlächtige Wasserräder (Bild 209 bis 211). Maßgeblich für die Kennzeichnung ist, in welcher Höhenlage gegenüber der Radwelle das Kraftwasser den Radkörper trifft.

Die Schiffsmühlenräder gehören zu der unterschlächtigen Gattung, sie nehmen aber eine Sonderstellung in dem gesamten Familienkreis ein, weil sie im glatten Gefälle arbeiten. Sonst ist es stets notwendig, daß an der Stelle, wo das Rad aufgestellt wird, ein Gefällsprung vorhanden ist. Oberwärts gibt es einen Oberwasserspiegel, unterwärts einen Unterwasserspiegel, und der Höhenunterschied zwischen beiden ist das nutzbare Gefälle.

Die unterschlächtigen Räder arbeiten bereits, wenn dieses Gefälle nur ½ Meter beträgt, und eine so kleine Stufe findet sich in der Natur häufig vor oder läßt sich durch einfachste Stauung des Oberwassers gewinnen. Man stellt ein Brett, Spannschütz genannt, so in das Oberwasser, daß nur ein schmaler Durchtritt-Querschnitt zwischen der Sohle und der

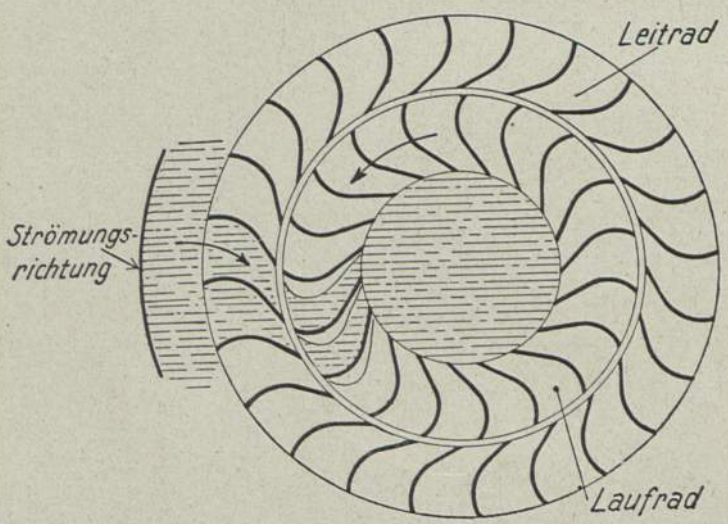


215. Die von Borsig im Jahre 1842 erbaute Dampfmaschine für den Springbrunnen in Sanssouci bei Potsdam

Unterkante des Schützes bleibt, und hat dann stets eine genügende Strömung zur Verfügung. Kein Wunder, daß diese Räder, die so leicht versorgt werden können, schon in frühen Zeiten angewendet worden sind.

Wenn die Natur dem Menschen eine Kraftgewinnung leicht macht, so besteht von vornherein der Verdacht, daß die Ausbeutung der vorhandenen Energie nicht sehr günstig ist. Und diese Vermutung ist hier, wie in den meisten anderen Fällen, durchaus gerechtfertigt. Die Energie des unter dem Spannschütz hervorströmenden Wassers, die von seiner Menge oder seinem Gewicht und der Höhe des Sturzes erzeugt wird, wirkt stoßend auf die Radschaufeln. Die Betrachtung des abfließenden Wassers zeigt, daß es lebhaft schäumt und sich in rascher Bewegung befindet. Das hübsche Bild des mit Gurgeln und in Wirbeln geschwind im Unterlauf davongehenden Wassers entsteht durch einen Verlust, gerade wie die meisten anderen Schauspiele im Bereich der Technik, an denen die Zuschauer sich ergötzen. Die Arbeit, durch die das Gurgeln und Schäumen hervorgerufen wird, ist nicht für die Bewegung des Rads genutzt worden. Ursache dieser schlechten Ausbeutung der Arbeitsfähigkeit, die dem Wasser innewohnte, ist eben die Tatsache, daß es auf die Radschaufeln in Form eines Stoßes trifft. Die Schaufeln drehen sich stets langsamer, als das Wasser vorwärts eilt, dieses ist nicht imstande, das Hindernis auf die gleiche Geschwindigkeit zu bringen, so daß es nur einen Teil seiner Energie an das Rad abzugeben vermag. Stoßwirkungen sind in der Technik immer ungünstig.

Wenn in einem gewöhnlichen unterschlächtigen Rad 30 v. H. der Wassermenge ausgenutzt werden, so ist das bereits viel. Poncelet ist es gelungen, den Schaufeln eine solche Form zu geben, daß sie das auftreffende Wasser günstig führen und ihm Gelegenheit geben, fast stoßfrei an den Schaufelwänden entlang zu gleiten. Der Nutzeffekt steigt hierdurch auf mehr als 60 v. H.




216. Durchschnitt durch eine Turbine
Das Wasser strömt durch die Kammern des feststehenden Leitrades, die ihm eine solche Richtung geben, daß es im günstigsten Winkel auf die Schaufeln des Laufrades trifft

Bei den anderen Gattungen der Räder ist das stoßende Auftreffen des Wassers zwar auch nicht ganz vermieden, die Verhältnisse liegen bei ihnen aber weit günstiger, weil wenigstens das Gewicht des Wassers Gelegenheit hat, sich in Ruhe auszuwirken.

Beim oberschlächtigen Rad ist der Zulauf über dem Scheitel angeordnet. Das Wasser läuft in die zellenförmig gebildeten Schaufeln, in denen es bis kurz vor Erreichung des Unterwasserspiegels verbleibt. Die Drehung entsteht durch die höhere Belastung des Radteils, dessen Zellen ständig gefüllt sind. Die Wirkung wächst mit dem Durchmesser des Rads, weil damit der Hebelarm, an dem die Wasserlast angreift, größer wird.

Das mächtigste aller Wasserräder ist zum Antrieb von Pumpen in den Laxey-Glen-Gruben an der Ostküste der englischen Insel Man (Bild 214) erbaut worden und noch heute im Betriebe. Es hat einen Durchmesser von 22 Metern, der Radkranz ist 1,8 Meter breit. Das Betriebswasser kommt von der Bergkette, welche die Insel durchzieht, durch eine unterirdische Zuleitung heran, steigt in einem Turm in die Höhe und wird aus diesem in einem Gerinne den Schaufeln zugeleitet. Das Rad läuft sehr langsam, denn es macht in einer Minute nur Eine Umdrehung, und hat daher nur eine geringe Leistung. Die Welle treibt durch eine Kurbel ein langes Gestänge an.

Reicht das Gefälle nicht aus, um das Wasser über dem Scheitel zuzuführen, so wird es etwa in der Höhe der Welle herangeleitet, und man hat nun ein mittelschlächtiges Rad. Bei kurzer Überlegung ergibt sich von selbst, daß sich ein solches Rad in entgegengesetztem Sinne dreht wie ein oberschlächtiges (vgl. die Bilder 210 u. 211). Damit ferner beim mittelschlächtigen Rad, wo der Weg der gefüllten Zellen über weniger als ein Viertel des Umfangs geht, das Wasser nicht zu früh abströmt, wird die Sohle des Gerinnes kreisförmig ausgebildet. Der möglichst eng anschließende Kropf, wie diese Rundung des Gerinnes genannt wird, gestattet nur geringen Wassermassen das Ablaufen in einiger Höhe über dem Unterwasserspiegel.

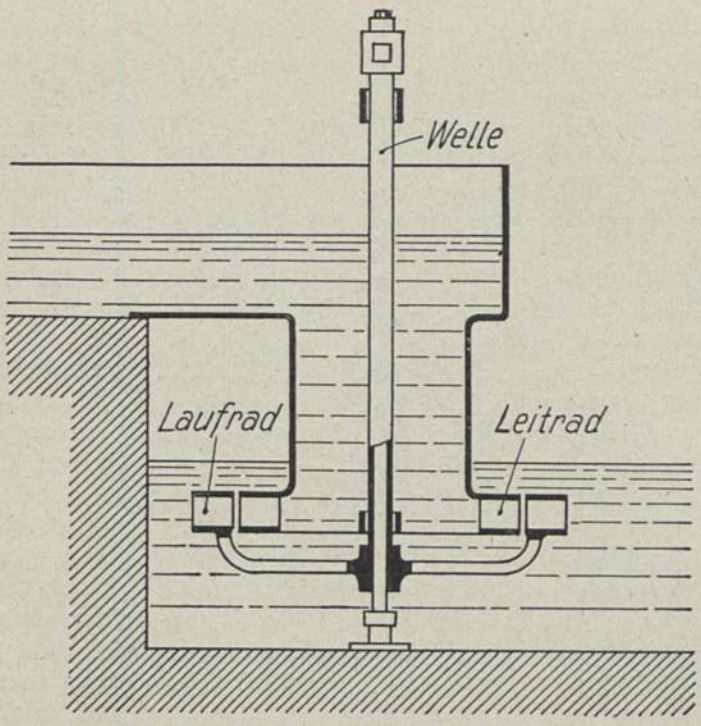
Mittel- und oberschlächtige Räder brauchen ein Gefälle zwischen Unter- und Oberwasserspiegel von mindestens 1½ Metern. Hat der Fluß, der zur Arbeit herangezogen werden soll, nicht ein solches Gefälle, so muß der Höhenunterschied künstlich hervorgerufen werden. Will man ein Gefälle von z. B. 2 Metern erreichen, so ist es leicht, zwei Punkte im abfallenden Bett des Flusses zu finden, deren Höhenlagen diesen Unterschied aufweisen. Aber die Punkte liegen weit voneinander entfernt, und dazwischen befindet sich ein allmählicher Abstieg. Es ist notwendig, die beiden Stellen so eng aneinander zu rücken, daß auf eine Entfernung, nicht größer als der Halbmesser des Rads, das ganze Gefälle zusammengedrängt ist. Zu diesem Zweck müssen künstliche, wagerechte Gerinne (Bild 212) ausgehoben werden.

Der Fluß wird durch ein Wehr abgeschlossen und kurz vor diesem der Obergraben angesetzt. Ihm kommt der Untergraben entgegen, welcher an der um zwei Meter tiefer liegenden Flußstelle beginnt. Dort, wo die beiden Gerinne einander treffen, ist das Rad aufgestellt. Zwischen den Wurzelpunkten der Gräben bleibt das natürliche Flußbett entweder ganz leer, wenn das Wehr hoch genug ist, um völlig abzusperren, oder es geht eine stark geminderte Wassermenge durch den alten Lauf, der Teil nämlich, der über die Wehrkrone fällt.

Aus einem langen Fluß kann stets ein sehr hohes nutzbares Gefälle gewonnen werden, aber die Ausgaben für die Schaffung der Gräben setzen bald eine Grenze. Es lohnt natürlich nicht, zu Seiten eines Flußbetts, das nur langsam absteigt, den Ober- oder Untergraben um mehrere Kilometer zu verlängern, um vielleicht nur einen Gefällzuwachs von einem Meter zu gewinnen. Lange Gerinne fordern meist auch Dammschüttungen für den Ober-, tiefe Ausschachtungen

für den Untergraben. Sorgfältige Berechnungen allein können Aufschluß über den rechten Mittelweg geben.

Zu beachten ist auch, daß durch den Einbau des Wehrs der Wasserspiegel des Flusses über eine weite Strecke aufwärts gestaut wird. Anstau des Wassers kann Schaden anrichten; Wiesen, die bisher fruchtbar waren, werden vielfach durch Erhöhung des Grundwassers sumpfig. Es kann auch einer flußaufwärts liegenden anderen Kraftanlage das Gefälle durch Höherlegung ihres Unterwasserspiegels infolge des Staus verringert werden, wodurch Schadenersatzansprüche entstehen. Auf alle diese Dinge ist beim Entwurf der Anlage achtzugeben.




217. Schnitt durch eine Fourneyron-Turbine
Das Leitrad sitzt innen, das Laufrad umschließt es von außen

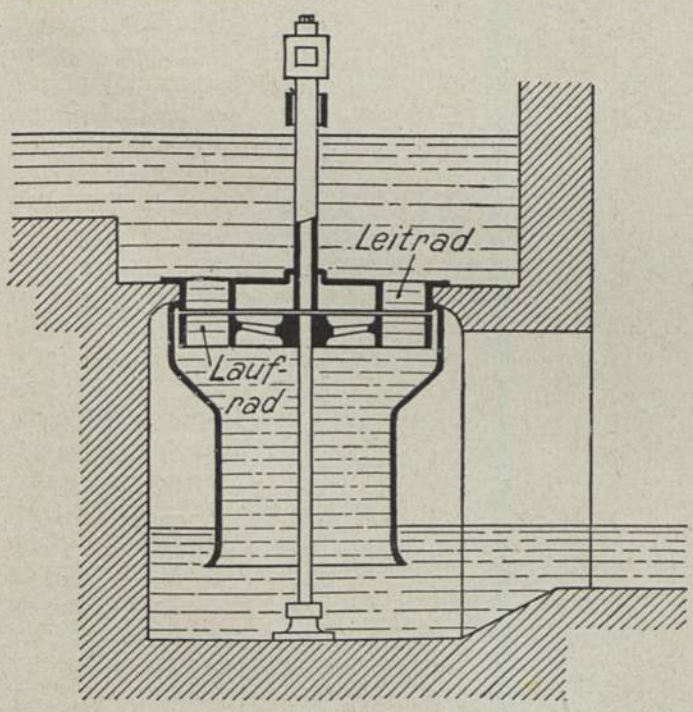
Die Wasserräder werden noch heute, wenn sie billig sein sollen, aus Holz, und zwar aus Lärchen-, Föhren- oder Fichtenholz, hergestellt. Für die Lagerzapfen und Beschläge nimmt man stets Eisen. Große Räder, die vielleicht 30 oder 40 Pferdestärken zu leisten haben, werden ganz aus Eisen hergestellt.

Es kommt selten vor, daß Wasserräder mehr als 8 Umdrehungen in der Minute machen. Wegen dieser geringen Umlaufzeit ist es fast stets notwendig, zwischen sie und die anzutreibenden Maschinen ein Getriebe zu schalten, das die Geschwindigkeit steigert.

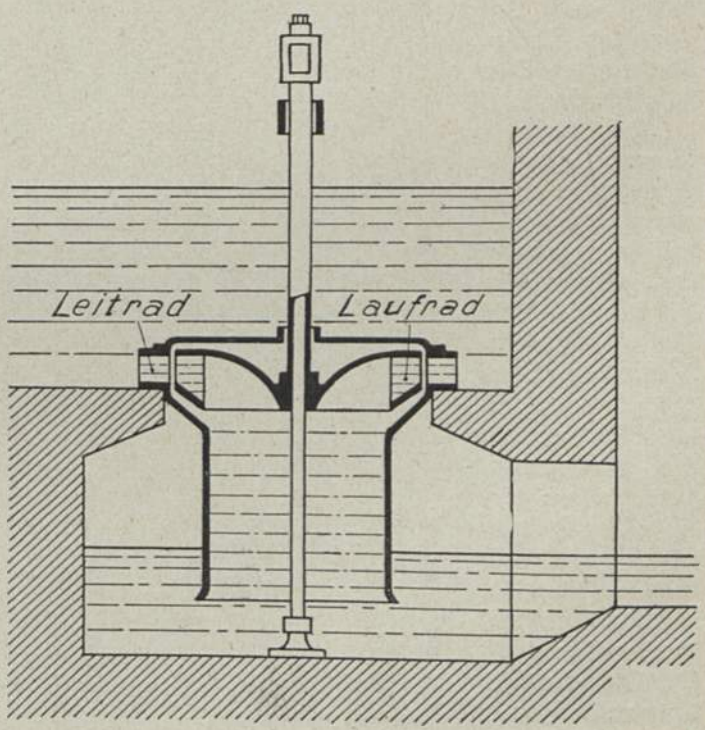
Wenn auch ein einzelnes Wasserrad immer nur wenig Arbeit zu leisten vermag, so ist es doch möglich, durch Aneinanderreihung vieler eine beträchtliche Wirkung zu erzielen. Freilich entsteht dann, wenn die Anforderung nur ein wenig hoch gestellt wird, eine Maschinenanlage von ungeheuerlichen Formen und Abmessungen.

Durch den Machtspruch Ludwigs XIV. ist ein bedeutendes Räderkraftwerk im Jahre 1682 an der Seine bei Marly zwischen St. Cloud und St. Germain errichtet worden (Bild 213). Baumeister war der Zimmermann Rennequin aus Lüttich. Der König wollte, wie Jacob Leupold, der Schilderer dieser Anlage, in seinem Buch „Theatrum machinarum hydraulicarum" sagt, „eine Maschine, welche aus der Seine so viel Wasser hebet und nach denen Gärthen zu Versailles, Marly und Trianon bringet, als zu denen alda befindlichen sehr viel Fontainen, Teichen und andern Wässerungen vonnöthen ist".

Es wurden 13 Wasserräder aufgestellt, die einen Durchmesser von je 8 Metern hatten und 235 Saug- und Druckpumpen antrieben. Mittels des ersten Pumpensatzes wurde das Wasser zunächst aus dem Fluß zu Behältern auf halber Höhe gedrückt, von wo weitere Pumpensätze es zu der Hochleitung droben hinaufbeförderten. Die Verbindung zwischen den Rädern und den fernab stehenden Pumpensätzen wurde durch „Feldgestänge" hergestellt, die unter anderem aus 1200 hölzernen Schwingen und zolldicken eisernen Zugstangen von rund 20 Kilometern Länge bestanden. Es konnten damit




218. Schnitt durch eine Henschel-Jonval-Turbine
Das Leitrad ist oberhalb des Laufrades angeordnet und hat den gleichen Durchmesser




219. Schnitt durch eine Francis-Turbine
Das Laufrad ist innerhalb des Leitrades angeordnet

ständig 200 Kubikmeter Wasser auf 160 Meter Höhe gehoben werden. Die Anlage, die lange Zeit ihre Aufgabe erfüllt hat, kostete 80 Millionen Mark. Da die Leistung nur 120 Pferdestärken betrug, vermöchte heute eine kleine, unscheinbare Wasserkraftmaschine die gleiche Wirkung hervorzubringen. —

„An einem sonnenhellen Frühlingsmorgen des Jahres 1748 überschaute der große König von der Höhe der Terrasse seines Weinbergs herab seine Lieblingsschöpfung, die erst später von einem schwermütigen Gedanken dieses königlichen Philosophen den Namen Sanssouci erhielt.

„‚Ah,' rief er seufzend, gegen den Marquis von Argens gewendet, ‚wie schön ist das hier, aber es fehlt alles Leben, wie es die Gärten von Versailles in ihren Wasserkünsten besitzen.'

„‚Sire,' entgegnete der geistreiche Höfling, ‚der Dreizack Neptuns beruhigte die Wellen des sturmbewegten Ozeans, würde das Szepter eines großen Monarchen nicht die Macht haben, sie ihm dienstbar zu machen?'

„‚Ich habe mit dem Gedanken mich schon beschäftigt,' sprach der König in der Stellung eines Nachdenkenden, indem er sich auf seinen Krückstock lehnte, ‚aber die Mittel, die Mittel . . .'

„‚Dort die Havel, da der Höhneberg, und die Mittel, dem Wasser zu gebieten, bergan zu steigen und, von jener Höhe herabfallend, die Fontänen dieses paradiesischen Lusthains zu speisen, liegen in der Schatulle Ew. Majestät!'

„‚Laßt Baumann kommen!', gebot der König und trat zurück in das runde, mit Zedernholz boisierte Gemach, das die französische Bibliothek enthielt."

Die Schilderung dieser Szene ist einem Buch von Belani, „Geschichte und Beschreibung der Fontänen-Anlagen in Sanssouci" entnommen, das im Jahre 1843 zu Potsdam erschienen ist. Der Verfasser schildert darin in schwatzhafter Breite die Bemühungen des großen Königs um eine

220. Der Weg des Wassers in der Francis-Turbine

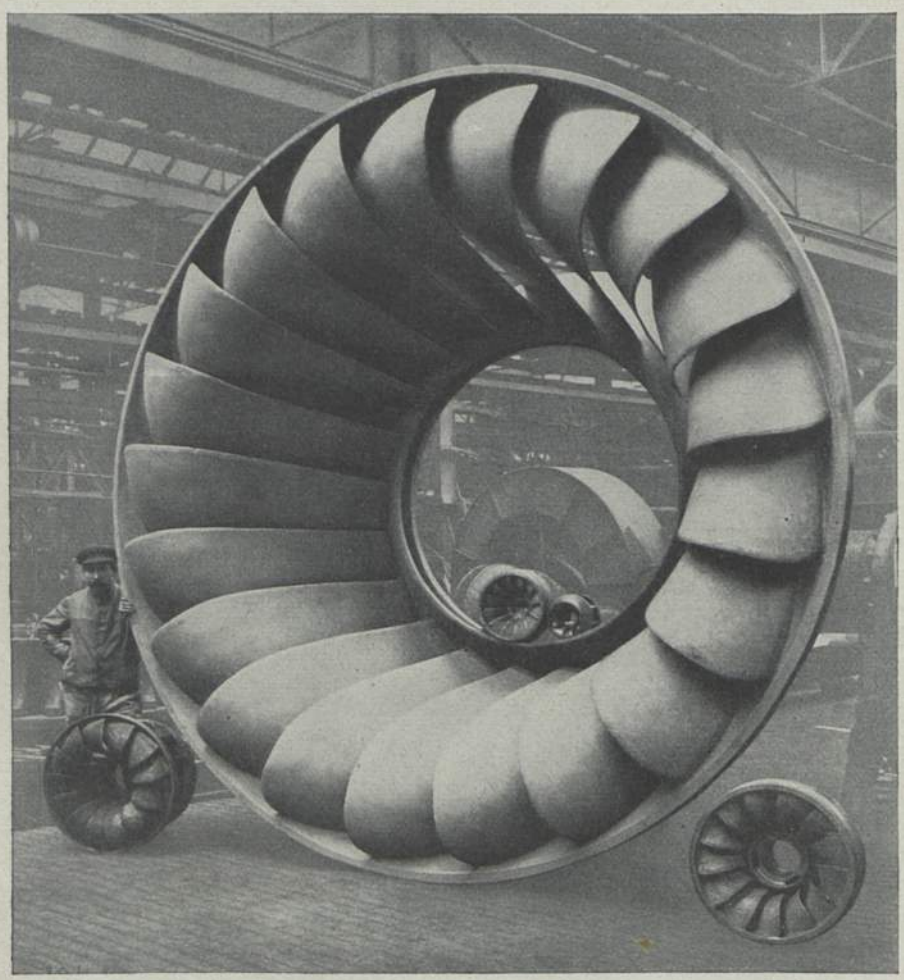
Maschinenanlage, die das gleiche leisten sollte wie jene bei Marly. Da die Havel nicht das scharf fließende Wasser der Seine besitzt, so konnte an eine Wasserkraftanlage nicht gedacht werden. Baumann, der Kastellan von Sanssouci, berief daher zur Ausführung des königlichen Befehls, der ihm an jenem „sonnenhellen Frühlingsmorgen" zuteil geworden war, einen Holländer namens Heintze, dem der Ruf vorausging, daß er sich vorzüglich auf den Bau von Windmühlen verstehe.

Eine „holländische Kunstmühle" wurde denn auch auf einem Gelände unweit des heutigen Schlosses Charlottenhof errichtet und ein Graben von der Havel her bis dorthin ausgehoben. Die Mühle sollte das Wasser auf den Höhneberg, den jetzigen, von Knobelsdorf architektonisch geschmückten Ruinenberg, auf dem Bornstedter Feld, heben. Es gelang aber Heintze, obgleich er den tönenden Titel eines Königlichen Fontainiers und Grottiers erhalten hatte, nicht, die hölzerne Röhrenleitung so kräftig herzustellen, daß sie dem Wasserdruck Widerstand zu leisten vermochte. Er wurde schließlich durch das Mißlingen aller seiner Bestrebungen gemütskrank und starb im Jahre 1752.

Nun wurde ein anderer Holländer namens Osten mit der Vollendung des Werks beauftragt, das Friedrich nicht aufgeben wollte, obgleich es bereits bedeutende Summen verschlungen hatte. Osten verlegte für 12 000 Taler bleierne Röhren, brachte aber weiter nichts zustande und wurde schließlich fortgejagt.

Nachdem mehrere andere „Fachleute" an der Anlage herumgebastelt hatten und der Bau einer zweiten Kunstmühle begonnen worden war, glaubte man endlich so weit zu sein, um dem König ankündigen zu dürfen, „daß man imstande sei, ihm eine Probe zum Gelingen des großen Werks durch einen Fontänenstrahl von beträchtlicher Höhe zu geben".

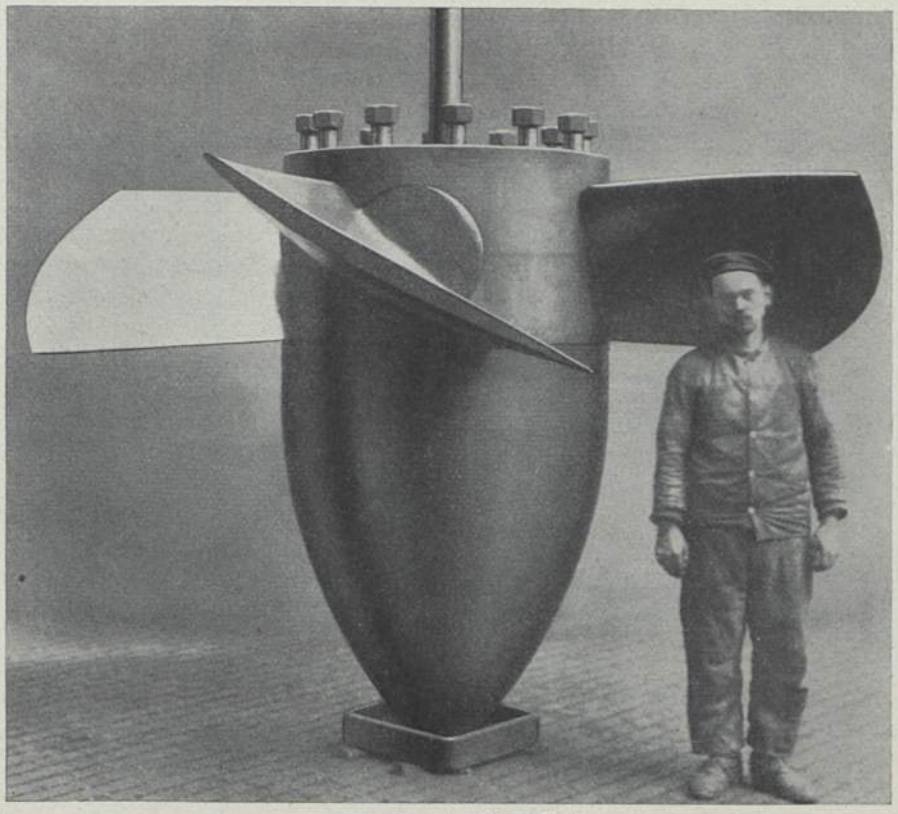
„Friedrich der Große," so berichtet Belani weiter, „erfreut, daß er endlich, nach so bedeutenden Opfern



221. Laufräder von Francis-Turbinen in verschiedenen Größen
J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz

und vielfachem Verdruß, den Gegenstand seiner Lieblingsideen verwirklicht sehen sollte, bestimmte sogleich den folgenden Tag zum Springen der Fontäne.

„Das war der Karfreitag des Jahres 1754, ein kalter stürmischer Frühlingstag. Die Ungeduld des Königs ließ sich durch die Ungunst des Wetters nicht abschrecken; der Strahl sollte aus dem Bassin springen, das sich damals im Hauptgange des Gartens von Sanssouci, der Neptungruppe schräg gegenüber, befand.



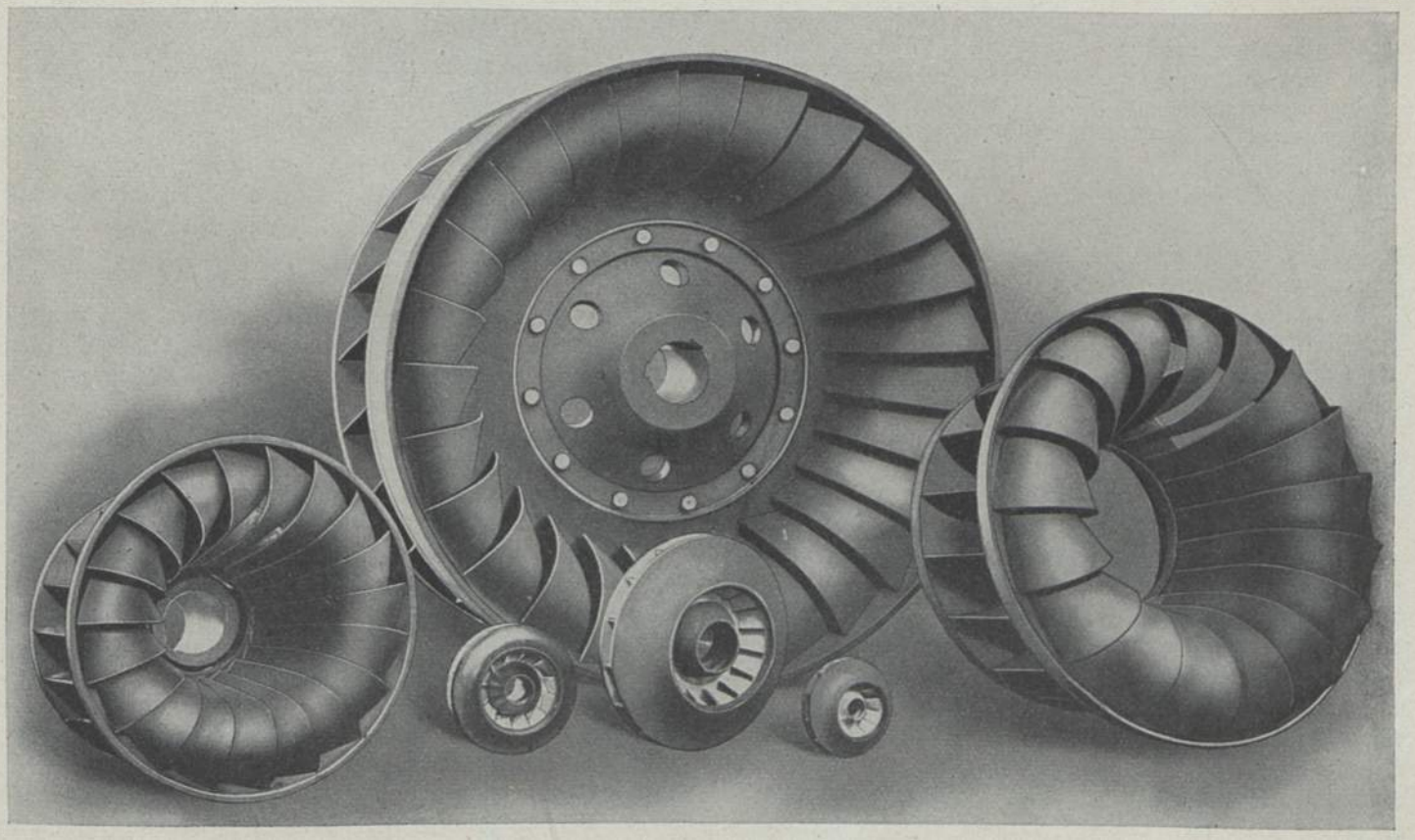
222. Kaplan-Turbine

„Man hatte im Bassin auf dem Ruinenberge einige Fuß tief Wasser gewonnen, weniger durch das Wasser, das von der unteren Kunstmühle nur sehr ungenügend heraufgepumpt war, als durch Ansammlung von Regen- und Schneewasser, die man noch durch eine Menge Schnee, welcher in das Bassin hineingeschaufelt war, vermehrt hatte.

„Um Mittag endlich kam der König herangeritten vom Schlosse aus der Stadt, wo er im Frühjahr noch residierte. Beim Obelisk stieg er vom Pferd und trat, vom Marquis von Argens, seinem Oberkammerherrn, begleitet und vom Grafen Gotter gefolgt, durch das im Jahre zuvor erbaute Hauptportal in den Garten von Sanssouci.

„Der König stellte sich in die Nähe des Marmorbassins....

„Die Erwartung war aufs höchste gespannt; die Architekten befanden sich in einer ängstlichen Tätigkeit; tiefe Stille herrschte in der nächsten Umgebung des Königs; nur oben in den Wipfeln der Bäume rauschte der Wind.



223. Laufräder von Francis-Turbinen

Im Hintergrund: Normalläufer. Vorn in der Mitte: Langsamläufer. Rechts und links: Schnelläufer. J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz

Friedrich der Einzige stand still auf seinen Krückstock gestützt, seine großen blauen Augen fest auf die Mündung der Fontäne gerichtet, kein Zucken seiner scharf ausgeprägten Gesichtszüge verriet, was in seiner großen Seele in diesem Augenblick vorging. Plötzlich hüpfte ein Wasserstrahl auf; diesem folgte ein zweiter, dritter Stoß und entwickelte sich immer höher zu einem wohl fünfzig Fuß hohen Strahl, der indes noch sehr vom stürmischen Winde gedrückt wurde.

„Noch gab Friedrich der Große kein Zeichen des Beifalls. Er schien das Ende abwarten zu wollen, ehe er ein lobendes Wort sprach. Nichts vermochte ihn aus seiner Position zu vertreiben; der dem Kartätschenhagel nicht gewichen war, wich auch keinen Fuß breit dem mit eiskaltem Regen untermischten Hagel, der das edle Antlitz streifte.

„So hatte der König dreiviertel Stunden lang das seiner Umgebung peinlich werdende Vergnügen gehabt, das Werk so vieler Sorgen und Kosten in Tätigkeit zu sehen, als plötzlich der Wasserstrahl ausblieb.

„‚Wer hat das befohlen?' fragte der König, indem er einen seiner gewaltigen Blicke auf den erbleichenden Fontainier George warf.

„‚Ew. Majestät,' stammelte dieser, ‚halten zu Gnaden ...' Das Wort erstickte ihm vor Schreck in der Kehle.

„‚Das Wasser ist abgelaufen?' ergänzte Friedrich II., der Mitleid fühlen mochte mit der Angst des armen Schelms, des einzigen jener Fontainiers, der ehrlich genug war, für mehr nicht gelten zu wollen, als er zu leisten vermochte.

„‚Zu Befehl, Ew. Majestät, indes, mit Gottes Hilfe ...'

„‚Werden wir übers Jahr um diese Zeit,' unterbrach ihn der König mit seiner sarkastischen Laune, die nicht selten seinen Zorn überwand, ‚das Vergnügen haben, die Geschicklichkeit unseres Fontainiers wieder bewundern zu können.'

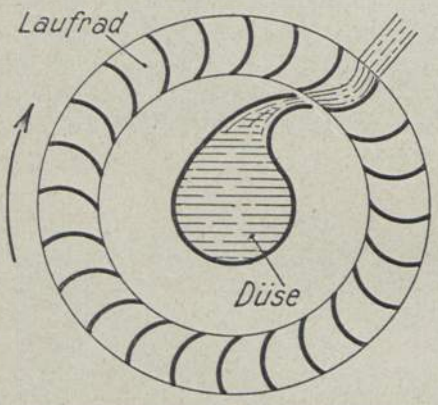
„‚Ja, Ew. Majestät,' antwortete der ehrliche Hesse, ‚wenn der liebe Gott viel Regen und Schnee gibt; denn der zweiten Kunstmühle traue ich auch nicht viel zu.'

„Der König wendete ihm den Rücken und äußerte einige der französischen Sarkasmen gegen seine beiden Begleiter, daß ihm nichts weiter fehle als Mosis Zauberstab, um den Wasserstrahl springen zu lassen, dann, nach dem Schloß zurückgekehrt, schrieb er ein französisches Epigramm für Voltaire über die Macht der Könige, welche, wie Neptun mit dem Dreizack, die Wogen des Krieges ebnen, aber nicht dem Wasserstrahl gebieten könnten, bergan zu steigen."

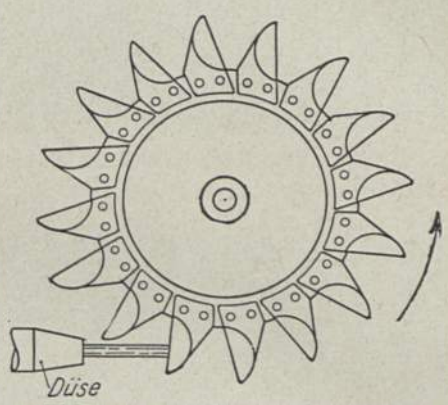
Diese dreiviertelstündige Tätigkeit des Springbrunnens war die erste und letzte, die Friedrich gesehen hat. Das kurze Schauspiel hat ihn 168 490 Taler gekostet. Obgleich immer weiter an der Anlage gearbeitet wurde, war kein Dauererfolg zu erzielen. Der Maschinenbau jener Zeit vermochte selbst diese einfache Aufgabe nicht zu bewältigen. Erst im Jahre 1842, also fast 90 Jahre nach jenem Karfreitag der getäuschten Hoffnungen, sprangen die Wasser im Park von Sanssouci wieder, um nun nicht mehr zu versiegen. Friedrich Wilhelm IV. hatte das Glück, einen Mann wie Borsig mit der Vollendung der Anlage betrauen zu können. Eine Dampfmaschine von 90 Pferdestärken schaffte verläßlich und zu jeder Zeit genügende Wassermengen.

Die erste Antriebmaschine für die Pumpen von Sanssouci war eine der „stilvollen" Konstruktionen, wie jene Zeit sie liebte. Der maurische Schmuck verdeckte beinahe völlig die Maschinenteile (Bild 215). Die Anlage kostete denn auch infolge der vielen Zutaten 25 000 Taler. Zu ihrer Unterbringung wurde ein gleichfalls in maurischem Stil gehaltenes Haus erbaut, das noch jetzt unweit der Havel in Potsdam steht. Niemand kommt wohl heute beim Anblick der exotischen Formen dieses Gebäudes auf den Gedanken, daß es einst ein Maschinenhaus gewesen ist.

Fünfzig Jahre später, als die alte Maschine den stark gestiegenen Ansprüchen nicht mehr genügte, setzte Professor Riedler an ihre Stelle ein einfaches modernes Pumpwerk, das nur den fünften Teil kostete, aber das Doppelte leistete.




224. Freistrahl-Turbine mit Stromdüse innerhalb des Laufrads: Schwamkrug-Turbine




225. Freistrahl-Turbine mit Stromdüse außerhalb des Laufrads: Pelton-Turbine

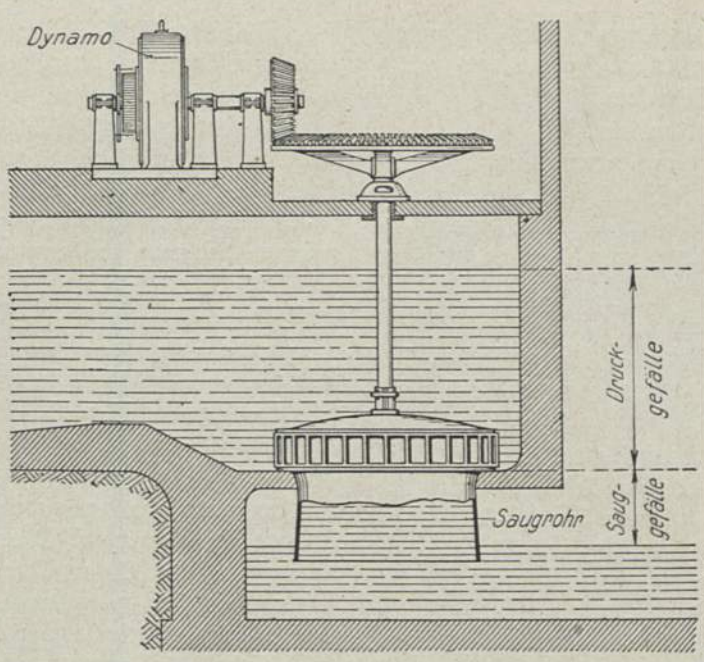
Die rauschende Strömung jedes lebhaft zu Tal gehenden Bachs oder Flusses, das Donnern jedes frei strömenden Wasserfalls ruft heute dem Ingenieur mahnend zu: „Hier läßt du hohes Gut ungenutzt vorüberziehen!" Die Ingenieure in allen Ländern würden nicht so aufmerksam auf diesen Ruf hören, ihre Hände wären nicht so bereit, hier zuzugreifen, sobald es irgend möglich ist, wenn die Männer der Technik nicht wüßten, daß die Maschinen, mit denen das fallende Wasser heute genutzt werden kann, die schönsten, einfachsten und wirkungsreichsten unter allen Krafterzeugern sind.

Es ist kaum möglich, sich eine einfachere Maschine zu denken als die Wasser-Turbine, die mit Gefällen von 1 bis 1000 Metern betrieben werden kann, die die kleinste wie die größte Wassermenge bereitwillig schluckt und ihren Energieinhalt in Drehung umsetzt, die langsam oder sehr geschwind zu laufen vermag, für die Abgabe jeglicher Pferdestärkenzahl bis zu 70 000 und 80 000 hinauf gebaut werden kann und in jeder Lage, also um eine senkrechte, eine wagerechte oder eine schräg gerichtete Achse, sich dreht. Dabei wird die zugeführte Wasserenergie auf das gründlichste ausgenutzt, 15 bis höchstens 30 v. H. gehen verloren, und das sind äußerst geringe Zahlen im Bereich der Kraftmaschinen, die den Techniker an sehr hohe Verlustzahlen gewöhnt haben.

Wenn man die Arbeitsweise des Wassers in den Turbinen mit seiner Tätigkeit in den Rädern vergleicht, so ergibt sich als augenfälligster Unterschied, daß das Wasser den Radkörper an derselben Stelle seines Umfangs verläßt, an der es hineingelaufen ist, also keine Bewegung gegenüber dem Rad ausführt, während es die Turbinen in ständig vorwärts gerichtetem Lauf vollständig durchströmt. Bei den

Wasserrädern, mit Ausnahme der unterschlächtigen, die aber zur Krafterzeugung nicht mehr ernstlich in Betracht kommen, ist stets das Gewicht des Wassers wirkend, in den Turbinen wird seine Strömungsgeschwindigkeit ausgenutzt. Es gibt fast die ganze lebendige Kraft, die ihm beim Eintritt in den Laufkörper der Turbine innewohnt, an diesen ab. Die Energie wird in Druck umgesetzt, der ständig die Schaufeln im Laufkörper zur Seite drängt und sie auf diese Weise zwingt, den ihnen einzig möglichen Weg, die Kreisbahn um die Welle, zurückzulegen.

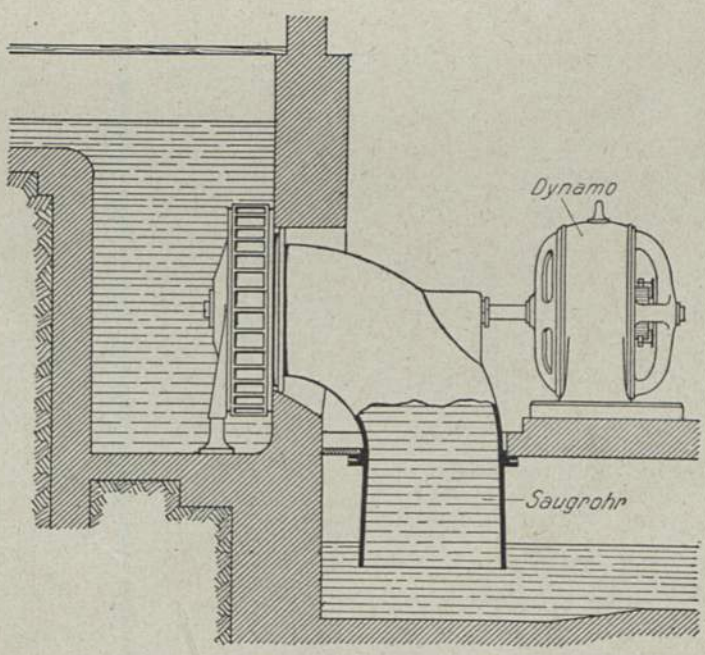
Die Druckwirkung wird hervorgerufen, indem man dem einströmendem Wasser zuerst in einem feststehenden Leitapparat eine bestimmte Richtung gibt und es dann durch entsprechend gekrümmte Wände im Laufkörper zwingt, seine Richtung zu ändern. Aus Bild 216 geht deutlich hervor, daß das in die Kanäle oder Zellen des Laufkörpers gezwängte Wasser einen Druck auf die Wände oder Schaufeln ausüben muß. Die Flüssigkeit will aus jedem Leitkanal in Richtung seiner Endkrümmung weiter fließen, wird aber aus dieser Richtung abgedrängt. Anderung der Richtung wird auch dem Wasserstrahl aufgezwungen, der aus der Düse auf Bild 225 hervorschießt.




226. Stehende Francis-Turbine in niedrigem Wasserkasten
durch Kegelräder mit Dynamo gekuppelt

Seit dem zweiten Viertel des vorigen Jahrhunderts sind Wasser-Turbinen in vielen verschiedenen Gestaltungen gebaut worden. Heute werden jedoch in der Hauptsache nur noch zwei Arten angewendet, die eine für geringe, die andere für hohe Gefälle. Da die Maschinen beider Gattungen sehr geschwind laufen können, so eignen sie sich vorzüglich für den Antrieb von Dynamos, die nur bei hoher Drehzahl einen guten Wirkungsgrad haben. Das ist sehr wichtig, denn die Erzeugung von elektrischem Strom ist ja heute die Hauptaufgabe der Wasserkraftmaschinen.

Das Wasser kann die Turbine in Richtung der Welle oder senkrecht hierzu, also radial, durchströmen. Der Leitapparat kann innen angeordnet sein oder als äußerer Kranz das Laufrad umgeben. Es ist möglich, das Wasser dem Laufkörper allseitig zuzuführen oder es nur an einzelnen getrennten Stellen, sogar nur an einem einzigen Punkt einströmen zu lassen. Da die Turbinenbauer bald die eine, bald die andere Art der Wasserführung wählten, entstanden die verschiedenen Bauarten.




227. Liegende Francis-Turbine in hohem Wasserkasten
direkt mit Dynamo gekuppelt

Der Franzose Fourneyron schuf im Jahre 1827 die erste brauchbare Wasser-Turbine. Der Leitapparat bildet hier einen vollen Ring, er liegt innen und seitwärts vom Laufrad.

Jonval, gleichfalls in Frankreich, und fast zu derselben Zeit mit ihm der Oberbergrat Henschel in Kassel bauten 1841 eine Turbine, bei der sich der Leitapparat über dem Laufrad befindet, so daß das Wasser in der Achsrichtung durchströmt.

1849 wurde eine ältere Konstruktion von Howd, die sich wenig Eingang verschafft hatte, durch den Amerikaner Francis zu einer vorzüglichen Maschine weiter gebildet. Ihr Kennzeichen ist äußere Anordnung des Leitapparats und radiale Zuführung des Wassers.

Die schematischen Schnitt-Darstellungen dieser drei Turbinen mit allseitigem Zustrom auf den Bildern 217 bis 219 zeigen von den Laufrädern nur die Kränze; die Schaufeln muß man sich nach Bild 216 eingesetzt denken.

Einzeleinströmung von innen haben die Schwamkrug-Turbine, bei der die Düse innen angeordnet ist, und das Pelton-Rad mit außen stehender Düse (Bild 224 und 225).

Die Turbinen lassen sich in vier Hauptgruppen mit mehreren Unterabteilungen sondern:

1. Nach der Wasserfassung.

a) Überdruck- oder Reaktionsturbinen.

Bei ihnen ist der Querschnitt der Laufradzellen nach der Austrittseite zu verengt (Bild 220). Da aus dem Laufrad in der Zeiteinheit ebensoviel Wasser austreten muß, wie aus dem Leitapparat zufließt, so ist die Geschwindigkeit des austretenden Wassers größer als die Geschwindigkeit des eintretenden. Das Arbeitsvermögen des Wassers, das gleich Druck mal Geschwindigkeit ist, kann aber nicht zunehmen. Folglich muß der Druck sich im Laufrad allmählich vermindern; er ist an der Eintrittseite größer als an der Austrittseite.

Wenn man sich den Körper des Laufrads in viele schmale Ringe zerlegt denkt, die in Richtung der Wasserströmung untereinander liegen, so herrscht in jedem Ring, welcher der Einlaufseite näher liegt, ein Überdruck gegenüber dem nächsten. Der also im Laufrad stets vorhandene Überdruck ist bemüht, das Wasser

am Ende der Laufradschaufeln geschwind hinauszudrängen, und wirkt, indem er verschwindet, als zusätzliche Drehkraft auf die Schaufeln.

b) Gleichdruck- oder Aktionsturbinen.

Das Wasser hat nach dem Austritt aus dem Leitapparat überall dieselbe Geschwindigkeit. Es braucht nun nicht mehr zwischen festen Wänden geführt zu werden, und so entsteht die Freistrahlturbine.

2. Nach dem Wasserzufluß.

a) Vollbeaufschlagte Turbinen.

Das Wasser strömt allseitig aus den ruhenden Zellen des Leitapparats gegen die bewegten Schaufeln des Laufrads.

b) Teilweis oder partiell beaufschlagte Turbinen.

Es sind nur wenige einzelne Leitkanäle um das Laufrad angeordnet. Oft ist nur Ein Leitkanal vorhanden (wie bei der Schwamkrug- und Pelton-Turbine).

(Die Gruppen 1a und 2a, 1b und 2b fallen praktisch zusammen.)

3. Nach der Lage des Leitapparats zum Laufrad.

a) Achsial-Turbinen.

Der Leitapparat liegt über dem Laufrad. Es findet Wasserströmung in Richtung der Drehachse statt. (Henschel-Jonval-Turbine.)

b) Radial-Turbinen mit innerer Beaufschlagung.

Der Leitapparat liegt im Inneren des Laufrads und in gleicher Höhe mit diesem. Das Wasser strömt in Richtung der Radien. (Fourneyron-Turbine.)

c) Radial-Turbinen mit äußerer Beaufschlagung.

Der Leitapparat umgibt das Laufrad. Das Wasser strömt radial zu, kann aber in Achsrichtung abströmen. (Francis-Turbine.)

4. Nach der Lage der Drehachse.

a) Stehende Turbinen.

Die Welle hat senkrechte Stellung (Bild 226).

b) Liegende Turbinen.

Die Welle hat wagerechte Stellung (Bild 227).

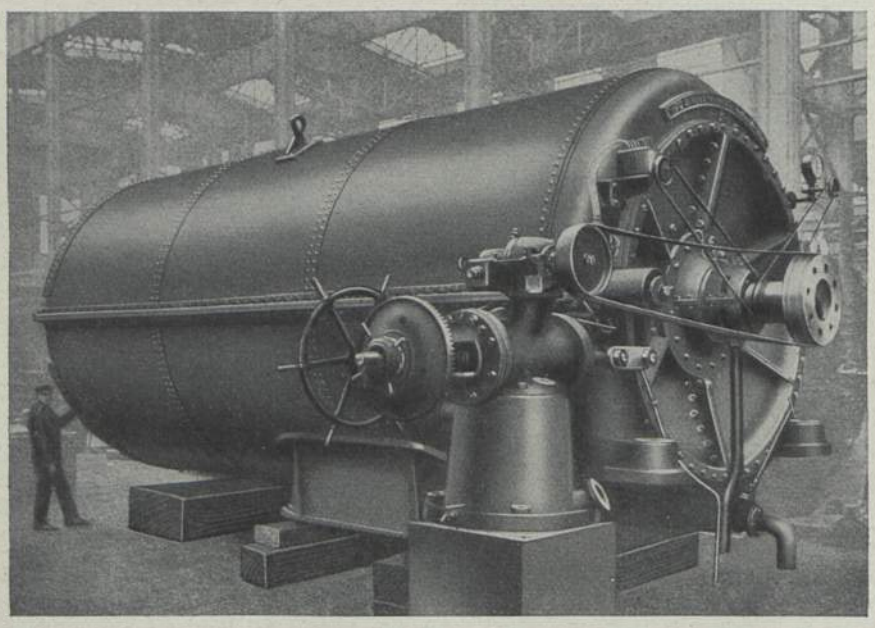
Die Bauanstalten für Wasserkraftmaschinen beschränken sich heute im allgemeinen darauf, Francis-Turbinen und Pelton-Räder herzustellen. Wenn das Gefälle nicht hoch ist und viel Wasser zur Verfügung steht, wird stets die Francis-Turbine angewendet. Das Pelton-Rad entfaltet die beste Wirkung bei hohem Gefälle; es kann noch mit geringen Wassermengen auskommen.

Nach der eben gegebenen Gruppeneinteilung ist die Maschine nach Francis eine Überdruck-Turbine mit voller radialer äußerer Beaufschlagung. Das Wasser wird, wie bei allen anderen Turbinen, zur Erzielung guter Nutzwirkung so geführt, daß nirgend ein Stoß auftritt. Insbesondere muß dieser beim Übergang des Triebwassers von den Kanälen des Leitapparats über den schmalen Spalt zu den Kanälen im Laufrad vermieden werden. Das kann nur geschehen, wenn hier keine schroffe Richtungsänderung stattfindet, sondern das Wasser in der ihm vom Leitkanal gegebenen Richtung aufgenommen und dann erst, indem es an den Schaufelwänden entlang gleitet, allmählich abgelenkt wird.

Bei der Betrachtung von Bild 220 sieht es nun aber so aus, als ob das Wasser nach dem Durchströmen des Spalts sehr scharf abgelenkt würde. Denn die Anfangskrümmung der Laufschaufel ist eine ganz andere als die Endkrümmung der Leitschaufel.

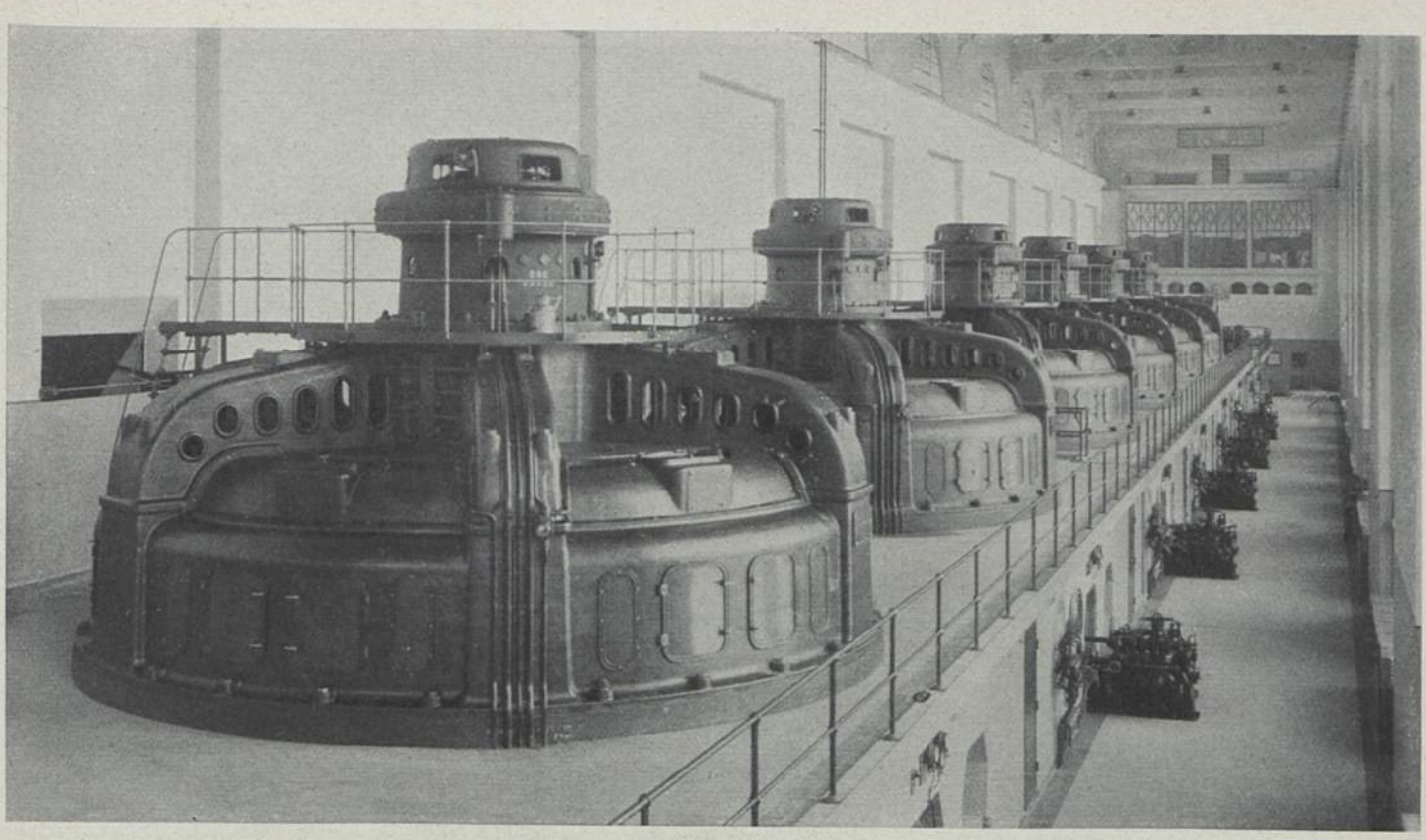
Hier unterliegt man aber einem Betrachtungsfehler. Stünde das Laufrad still, dann würde das Wasser tatsächlich gegen seine Schaufelwände stoßen. Das Rad befindet sich aber in Bewegung, und deshalb wird das einströmende Wasser nicht gezwungen, eine Richtung zu nehmen, die der tatsächlichen Schaufelform entspricht. Denn während der Zeit, die das Wasser braucht, um in Richtung der Anfangskrümmung der Laufschaufel von A nach B zu wandern, hat sich die Laufschaufel weiter bewegt, und der wirkliche Weg des Wasserteilchens führt es nach C. Die Strecke AC aber hat die Richtung der Endkrümmung der Leitschaufel. Das trifft freilich nur für die Wasserfäden in der Mitte des Leitkanals genau zu und ist auch nur für die mittlere, also am häufigsten auftretende, Laufgeschwindigkeit gültig. Der Reststoß ist unvermeidlich, und sein Vorhandensein bewirkt, ebenso wie das Aufprallen des Wassers auf die schmalen Ränder der Schaufeln, daß der Nutzeffekt praktisch nicht über 85 bis 88 v. H. steigt.

Die Francis-Turbine hat die hervorragende Eigenschaft, daß man sie sowohl hoch über dem Spiegel des Unterwassers wie auch beliebig tief aufstellen darf. Hierdurch fällt die Unannehmlichkeit fort, daß sie, wie manche andere Turbine, die Arbeit einstellt, wenn eine Stauung im Unterwasserspiegel eintritt, die das Laufrad erreicht. Alle bewegten Teile, die ja allein der Abnutzung unterliegen, sind bei der Francis-Turbine vorzüglich zugänglich, und sie können für Ausbesserungen leicht herausgehoben werden.

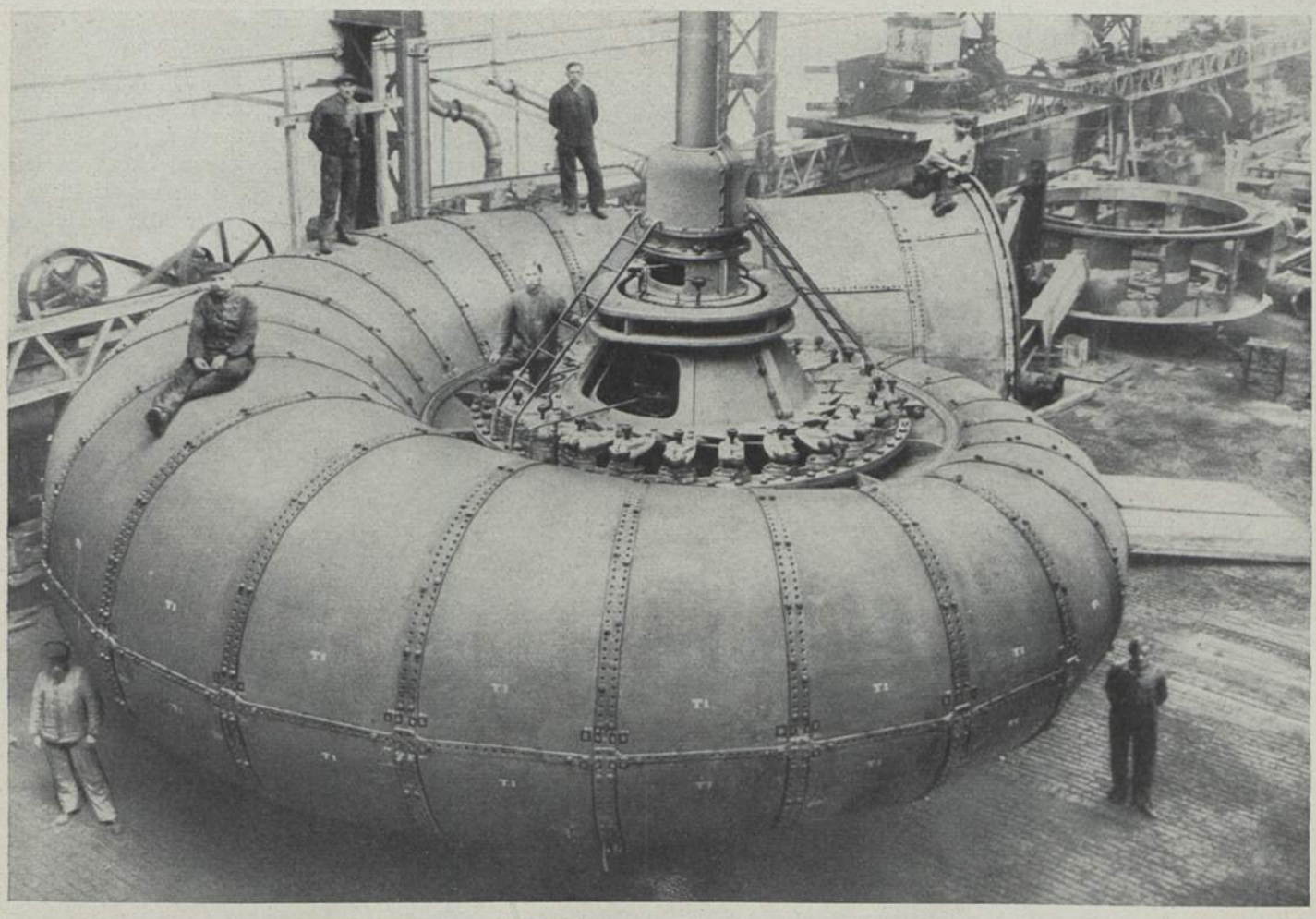


228. Kessel-Turbine mit unterem Einlauf und Regler

Man ordnete bislang, wenn irgend möglich, die Turbine mit wagerechter Welle an, weil meist nur dann eine Kupplung mit der Welle der anzutreibenden Maschine, z. B. einer Dynamo, ohne Zwischenschaltung von Zahnrädern möglich ist. Neuerdings wird, besonders bei Propeller- und Kaplanturbinen, infolge der erreichten



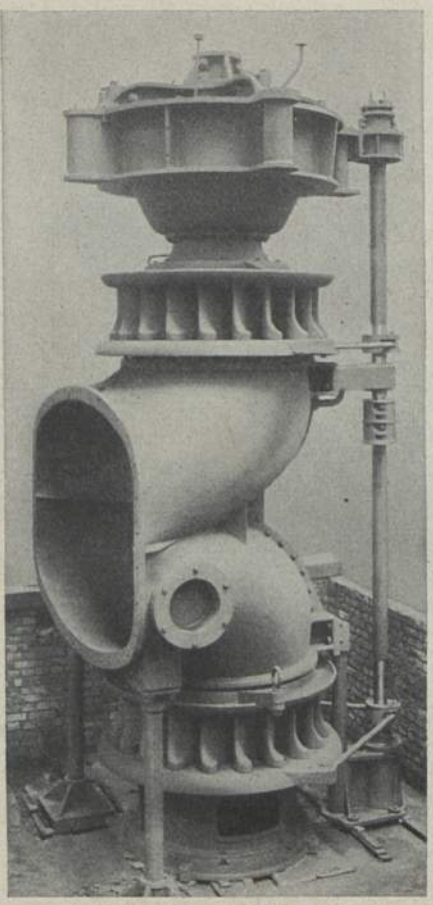
229. Kraftwerk Mühleberg an der Aar (Schweiz) mit stehenden Turbinen
Ausführung von Escher, Wyß & Cie., Zürich



230. Spiral-Turbine des Kraftwerks Omine der Ujigawa Power Company in Japan
Der Durchmesser des Einlaufs beträgt 4,1 Meter, die größte Diagonale des Gehäuses 12 Meter. Die Turbine verarbeitet bei 150 Umdrehungen in der Minute 55 Kubikmeter Wasser in der Sekunde und leistet 12 500 Pferdestärken. Erbaut von J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz

hohen Drehzahlen auch die stehende Anordnung gewählt, wobei unter Umständen noch ein Zahnradgetriebe mit gutem Wirkungsgrad zwischen Turbine und Generator eingeschaltet wird, um durch die Erhöhung der Tourenzahlen des Generators die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu heben. Das Triebwasser muß dauernd ein beträchtliches Stück über dem höchsten Teil des Laufrads stehen. Ist die Überdeckung im Wasserkasten, dessen Spiegel nicht höher stehen kann als der Spiegel im Obergraben, nur gering, dann besteht die Gefahr, daß die Turbine Luft einsaugt oder einschnarcht, wie der Fachausdruck treffend sagt, da hierbei ein dem Schnarchen ähnliches Geräusch entsteht. Luft, die in die Kanäle des Laufrads eindringt, vermindert aber die Leistungsfähigkeit der Maschine stark. Da die Breite des Laufrads stets sehr viel geringer ist als sein Durchmesser, so ist die Überdeckung bei stehender Anordnung sehr viel leichter zu erreichen.

Je tiefer die Turbine steht, desto höher ist natürlich das ausnutzbare Gefälle. Es kann aber anderseits nicht als Annehmlichkeit bezeichnet werden, wenn die Antriebmaschinen eines Kraftwerks sich in einem stets überfluteten, dunklen Kellerraum befinden. Erwünscht ist, sie so hoch aufzustellen, daß der Boden des Maschinenraums oberirdisch und hochwasserfrei liegt. Alsdann kommt man, wenn der Zuflußraum entleert ist, der die Turbine unmittelbar umgibt, stets leicht an die Maschine heran, Ausbesserungsarbeiten können bequem und in gut belichtetem Raum ausgeführt werden.



231. Zwillingsturbine für geschlossene Betonkammer

Leistung: 600 Pferdestärken bei 7 Meter Gefälle. J. M. Voith, Heidenheim a. d. Brenz

Hohe Lage der Turbine aber bedeutet ein Freihängen über dem Unterwasserspiegel. Die Größe des Freihangs, das ist die Entfernung des Unterwasserspiegels von der Unterkante des Laufrads, geht, so sollte man meinen, als Nutzgefälle verloren.

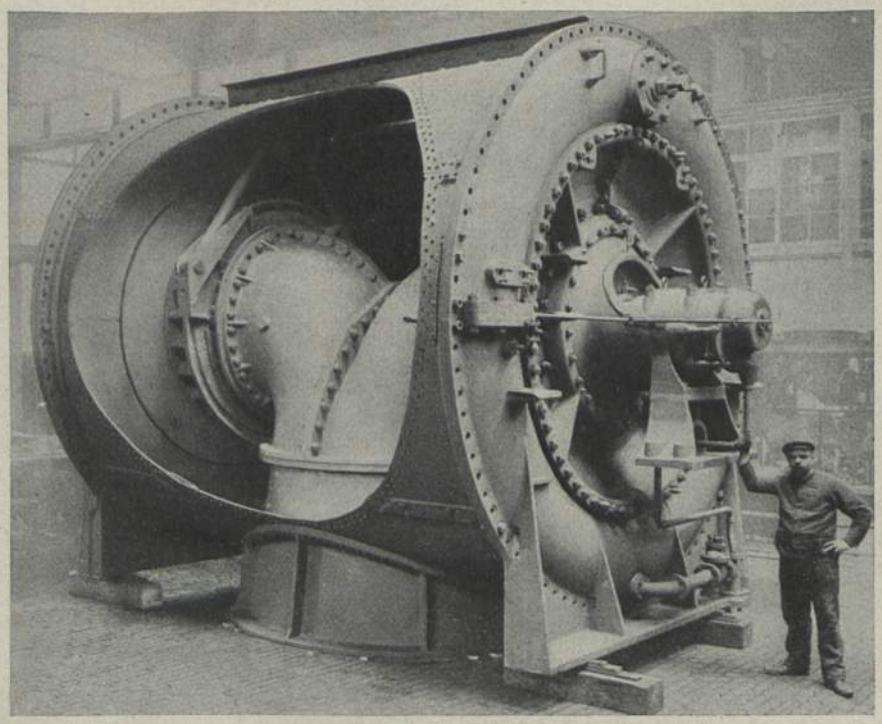
Bei der Francis-Turbine läßt sich dieser Verlust jedoch vermeiden. Er würde unfehlbar eintreten, wenn man die freihängende Turbine offen ins Unterwasser ausgießen ließe. Wird das abströmende Wasser aber in einem geschlossenen Rohr (Bild 226 und 227) geführt, dann stellt sich eine Saugwirkung ein, welche die Einbuße an Gefälle voll ersetzt.

Dieses Saugrohr stellt eine geschlossene Verbindung zwischen dem Turbinenkörper und dem Unterwasser her. Wird die Maschine angelassen, dann verdrängt das erste durchlaufende Wasser die Luft aus dem Rohr, die nirgend Gelegenheit nachzuströmen findet. Fortab ist das Wasser, das sich im Saugrohr befindet, ein Teil des Unterwassers, denn dieses wird durch den Luftdruck, der auf seiner Freifläche lastet, so weit hinaufgehoben. Wenn der Unterwasserspiegel im Rohr sich aus irgendeinem Grund zu senken begänne, dann würde sofort ein Vakuum im Rohr sich ausbilden. Seine saugende Wirkung ist immer vorhanden, und sie wirkt in gleicher Weise fördernd wie ein Gefälle von der Größe des Freihangs, macht also die hohe Lage der Turbine unschädlich.

Das Saugrohr kann senkrecht angebracht sein, es darf aber auch gekrümmt ausgebildet werden. Die vielfach in Beton ausgeführten Saugrohr-Krümmer leiten wegen des allmählichen Übergangs in die wagerechte Richtung das abströmende Wasser ohne Wirbelbildung dem Untergraben zu.

Meist ist es nur infolge der trefflichen Wirkung des Saugrohrs möglich, die Turbinenwelle wagerecht anzuordnen, sie ohne Zwischenschaltung von Übertragungsgetrieben unmittelbar mit der angetriebenen Maschine zu kuppeln. Denn diese muß ja stets und unbedingt hochwasserfrei aufgestellt sein. Sie könnte niemals neben einer Turbine stehen, die sich dicht über dem Unterwasserspiegel befindet, also in einem Gebiet, das leicht von Hoch- oder Stauwasser erreicht werden kann.

Die Francis-Turbine läuft in einem wassergefüllten Raum. Wenn das Gefälle nicht höher ist als 8 bis 9 Meter, so ist das ein offener Kasten oder Schacht, in dem die Spiegelhöhe sich, wie gesagt, nach der Wasserhöhe im Oberwasserkanal einstellt. Geht das Gefälle aber über 9 Meter hinaus, so umgibt man die Maschine mit einem geschlossenen Gehäuse, das sie eng



232. Zwillingsturbine im Kessel, Kessel geöffnet

Erbaut von J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz

umfängt. Das darin stehende Wasser hat nur eine geringe Höhe über dem Laufrad, aber der Druck, mit dem es dem Leitapparat zuströmt, ist doch der gleiche, als ob sich ein offener Schacht darüber befände, der bis zur vollen Gefällhöhe gefüllt wäre. Die Herstellung eines geschlossenen Gehäuses ist billiger als die Errichtung eines hoch aufragenden Schachtbaus, auf dessen Boden die Maschine auch äußerst schlecht zugänglich wäre.

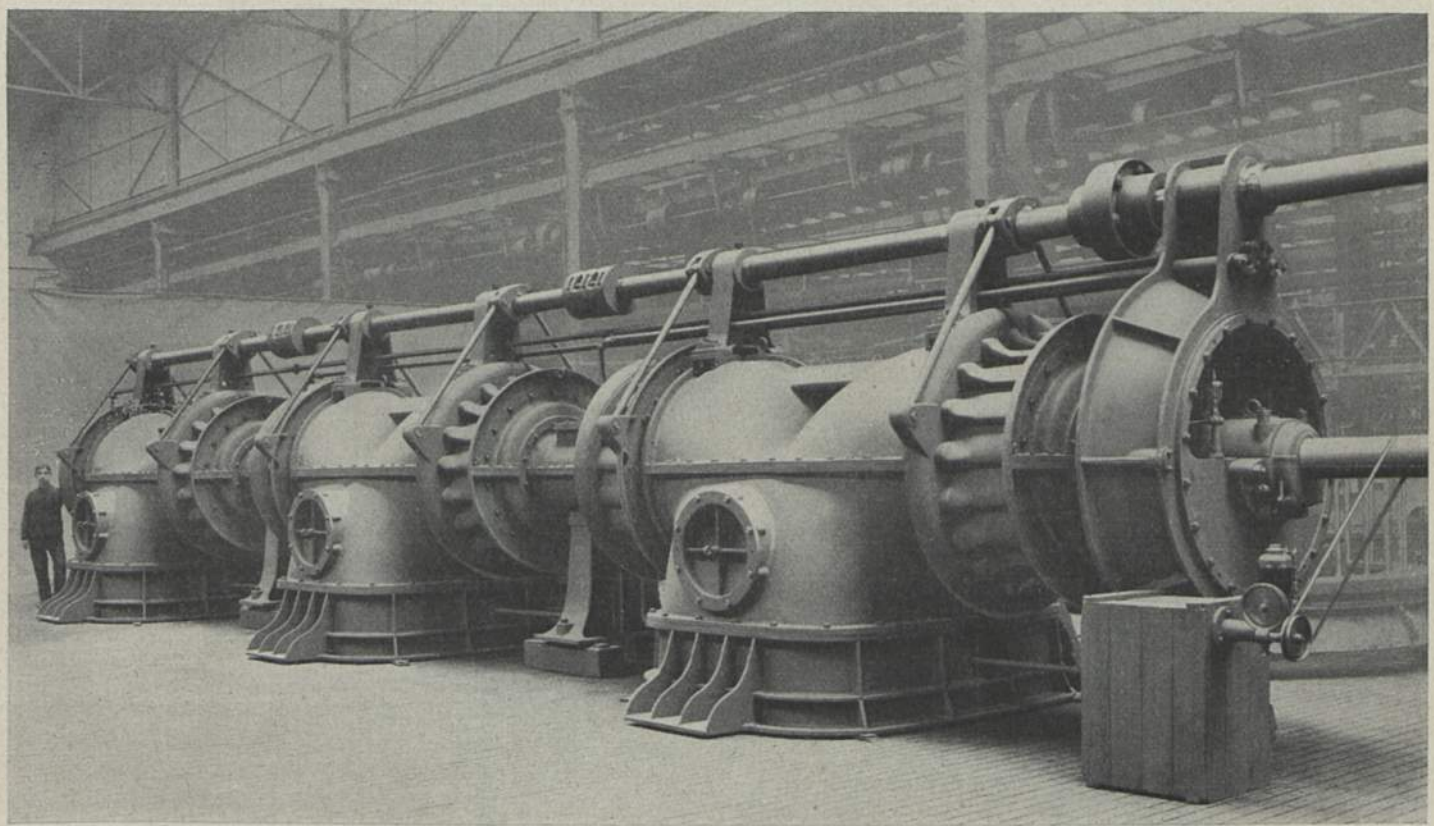
Das Gehäuse hat meist die Form eines Kessels (Kesselturbine, Bild 228), dem das Wasser von oben oder unten, seitlich oder von vorn zugeführt werden kann. Bei sehr großen Gefällen wird das Gehäuse als Spirale ausgebildet, in der das Wasser dem Leitapparat in besonders günstiger Richtung und völlig wirbelfrei zuströmt.

Die größten aller Turbinen haben Spiralbauart. Zu ihnen gehören die drei Turbinen im Kraftwerk Queenston am Niagarafall, sie leisten je 70 000 Pferdestärken. Mit der Größe ihrer Gehäuse kommen ihnen die sieben Spiralturbinen sehr nahe, die in den Werken Aufkirchen und Eiting an der mittleren Isar aufgestellt sind. Der Eintrittdurchmesser beträgt bei diesen Maschinen 4 Meter, die Höhe der Gehäuse 14 Meter. Die zuführende Rohrleitung ist so geräumig, daß eine große Schnellzuglokomotive darin Platz finden könnte. Jede dieser Turbinen leistet jedoch nur 13 000 Pferdestärken. Denn das Gefälle am Niagara ist sehr viel größer als bei den Stufen der Isar. In Irland befindet sich zurzeit im Shannon eine Anlage im Bau, deren Spiralgehäuse einen Durchmesser von 6 Metern bei 34 Meter Gefälle hat.

Wenn große Wassermengen zu verarbeiten sind, werden statt einer einzigen Riesenmaschine mehrere Einzelturbinen so angeordnet, daß sie auf die gleiche Welle arbeiten. So entstehen die Zwillings-, Dreifach- und Mehrfach-Turbinen. Sie können mit stehender oder liegender Welle, im offenen Schacht, im Kessel- oder Spiralgehäuse angeordnet werden (Bild 231—233).

Es werden für die verschiedenen Zwecke langsam laufende Turbinen, Normalläufer und Schnelläufer gebaut. Die Umlaufgeschwindigkeiten sind abhängig von den Formen der Schaufeln, insbesondere von deren Höhe. Ein Langsamläufer ist niedrig, ein Schnelläufer besitzt hohe Schaufeln. Durch die ausgebauchten Endkrümmungen der Schaufeln, die auf den Bildern 221 und 223 zu sehen sind, wird bewirkt, daß das Wasser in günstigster Wirkrichtung aus dem Laufrad abströmt.

Es sei hier erwähnt, daß in letzter Zeit eine neue Wasserkraftmaschine, die Kaplan-Turbine, entwickelt worden ist, die bei gleicher Gefällhöhe sehr viel rascher als die Francis-Turbine zu laufen vermag und selbst bei den kleinsten Wasser-



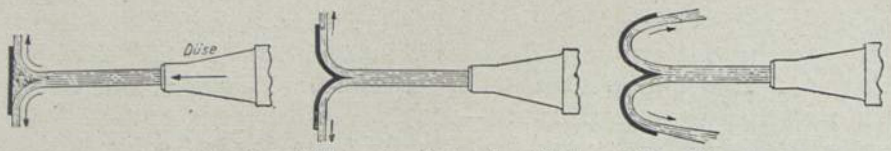
233. Dreifache Zwillingsturbine für offenen Wasserschacht
Leistung: 1016 Pferdestärken bei 4,7 Meter Gefälle. Ausführung von J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz

beaufschlagungen — also in wasserarmen Zeiten — einen hohen Nutzeffekt besitzt (Bild 222).

Die Schaufeln der Francis-Turbinen werden aus Stahlblech hergestellt und in rotwarmem Zustand auf Formkörpern in die gewünschte Gestalt gepreßt. Die Radkränze bestehen aus Gußeisen oder aus Stahlguß. Sie werden mit den Schaufeln vereinigt, indem man diese in den richtigen Abständen so in die Gußformen stellt, daß die oberen und unteren Ränder von dem eingegossenen Eisen umgeben und mit diesem verschmolzen werden.

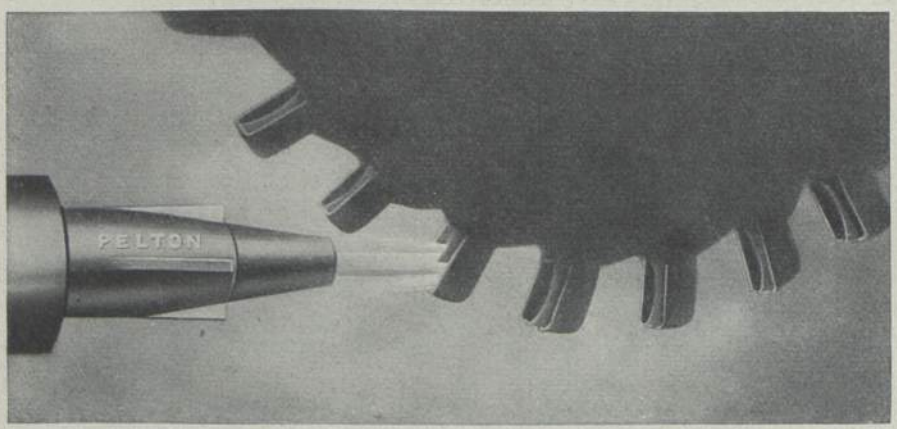
Überall dort, wo Hochgefälle ausgenutzt werden können, wird heute stets das Peltonrad verwendet. Es ist nach unserer Gruppeneinteilung eine teilweis beaufschlagte Freistrahl-Turbine mit liegender Welle.

Schon die flüchtigste Betrachtung des Pelton-Rads auf Bild 225 und 235 führt zu der Erkenntnis: diese Maschine ist eigentlich nichts anderes als ein unterschlächtiges Wasserrad.




234. Entwicklung der Form der Pelton-Schaufel

Links: Flache Schaufel des unterschlächtigen Wasserrades mit schädlicher Wirbelbildung. Mitte: Schaufel mit scharfer Schneide in der Mitte, die jede Wirbelbildung verhindert. Rechts: Schaufel in Doppellöffelform, die die Bewegungsenergie des Wassers voll ausnützt




235. Pelton-Rad in Betrieb

Momentaufnahme. Nach Holl, Wasserturbinen, Sammlung Göschen

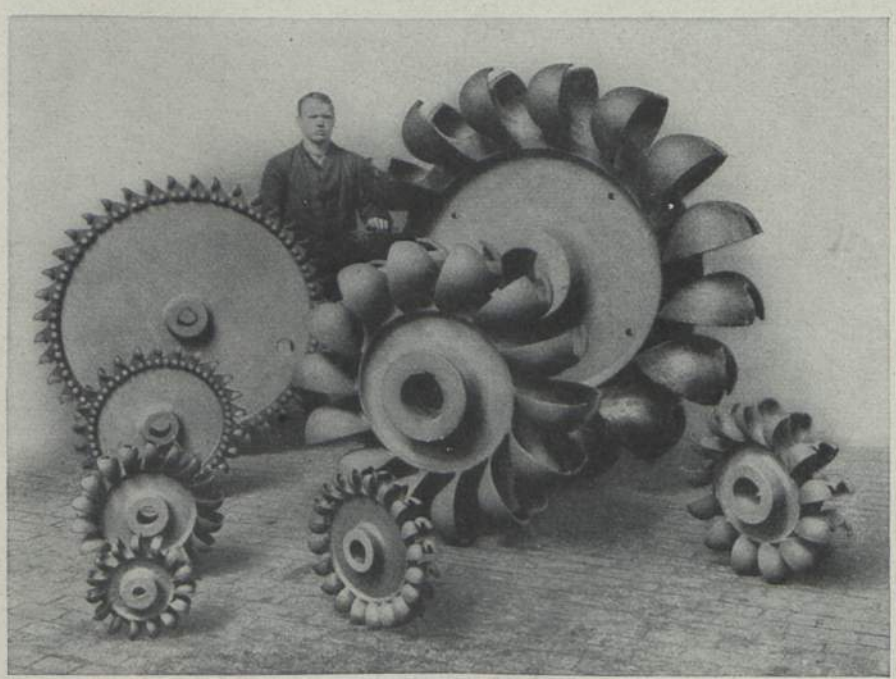
Man steht überrascht. Eine Anordnung, welche als die schlechtest wirkende erkannt worden ist, wird gerade für die modernsten und großartigsten Anlagen verwendet. Man beginnt nach den Ursachen dieser Seltsamkeit zu forschen und entdeckt hierbei einen Triumph der wissenschaftlich arbeitenden Technik.

Durch eindringlichste Betrachtung der Wasserwirkung und durch zweckentsprechende Formung des Zulaufs und der Schaufeln ist es gelungen, die langsamste und schwerfälligste der Wasserkraftmaschinen in einen schnellfüßigen Renner zu verwandeln. Das unterschlächtige Wasserrad gehört zu derselben Gattung wie die Pelton-Turbine in gleicher Weise, wie der Ackerknecht, der das Lesen und Schreiben bereits wieder halb verlernt hat, und der Finder der Relativitätstheorie gemeinsam zu der Gattung Mensch zählen.

Das Triebwasser für das Pelton-Rad strömt meist aus einer einzigen Düse, einem runden Stahlrohr, das unterhalb der Achse angeordnet ist, unter hohem Druck gegen diejenige der Schaufeln, die sich gerade in der Richtung des Wasserstrahls befindet. Wäre diese Schaufel eine einfache Platte, so entstünde hier dieselbe ungünstige Wirkung wie beim alten unterschlächtigen Rad. Das Wasser würde mit heftigem Stoß aufprallen und nur einen geringen Teil der ihm innewohnenden Energie abgeben können. Es träte eine plötzliche Ablenkung des Wassers nach beiden Richtungen ein, und in der Mitte entstünde ein Wirbel, der ein gut Teil Energie für sich, zur Erzeugung der wirbelnden Bewegung der Wasserteilchen, verbrauchen würde (Bild 234 links).

Darum hat die Pelton-Schaufel zunächst in der Mitte eine scharfe Schneide, die sie dem Wasserstrahl entgegenhält. Die anschließenden gerundeten Wangen gestatten dem Wasser eine allmähliche Änderung seiner Bewegungsrichtung. Ein verlustbringender Stoß ist fast völlig vermieden, weil die Schneide keine Anprallfläche bietet (Bild 234 Mitte).

Das sehr geschwind seitlich abströmende Wasser besitzt immer noch eine erhebliche lebendige Kraft, die ungenutzt bliebe, wenn die Wangen zu seiten der Schneide in gerade Wände ausliefen. Um auch diesen Teil der Energie zu gewinnen, sind die Schaufelräder aufgebogen. Die derart entstehende Doppellöffelform (Bild 234 rechts) zwingt das Wasser, sich so weit zurückzuwenden, daß es die Schaufel in einer Richtung verläßt, die der Zuflußrichtung fast genau entgegengesetzt ist. Hierdurch wird die Bewegungs-Energie des Wassers beinahe vollständig von den Schaufeln aufgenommen, die beaufschlagende Flüssigkeit fällt nahezu tot ab. Um die Reibung des Wassers auf den Schaufelflächen recht gering zu machen, sind diese glatt poliert. Damit die Schaufeln sehr nahe an die Düse herangerückt werden können, ohne bei der Drehung an deren Mündung zu stoßen, haben sie in der Mitte eine Einkerbung (Bild 236).



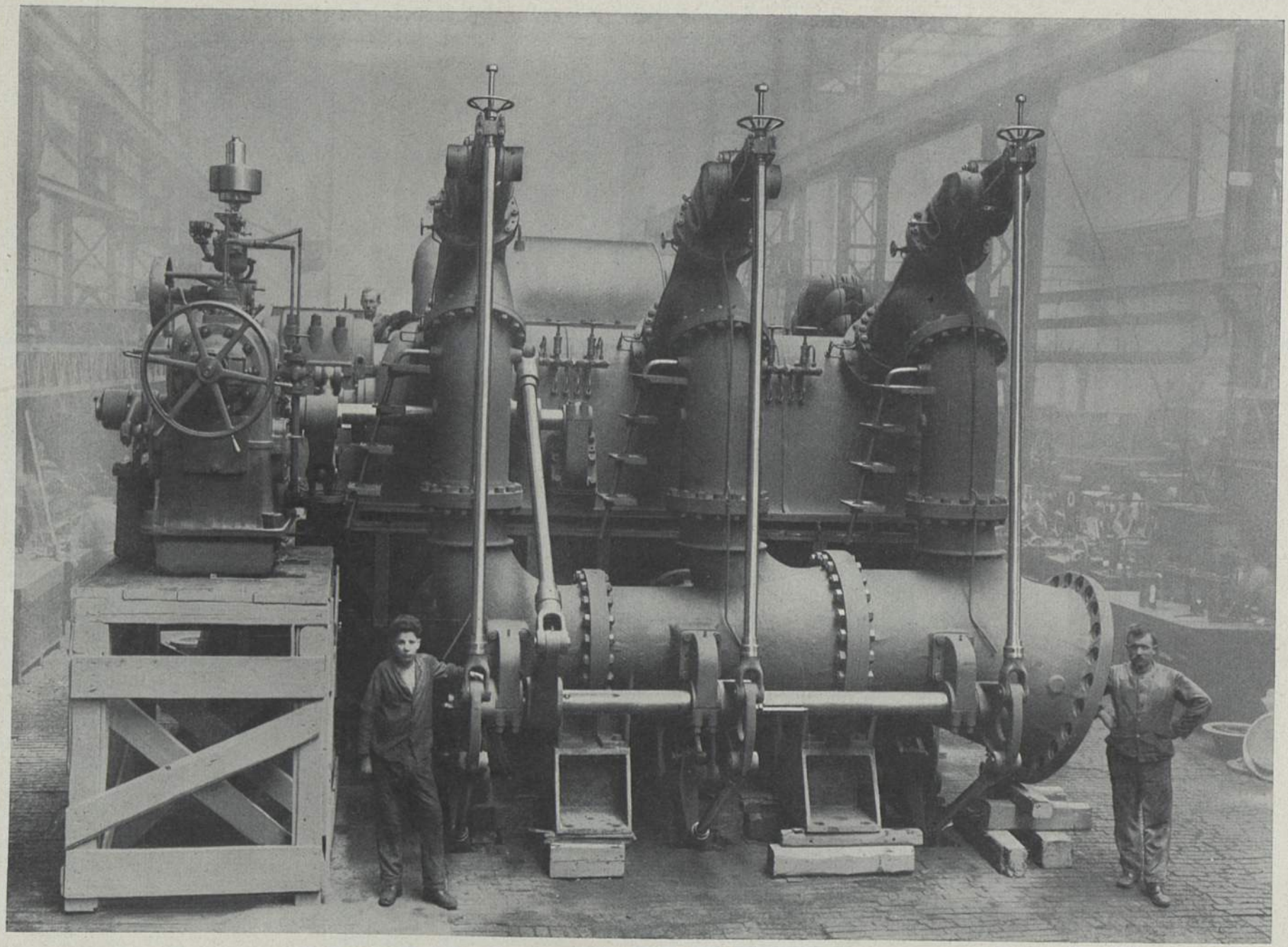
236. Laufräder von Freistrahlturbinen für verschiedene Gefälle, Wassermengen und Drehzahlen

J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz

Infolge dieser aus Theorie und Praxis geborenen Veränderung der Schaufelform gibt die Pelton-Turbine einen um mehr als 50 v. H. höheren Nutzeffekt als das unterschlächtige Wasserrad.

Bei großen Wassermengen werden auch zwei Düsen angewendet, die einander diametral gegenüberstehen. Genügt das noch nicht, so bildet man Doppelräder aus, denn das Anbringen vieler Düsen in dichter Folge würde den Wirkungsgrad der Maschine sehr stark mindern, weil das aus der einen Mündung ausströmende Wasser das geregelte Arbeiten der anderen stören würde.

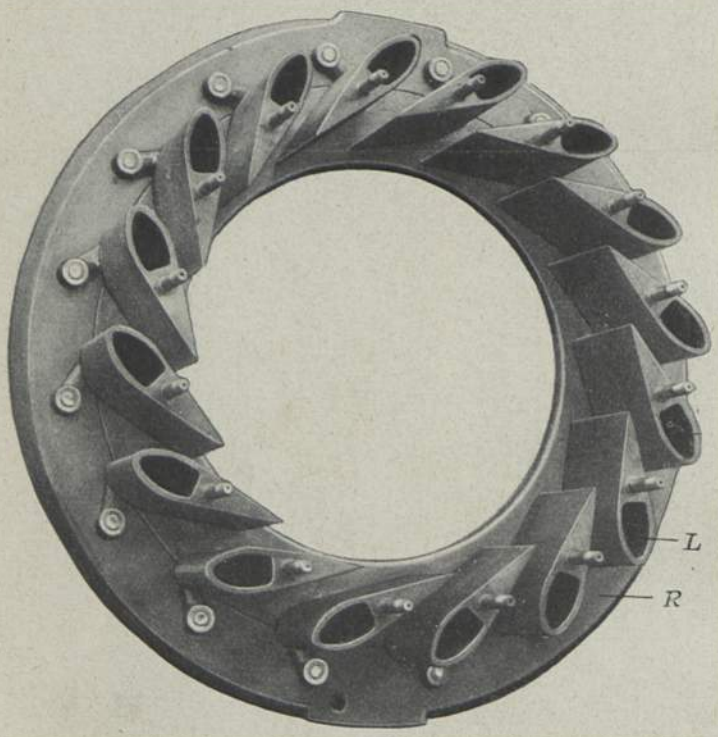
Die Pelton-Räder werden sowohl mit ganz



237. Drillings-Freistrahlturbine des Murg- und Schwarzenbach-Kraftwerks zu Forbach im Schwarzwald
Leistung: 27 500 Pferdestärken. Erbaut von J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz

kleinem Durchmesser für geringe Leistung, wie als riesige Maschinen ausgebildet. Am Niagara-Fall laufen Turbinen dieser Art, von denen jede mehr als 35 000 Pferdestärken abgibt. Auch die beiden Pelton-Turbinen des Murg- und Schwarzenbach-Kraftwerks zu Forbach im Schwarzwald, von denen jede 27 500 Pferdestärken erzeugt, sind recht ansehnliche Kraftlieferer.

Zwecks rechtzeitiger Ablösung des Wasserstrahles von der Schaufel muß dem Laufradkanal Luft zugeführt werden. Es bildet sich so zwischen Strahl und Rückschaufel ein Luftkissen. Dadurch wird bei den Pelton-Turbinen im Gegensatz zu den Francis-Turbinen die Anbringung eines Saugrohrs überflüssig.




238. Leitapparat einer Francis-Turbine mit drehbaren Leitschaufeln

L drehbare Leitschaufel, R Regulierring. Aus Leo Galland, Die Wasserkräfte in der Natur. M. Krayn Verlag, Berlin

Die Turbine wird daher etwas oberhalb des Unterwasserspiegels aufgestellt, und sie „hängt frei". Daß hierbei die Gesamtgefällshöhe nicht restlos ausgenutzt wird, ist ein nur ganz unwesentlicher Nachteil, denn dieser Gefällsverlust ist im Hinblick auf das Gesamtgefälle nur äußerst gering.

*

Die Wasserturbinen sind so gewinnend einfache Maschinen, weil sie ohne Schieber und Ventile, überhaupt ohne alle Steuerungsvorrichtungen zu arbeiten vermögen, die an den anderen Kraftmaschinen in so großer Zahl angebracht sind, sich bei jeder Umdrehung bewegen und die Maschinen so kompliziert machen. Ganz ohne Beiwerk können aber auch die Turbinen nicht auskommen. Bei glattem Lauf braucht bei ihnen nichts eingestellt zu werden, wohl aber sind Veränderungen der Zuströmungs-Querschnitte durch Regelvorrichtungen notwendig, wenn die Belastung oder die Menge des Auffschlagwassers sich ändern.

Wird in der angetriebenen Mühle ein schweres Sägegatter oder ein Mahlgang stillgesetzt, werden im Netz der elektrischen Zentrale, welche die Turbine mit Strom versorgt, Motoren abgeschaltet, dann tritt eine Entlastung der Turbine ein, und die Drehzahl der Turbine geht hinauf. Wenn Maschinen zugeschaltet werden, dann bewirkt die höhere Belastung ein Absinken der Drehzahl, das bis zum Festbremsen der Turbine ansteigen kann, falls nicht für eine Steigerung des Wasserzuflusses gesorgt wird.

Als Charakteristikum der Wasserturbine sei erwähnt, daß bei plötzlicher völliger Entlastung die Drehzahl der Turbine theoretisch nicht über das Doppelte steigen kann, sie kann also nicht „durchgehen". Praktisch erreicht infolge der Einflüsse der mechanischen Reibung die „Durchgangsdrehzahl der Turbine" nur etwa das 1,8fache der normalen Umdrehungszahl.

Jede Turbine ist für eine bestimmte Zuflußmenge gebaut. Nur wenn diese durch den Leitapparat geht, hat sie den besten Wirkungsgrad. Die Menge des Speisewassers wechselt aber sehr stark mit den Jahreszeiten, so daß die Zufluß-Querschnitte auch aus diesem Grund bald größer und bald kleiner sein müssen, wenn die Drehzahl nicht zu hoch ansteigen oder zu gering werden soll.

Es ist deshalb notwendig, eine Regelvorrichtung an jeder Turbine anzubringen. Man könnte die Einstellung von Hand vornehmen, wäre dann aber auf die Sorgfalt der Bedienungsmannschaft angewiesen. Unaufmerksamkeit könnte die schwersten Folgen nach sich ziehen. Deshalb werden stets selbsttätig wirkende Regler aufgestellt. Sie haben so feine Sinne, daß sie viel früher, als ein Mensch es könnte, eine Änderung der Umdrehungszahl merken, so daß sie ihr geschwindest entgegentreten können. Die neuzeitlichen Turbinenregler brauchen nicht mehr Zeit als 3 bis 15 Sekunden, um die zu schnell oder zu langsam laufende Maschine wieder auf die rechte Geschwindigkeit zu bringen.

Ein Handrad zum Öffnen und Schließen der Leitkanäle von Hand wird trotzdem stets vorgesehen, damit die Maschine angelassen und stillgesetzt werden kann.

Das Gehirn der selbsttätigen Einstellungs-Vorrichtung an der Turbine ist der alte Zentrifugal-, Fliehkraft- oder Schwungkugel-Regler, der durch seine Anwendung bei der Dampfmaschine wohl jedem bekannt ist. Am Ende einer senkrechten Stange, die vom Laufrad gedreht wird, sind zwei Pendelstangen gelenkartig befestigt, an denen Kugeln sitzen. Wenn die Turbine mit normaler Drehzahl umläuft, drehen sich die Schwungkugeln in der auf Bild 239 mit starken Linien gezeichneten Stellung. Sobald die Umdrehungsgeschwindigkeit anwächst, schwingen sie weiter aus und heben mittels Lenker die Muffe an, die auf der Treibstange gleiten kann.

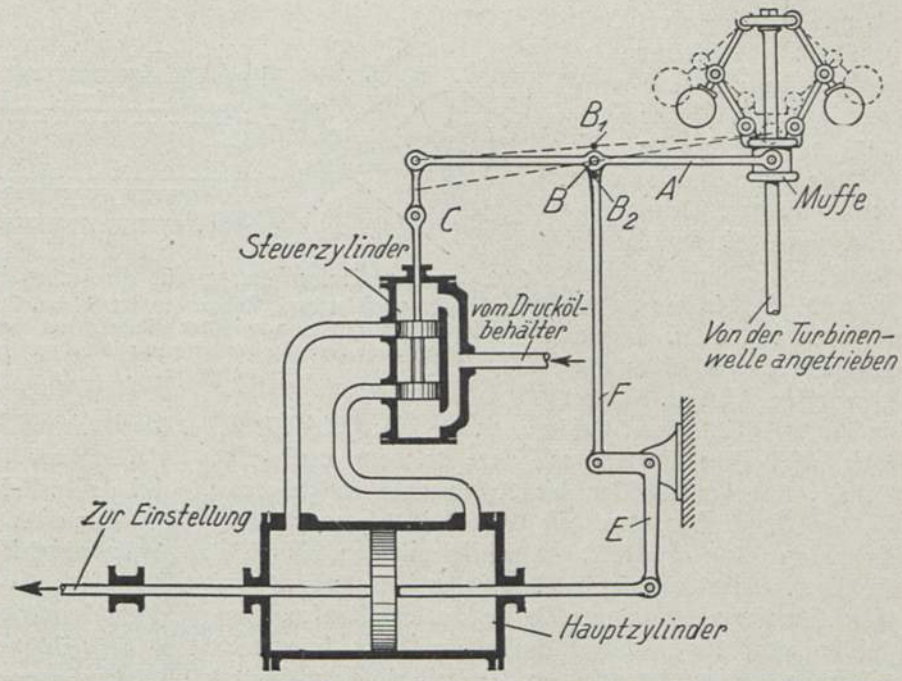
Die Bewegung der Muffe könnte unmittelbar auf die Einstellorgane der Turbine übertragen werden und sie betätigen, wenn hierbei nicht erhebliche Widerstände zu überwinden wären. Der Schwungkugel-Regler vermag die hierfür nötige Arbeit nicht zu leisten, weshalb ein Zwischenglied eingeschaltet ist, ein Hilfsapparat, wie wir ihn bereits bei der mittelbaren Steuerung von Schiffen (Band III, Seite 241) kennengelernt haben.

Die Muffe des Reglers bewegt den Hebel A (Bild 239) um den zunächst ruhenden Drehpunkt B. An dessen linkem Arm ist die Stange C angebracht, durch die ein Steuer-Doppelkolben in einem Zylinder auf und ab geschoben werden kann. Der obere und der untere Raum dieses Steuerzylinders stehen durch Rohrleitungen mit einem Gefäß in Verbindung, in dem sich Öl unter hohem Druck befindet. Zwei weitere Rohrleitungen führen von dem Steuerzylinder zum Hauptzylinder.

Wenn der Regler sich in Mittelstellung befindet, stehen die

beiden Kolben im Steuerzylinder so, daß sie die Öffnungen der zum Hauptzylinder führenden Rohre überdecken. Sinkt die Drehzahl der Maschine, dann wird der Steuerkolben gehoben und der untere Rohrmund im Steuerzylinder freigegeben. Drucköl tritt nun in den Hauptzylinder und treibt dessen Kolben nach links. Bei zu hoher Geschwindigkeit der Maschine wird der Steuerkolben abwärts geschoben, der Hauptkolben nach rechts gedrängt. Eine am Hauptkolben befindliche Stange bewegt die Einstellungsorgane an der Maschine. Das Drucköl liefert eine hierfür ausreichende Kraft.

Hätte die Regeleinrichtung nur die bis jetzt beschriebenen Teile, dann würde sie die Turbine bei jedem Ansteigen der Geschwindigkeit vollständig abschließen, bei jedem Sinken der Drehzahl stets gänzlich öffnen. Die Einstellorgane kämen niemals zur Ruhe. Es soll jedoch nur ein feines Nachstellen über einen beschränkten Bezirk eintreten. Deshalb wird der Hub des Steuerkolbens im Ölzylinder begrenzt.

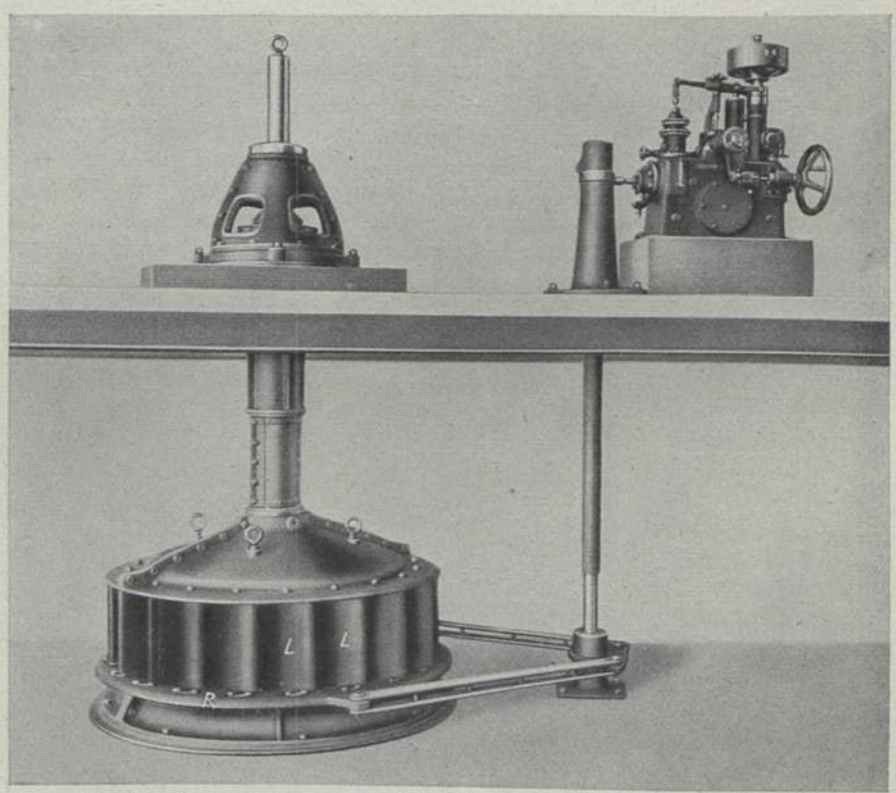



239. Schema des Schwungkugel-Reglers für Wasserturbinen

Sobald das Hauptregelgestänge sich nach rechts oder links bewegt, wird auch der Winkelhebel E und damit die Stange F verschoben. Der Drehpunkt B wandert nach $B_1$ oder $B_2$. Hierdurch wird bewirkt, daß der Steuerkolben immer sogleich wieder in die Abschlußstellung zurückgeht, so daß der Hub des Hauptkolbens gering bleibt. Die beiden Bewegungen des Hebels A, die Drehung um den Punkt B und die Rückführung durch die Stange F, mischen sich miteinander. Jedem ganz geringen Anstoß durch die Reglerkraft folgt sogleich eine Verlegung des Punkts B, und das vorsichtige Spiel dauert nur gerade so lange, bis der Fliehkraft-Regler wieder die Mittelstellung erreicht hat, wodurch ausgedrückt ist, daß die Maschine von neuem mit normaler Drehzahl läuft.

Bei der Francis-Turbine wird die Regelung durch Verändern des Querschnitts der Leitkanäle bewirkt. Die Schaufeln des Leitapparats L können in Bolzen bewegt werden, die sämtlich in einem drehbaren Ring R befestigt sind; an diesem greifen die Reglerarme an, die von der Stange des Hauptkolbens bewegt werden (Bild 240). Bild 238 zeigt deutlich die Leitschaufeln L, welche sich um die im Turbinengehäuse lagernden Zapfen drehen können. Die Drehung der Schaufeln erfolgt mittels kleiner Winkelhebel durch den Regulierring R, welcher vom Gestänge des Reglers nach beiden Richtungen hin gedreht wird. Sämtliche Leitschaufeln führen also stets die gleiche Bewegung aus. Wenn sie gleichgerichtet stehen, ist der größte Durchfluß-Querschnitt eingestellt; liegt die Schneide der einen Schaufel dem Rücken der nächsten auf, dann ist der Leitapparat abgeschlossen, es kann kein Wasser hindurchgehen, die Turbine bleibt stehen. Die Einrichtung wird nach ihrem Erfinder Finksche Regelung genannt.

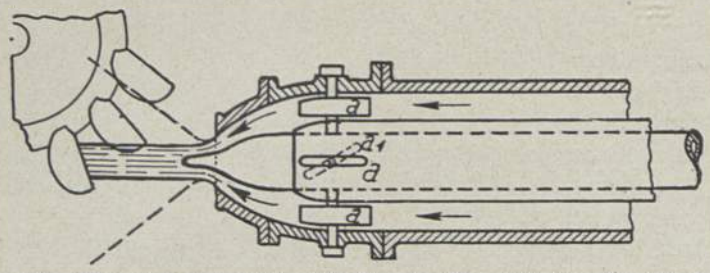
Der Durchfluß-Querschnitt in der Düse des Pelton-Rads wird häufig in sehr einfacher Weise durch Verschieben eines Dorns eingestellt. Beim Universalregler von Seewer (Bild 241) sind rings um den feststehenden Dorn Lenkplatten angebracht, durch deren Drehung der aus der Düse austretende Wasserstrahl mehr oder weniger zerstreut wird, was eine Herabminderung seines Wirkungsgrades zur Folge hat. Es gibt aber hier noch eine dritte Regelart, welche die wasserverschwendende heißt und nur dort angewendet wird, wo große Wassermengen zur Verfügung stehen. Das Regelgestänge bewirkt in diesem Fall eine Bewegung der Düse in der senkrechten




240. Selbsttätige Regeleinrichtung einer Francis-Turbine mit drehbaren Leitschaufeln
L drehbare Leitschaufel, R Regulierring. Aus Leo Galland, Die Wasserkräfte in der Natur

Ebene. Bei zu hoher Drehzahl wird der Düsenmund gesenkt, so daß nur noch wenig oder gar kein Wasser (Bild 242) auf die Schaufeln trifft.

Bei allen Regelungen außer der wasserverschwendenden tritt, wenn die Turbine bei Entlastung plötzlich abgeschlossen wird, ein Rückstau im Zuflußkanal ein. Er ist unschädlich, falls das Wasser der Maschine offen zuströmt. Arbeitet sie aber im geschlossenen Gehäuse, an das eine gleichfalls allseitig geschlossene Rohrleitung gesetzt ist, dann entsteht die Gefahr, daß der Rückstau die Rohrwandungen zersprengt. An den Regelmechanismus ist dann bei kleineren Anlagen ein weiterer Arm angelenkt, der zugleich mit dem Abschließen der Turbine eine Öffnung im Zuflußrohr freilegt; durch diese kann dann das zurückgestaute Wasser schadlos ablaufen. Lange Zuführungen, die mächtige Wasserströme aus bedeutenden Höhen herbeibringen, vermag der Regler nicht ausreichend zu bedienen. Der Rückstoß muß dann von einer besonderen Einrichtung, nämlich in einem stets offenen, meist sehr geräumigen Schacht aufgenommen und unschädlich gemacht werden. Man nennt diese Sicherheitsanlage das Wasserschloß; wir werden davon noch sprechen.



241. Seewers Universalregler für Hochdruck-Pelton-Turbinen
Die Regelung erfolgt durch Ändern der Strahlform. Durch Drehung der Lenkplatten a in die Lage $a_1$ wird der zylindrisch aus der Düse austretende Wasserstrahl mehr oder weniger zerstreut und dadurch sein Wirkungsgrad abgeschwächt

*

Die großen Wassermassen, die den Turbinen so viel Energie zuführen, rechtfertigen und fordern meist die Anlage umfangreicher Zuleitungs-Einrichtungen. Wenn die Natur nicht so gütig ist, einen Wasserfall von erheblichem Ausmaß zur Verfügung zu stellen, in dessen unmittelbarer Nähe das Krafthaus quer über dem Unterwasser errichtet werden kann, dann muß, gerade wie für die Wasserräder, das Gefälle künstlich zusammengezogen werden (Seite 116). Ist der Höhenunterschied zwischen der Entnahmestelle für das Aufschlagwasser droben und dem Ausfluß hinter dem Krafthaus nicht sehr groß, dann werden auch hier offene Gräben angelegt. Sie haben nicht selten so bedeutende Abmessungen, daß man sie mit Schiffahrtkanälen verwechseln kann. Der Obergraben setzt wieder am Flußufer unmittelbar vor dem Stauwehr an, die Turbinenschächte im Krafthaus bilden die Stufe, von deren Grund der Untergraben zum Flußufer zurückführt.

Das Sperrwehr (der überdachte Bau auf Bild 3, Tafel X) hält entweder den ganzen Wasserinhalt des Flusses zurück oder läßt einen Teil über seine Krone hinwegfallen. Dort, wo das Stauwasser in den Ober- oder Werkkanal eintritt, ist wieder ein Wehr vorgesehen.

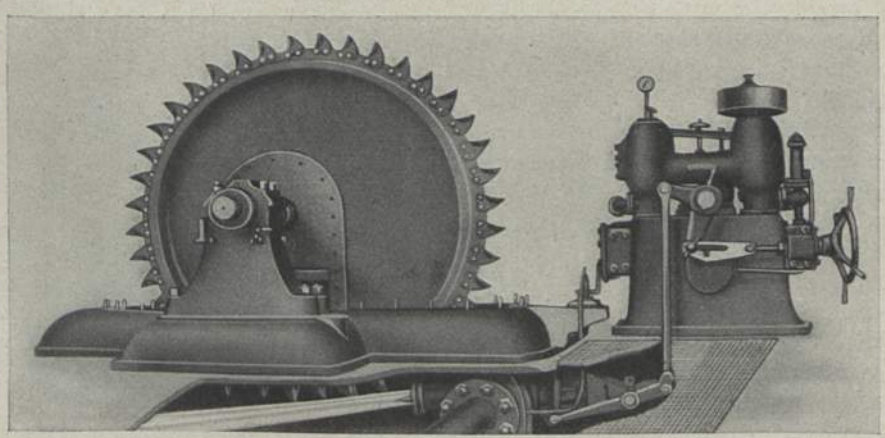
Weiter unten im Oberkanal befindet sich eine Schutzvorrichtung für die Turbinen. Von einem Ufer des Einlaufkanals zum anderen zieht sich querüber der Grobrechen, der meist aus schräg gestellten, in Abständen von 30 bis 50 Zentimetern angeordneten Eisenschienen besteht. Dieser Rechen hat die Aufgabe, große Gegenstände, die im Fluß schwimmen, im Sommer besonders Treibholz, im Winter die Eisschollen, an dem weiteren Lauf durch den Werkkanal zu hindern.

Kurz vor der Mündung in das Krafthaus erweitert sich bei großen Anlagen der Kanal beckenartig, damit die im Wasser schwimmenden Sinkstoffe sich infolge der verringerten Fließgeschwindigkeit absetzen können, und damit bei plötzlich eintretender Höchstbeanspruchung der Turbinen sicher genügend Aufschlagwasser zur Verfügung ist (Bild 4—6, Tafel X).

Ein seitlich angebrachtes Schütz (Bild 244) gestattet, das Wasser aus dem Werkkanal unter Umgehung der Turbinen durch den Leerschuß in den Unterwassergraben abfließen zu lassen, wenn die Anlage stillgesetzt ist. Bei nicht unbeträchtlichen Fallhöhen an dieser Stelle läßt man das Wasser nicht glatt zu Tal stürzen, sondern sieht einen Energievernichter in Form von Tosbecken vor oder bildet den Boden des Leergerinnes treppenförmig aus. In der Kaskade wird die Gewalt des abstürzenden Wassers gedämpft. Wenn im Winter viel Eis abgeführt werden muß, wird oft noch ein besonderer Eisschuß angebracht, dessen Boden glatt gehalten ist.

Der Grobrechen hält kleinere schwimmende Gegenstände, die den Fluß hinabtreiben, nicht zurück. Bewachsene Uferteile, die sich losgelöst haben, Pflanzen, Zweige, im Herbst große Mengen von Blättern, gelangen in den Oberwassergraben, und sie würden beim Eindringen in die Leitkanäle der Turbinen Betriebsstörungen verursachen. Deshalb ist der Einlauf ins Kraftwerk durch den Feinrechen geschützt, ein Gerüst aus hochkant gestellten Flacheisen, die in schmalen Zwischenräumen (Bild 244 und 245) aneinandergereiht sind.

Dieser Feinrechen setzt sich oft zu, und die Verstopfungen müssen durch häufiges Arbeiten mit Kratzen und Harken beseitigt werden. Bei größeren Anlagen genügt menschliche Tätigkeit hierfür nicht, es wird alsdann eine Rechenputzmaschine aufgestellt. Ein kräftiger Auslegerarm, der an einem parallel zum Rechen verfahrbaren Krangerüst angebracht ist, trägt an seinem Ende einen Kamm mit starken Blechzinken. Dieser Kamm wird von unten nach oben über den Rechen gezogen und macht die Zwischenräume immer wieder frei.



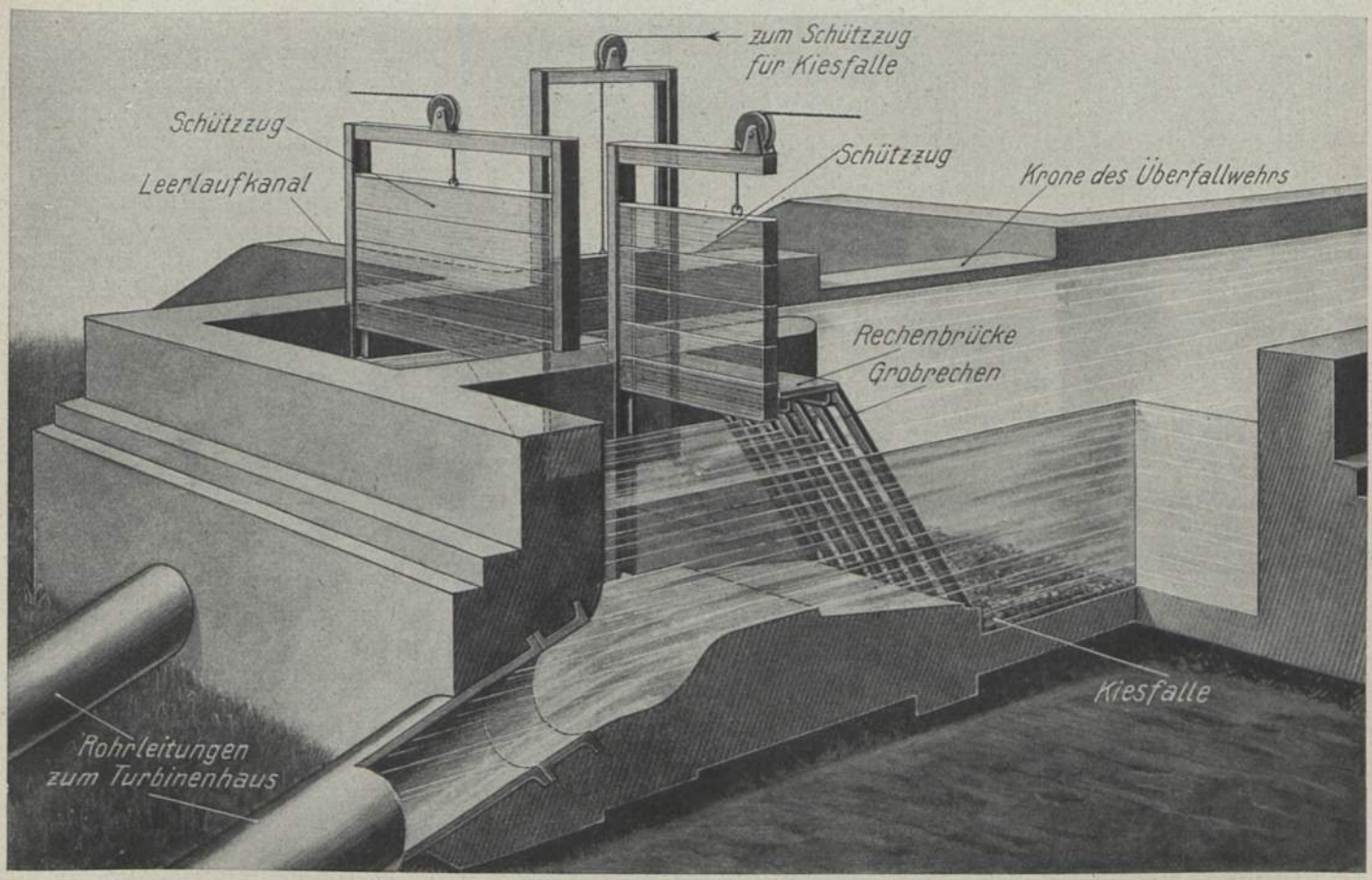
242. Pelton-Rad mit Schwenkdüse
Aus Leo Galland, Die Wasserkräfte in der Natur. M. Krayn Verlag, Berlin

Bei hohen Gefällen ist die Anlage eines offenen Werkkanals nicht mehr möglich, weil dessen Schaffung sehr kostspielige Erd-

arbeiten notwendig machen würde. Man läßt das Wasser jetzt in geschlossenen eisernen Rohren von der Höhe zum Krafthaus niedergehen. Der oberen Rohrmündung ist ein Sammelbehälter vorgeschaltet, der den eigenartigen, bereits erwähnten Namen Wasserschloß führt. Die Bezeichnung kommt schon bei Vitruv vor; er nennt den Sammler, der sich in jeder der großen römischen Wasserleitungen befand, castellum, das ist Schloß.

Das Wasserschloß ist die wichtigste Sicherheits- und Regeleinrichtung der Hauptgefällanlagen, und es hat daher eine vielgestaltige Ausrüstung. Diese ist grundsätzlich auf Bild 243 dargestellt.

Dort, wo das frei herangeleitete Wasser in den aus Steinen oder Beton hergestellten Behälter einläuft, steht, falls nötig, noch einmal ein Grobrechen. Dahinter ist ein Schützzug




243. Einrichtung des Wasserschlosses

aus hölzernen oder eisernen Tafeln angebracht, die den ganzen Querschnitt absperren können. Die Schütze werden hinuntergelassen, wenn drunten im Krafthaus kein Aufschlagwasser gebraucht wird. Damit in solchem Fall nicht eine Überschwemmung vor dem Wasserschloß oder eine schädliche Stauung im vorliegenden Wasserlauf eintritt, ist seitlich ein Überfall- oder Streichwehr angebracht. Wenn das Wasser im Behälter zu einer gewissen Höhe angestiegen ist, dann überflutet es die Krone des Überfallwehrs und geht in einem hierfür vorgesehenen Leerschuß unschädlich zu Tal.

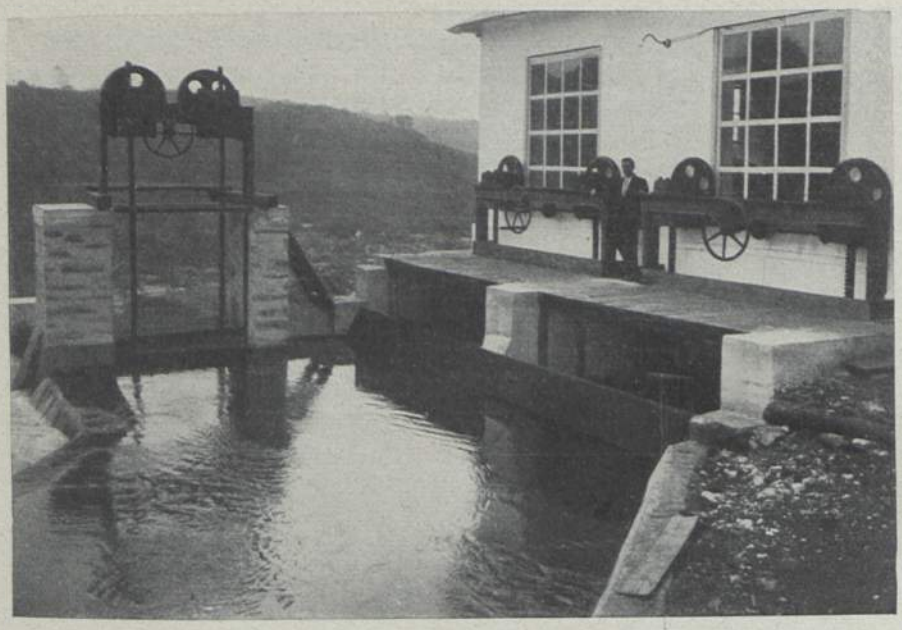
Vor dem Grobrechen ist der Boden des Wasserlaufs vertieft. Man nennt diese Stufe die Kiesfalle oder Kiesschwelle, weil sie die Aufgabe hat, das anschwimmende Geröll vom Eindringen in die Rohre abzuhalten. Ein Schütz, das neben dem Überfallwehr angebracht ist und dessen Öffnung bei hochgezogener Verschlußplatte bis zur Sohle hinunterreicht, wird von Zeit zu Zeit geöffnet, damit das jetzt in den Leerlaufkanal stürzende Wasser das in der Falle angesammelte Geröll fortschwemmt.

Die Ausbildung und Anordnung der einzelnen Teile des Wasserschlosses richtet sich in jedem einzelnen Falle nach den jeweils vorliegenden Verhältnissen. So kann z. B. die Kiesfalle bereits bei dem Einlaufbauwerk oder Sperrwehr (Bild 3, Tafel X) zum Oberwerkkanal vorgesehen sein.

Bild 246 zeigt das Einlaufbauwerk des Walchenseewerkes, welches den 1200 Meter langen Stollen abschließt, der den See mit dem Wasserschloß verbindet. Die vorerwähnte Kiesfalle kommt hier ganz in Fortfall.

Das Wasserschloß des Walchensees ist in Bild 1, Tafel X, dargestellt. Der gewaltige Bau vermag 10 000 Kubikmeter Wasser zu fassen. Sein vorderes Mauerwerk ist 24,5 Meter hoch und hat eine Fundamentbreite von 16 Metern bei einer Kronenbreite von 5 Metern. Bild 247 gewährt einen Blick in das Innere mit den Einlauföffnungen der 6 mächtigen Wasserrohre, die trichterförmig in die vordere Abschlußwand des Wasserschlosses eingesetzt sind. Wenn die niederzuführende Wassermenge gering ist, wird sie durch ein einziges Rohr geleitet. Bei sehr großen Anlagen mit vielen Turbinen wird aber für jede der Maschinen ein besonderes Rohr niedergeführt.

Die Druckrohre, aus mächtigen Einzelstücken zusammengesetzt, werden fast stets aus Schmiedeeisen oder Stahl hergestellt. Damit die langen Züge sich bei Sonnenbestrahlung ohne Verwerfen dehnen können, werden federnde Zwischenstücke eingefügt oder Stopfbüchsen vorgesehen, in denen das innere Rohr Bewegungen in axialer Richtung machen kann. Wenn Felsen oder höhere Bergrücken sich der Niederführung



244. Oberwassergraben vor dem Krafthaus mit Leerschütz
Aus Leo Galland, Die Wasserkräfte in der Natur

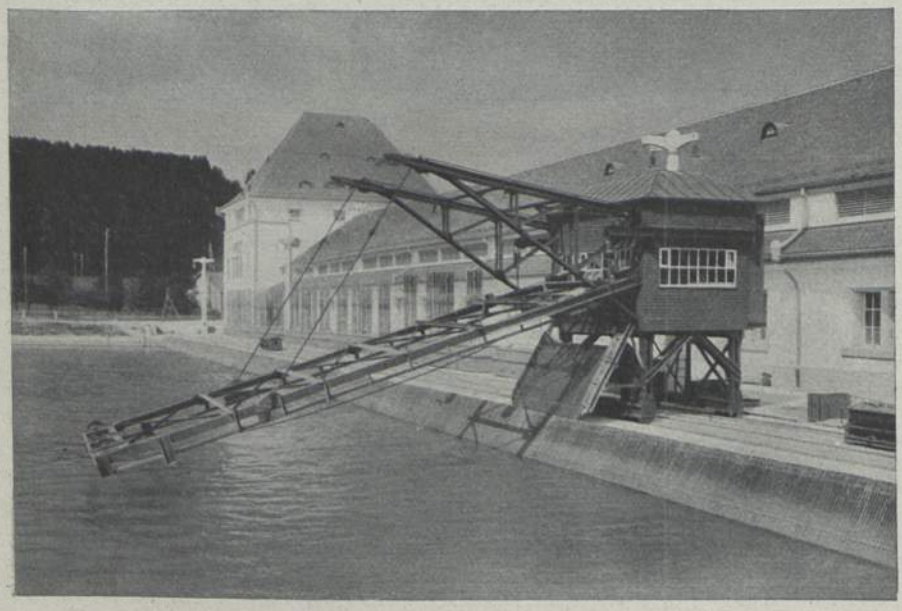
entgegenstellen, werden sie durchbohrt. Die so entstehenden Stollen sind alsdann Teile der Rohrleitung; bei durchlässigem Boden müssen sie abgedichtet werden. Füllt das Wasser den Stollenquerschnitt vollständig aus, so spricht man von Druckstollen, weil die Wände unter der Pressung des oberen Gefälleteils stehen; läuft nur ein Teil des Querschnitts voll, dann heißt der Durchlaß Freispiegelstollen. Die Druckrohre werden ebenso wie die Werkkanäle über Spalten oder Straßen auf Brücken hinweggeführt.

Wenn mehrere Turbinen aus der gleichen Rohrleitung zu versorgen sind, so wird diese unmittelbar vor dem Sockel des Krafthauses in eine genügende Zahl von Einzelleitungen aufgelöst (Bild 248). Jede von ihnen kann durch einen Schieber abgeschlossen werden. Auch bei Wasserzuführung im offenen Kanal findet zuletzt eine Spaltung des Wassers in mehrere Einläufe statt, weil jede Turbine in einem gesonderten Schacht steht.

Die Druckrohre münden in die geschlossenen Kessel- oder Spiralgehäuse, die offenen Einläufe ergießen sich in die gleichfalls offenen Wasserkasten. Die Krafthäuser sind oft sehr stattliche Bauten, deren Architektur heute glücklicherweise meist sorgsam in das Landschaftsbild eingepaßt wird. Es gibt Wasserkraftwerke, in denen mehr als 20 große Turbinen laufen. Bild 249 und 250 zeigen ein derartiges Krafthaus, sowohl vom Oberwerkkanal wie vom Unterwerkkanal aus gesehen.

Wenn das Wasser den Maschinen in seiner natürlichen Fassung dauernd in genügender Fülle zuströmt, so nennt man die Anlage ein Laufwerk. Die großen Kraftwerke in Rhein, Main, Donau gehören zu dieser Gattung. Oft ist es aber notwendig, einen Behälter vorzusehen, in dem ein Teil des Beaufschlagungswassers zu Zeiten, in denen es reichlich vorhanden ist, zurückgehalten wird, damit es in armen Perioden ausgelassen werden kann und während dieser die Fortsetzung des Betriebs ermöglicht. Viele solcher Speicherwerke besitzen kleine Behälter, die nur dem Tagesausgleich dienen, das heißt, überschüssiges Wasser für einige Stunden bewahren, damit es in den Zeiten der Höchstbelastung zusätzlich verwendet werden kann, andere haben riesige Jahresausgleichbecken. In diesen werden, allermeist hinter Staumauern, die nicht sogleich verwendeten Wasser gesammelt, die in manchen Monaten überreichlich anfallen; in den armen Jahreszeiten tritt alsdann niemals ein Wassermangel ein.

Neuerdings werden auch immer häufiger Hochbecken gebaut, große, auf Bergrücken liegende Stauanlagen, deren Fassungsraum nur zum Teil durch einen Fluß oder Bach gefüllt werden kann oder überhaupt keinen natürlichen Zulauf besitzt. Das zugehörige, im Tal liegende Kraftwerk, das dauernd beträchtliche Mengen Beaufschlagungswasser zur Verfügung hat, aber in manchen Stunden, namentlich während der Nacht, nur wenig belastet ist, pumpt in solchen Zeiten Wasser zu dem Hochbecken hinauf, so daß dieses immer reichlich gefüllt ist. Wenn die kurzdauernde Höchstbelastung des Kraftwerks eintritt, liefert alsdann das Hochbecken die nun erforderlichen zusätzlichen Beaufschlagungsmengen. Beispiele für die verschiedenen Arten von Speicherwerken werden im folgenden noch gegeben werden.



245. Oberwasserseite des Turbinenhauses mit Feinrechen und Rechenputzmaschine
Aus Leo Galland, Die Wasserkräfte in der Natur

*

Es möge nun noch eine Gattung der Wasserkraftmaschinen Erwähnung finden, die eine von den bisher behandelten beiden Arten grundverschiedene Gestalt und Arbeitsweise hat. Diese Maschine ist heute nur noch ganz vereinzelt im Gebrauch, sie gehört einem vergangenen Zeitalter der Technik an. Nur in einer Zeit, als die Materialbeherrschung noch nicht so weit herangereift war, daß man Turbinen zu bauen vermochte, konnte ein Apparat zur Nutzung der Wasserkraft entstehen, in dem nicht drehende, sondern hin und her gehende Bewegung erzeugt wird.

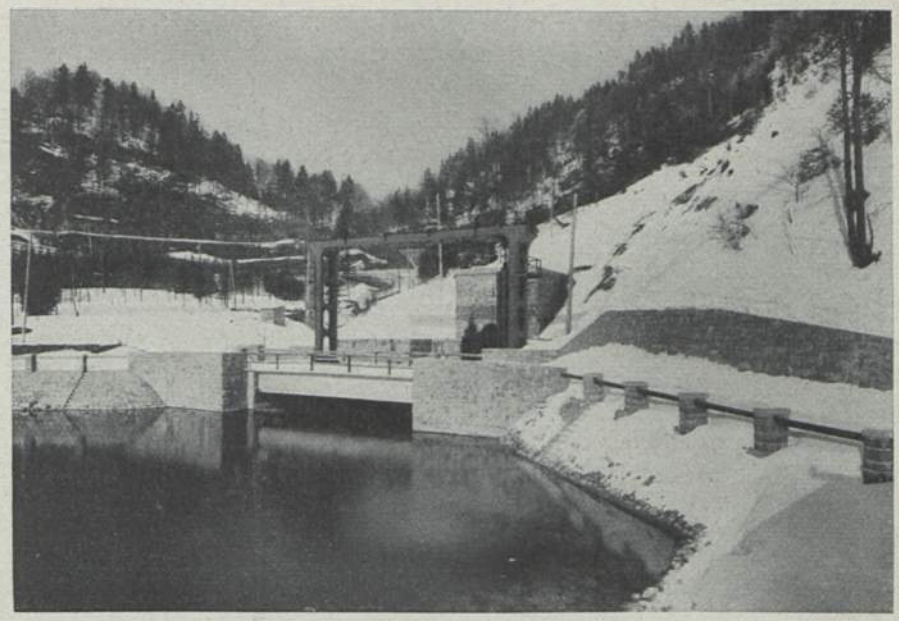
Als die Dampfmaschine gegen Ende des achtzehnten Jahrhunderts ihren Vormarsch begann, tauchte der Gedanke auf, daß man die Energie hoher Gefälle mittels Zylinder und Kolben besser nutzen könne als in den schwerfälligen Wasserrädern. Tatsächlich ist es möglich, einen Kolben mittels Druckwassers ebenso hin und her zu schieben wie durch Dampfpressung.

Wir sehen auf Bild 251 einen Zylinder mit Kolben. Durch einen Drehschieber kann bewirkt werden, daß das Druckrohr entweder mit dem oberen oder mit dem unteren Zylinderteil verbunden ist, während die Abwasserleitung gleichzeitig entsprechend umgeschaltet wird. Bei dem ersten Teilbild tritt das Druckwasser oben ein und schiebt den Kolben hinab, während das darunter befindliche Wasser hinausgedrängt wird. Sobald der Kolben unten angelangt ist, hat er den Drehschieber mittels eines Gestänges so umgeschaltet, daß nun der im zweiten Teilbild dargestellte Zustand eingetreten ist. Jetzt preßt das Druckwasser den Kolben empor. Er läuft also ständig hin und her, und die Kolbenstange vermag unmittelbar ein Pumpwerk oder mittels Kurbel irgendeine andere Maschine zu betreiben.

Da bei diesen Vorrichtungen der Druck einer darüber stehenden Wassersäule ausgenutzt wird, nennt man sie Wassersäulen-Maschinen. Sie haben zuerst in ungarischen, dann in sächsischen Bergwerken und in den Gruben des Harzes gute Dienste geleistet, als zur Beseitigung der Grubenwasser die Dampfmaschine noch nicht zur Verfügung stand. Da die Vorrichtungen zur besseren Ausnutzung des Gefälles unten auf der Sohle aufgestellt wurden, machte sich eine Sonderfähigkeit angenehm bemerkbar, welche die Wassersäulen-Maschinen vor allen Wärme-Kraftmaschinen voraushaben. Sie arbeiten nämlich ruhig weiter, auch wenn das Gehäuse vollständig von Wasser überdeckt ist. Bei Wassereinbrüchen in die Stollen, die damals, als man die Eingeweide der Erde noch nicht genügend kannte, besonders häufig waren, pumpten sie daher lustig fort.

Dennoch wurden die Anlagen dieser Art sehr geschwind von der Dampfmaschine verdrängt, als diese einen höheren Grad der Ausbildung erlangt hatte. Denn die Wassersäulen-Maschinen können nur sehr langsam laufen, in großen Ausführungen nicht mehr als 4 bis 5 Hübe in der Minute ausführen. Wasser ist ja fast vollkommen unelastisch und sehr schwer. Deshalb darf die Umkehrung der Kolbenbewegungen nur allmählich eintreten, wenn die Rohre nicht durch wuchtige Wasserschläge zersprengt werden sollen.

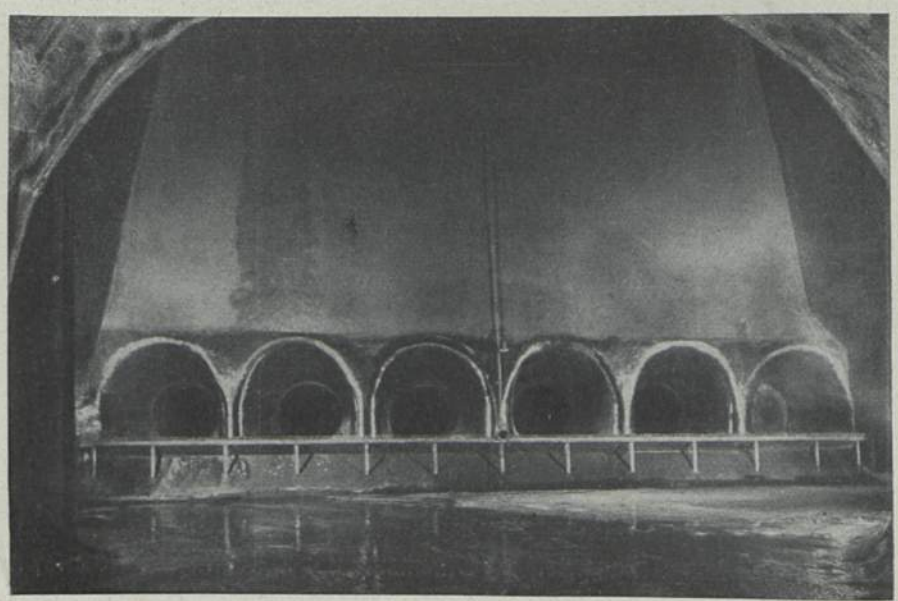
Um die Ausbildung der Wassersäulen-Maschine hat sich der bayerische Salinenrat Georg von Reichenbach große Verdienste erworben, der auch andere Gebiete des Maschinenbaus seiner Zeit in sehr beachtenswerter Weise förderte. Er schuf im Jahre 1808 mehrere Pumpanlagen, um Salzsole von Berchtesgaden aus über einen Bergrücken von 100 Metern Höhe, das Söldenköpfl, nach Reichenhall und weiter nach Rosenheim



246. Einlaufbauwerk des Walchensee-Werks bei Urfeld

am Inn zu befördern, das 108 Kilometer entfernt ist. Die größte der hierfür erbauten Wassersäulen-Maschinen (Bild 252) und die mit ihr baulich vereinigte Pumpe arbeitet noch heute in einem hölzernen Häuschen zu Ilsank, einem Dörfchen bei Berchtesgaden, in der ursprünglichen Weise. Nur wenige Male hat während der vielen Jahrzehnte der Betrieb zur Vornahme von Ausbesserungsarbeiten unterbrochen werden müssen, gewiß ein hervorragendes Zeugnis für die treffliche Bauart dieser sehr ansehnlich aus Bronze gefertigten Anlage.

In jener Zeit war der Waldbestand in der Nähe von Berchtesgaden arg gemindert, weil man sehr viel Holz verbraucht hatte, um durch Sieden der Sole, die durch Auslaugen des Gesteins in dem berühmten Salzberg gewonnen worden war, Salz zu erzeugen. Man mußte sich nach einem anderen Brennstoff zur Beheizung der Sudpfannen umsehen und fand das Begehrte erst in beträchtlicher Entfernung, nämlich in den Torfmooren bei Rosenheim. Die Salzgewinnung wäre aber zu teuer geworden, wenn man den



247. Rohreinlauf im Wasserschloß des Walchensee-Werks

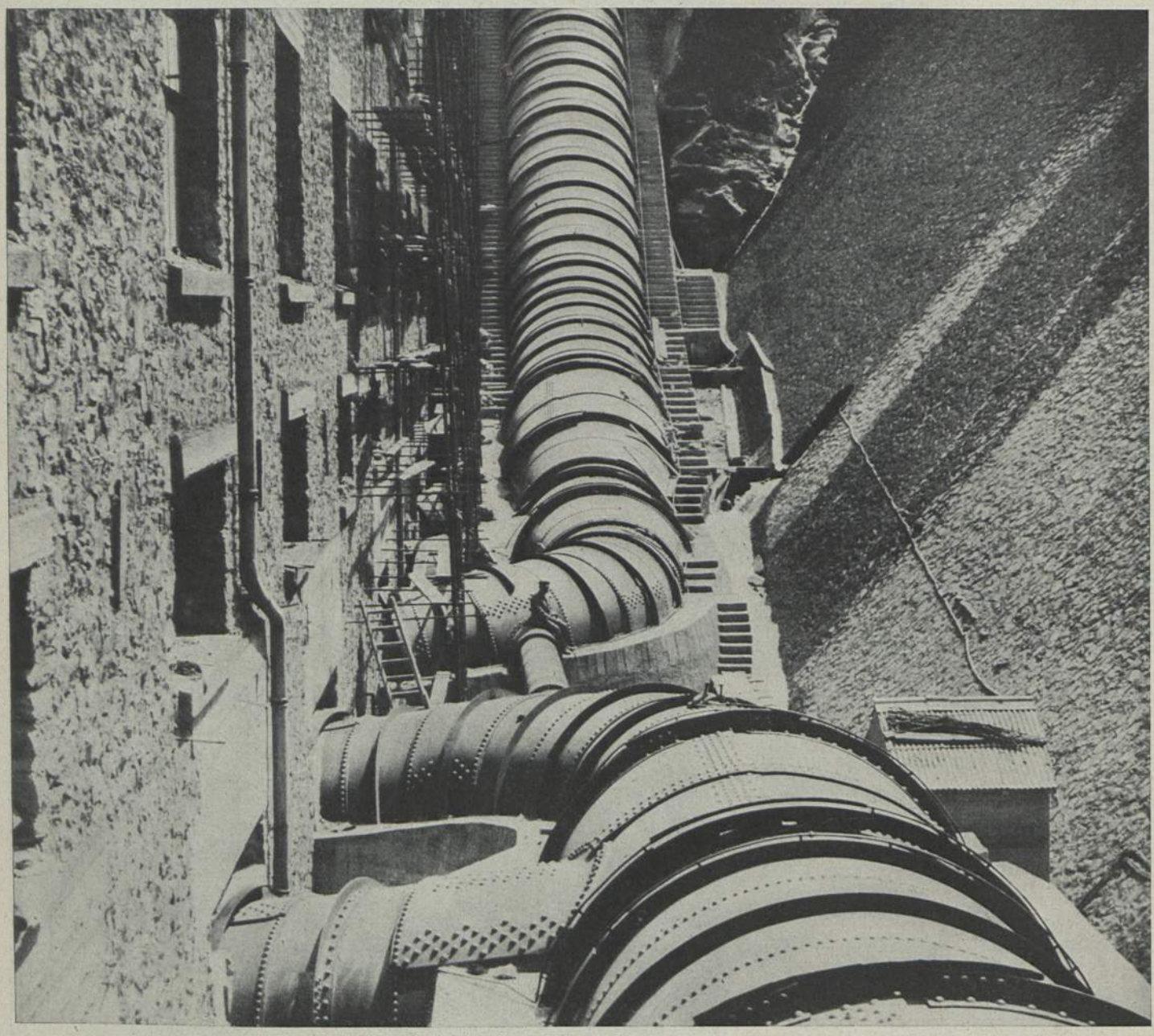
Torf mit Pferdegespannen — denn eine Eisenbahn gab es damals ja noch nicht — bis nach Berchtesgaden hätte schaffen müssen.

Da wurde beschlossen, nicht den Brennstoff zur Sole, sondern diese zum Brennstoff zu bringen. Reichenbach übernahm es, eine Sole-Leitung, eine Rohrführung über die ganze Strecke quer durch das Gebirge, herzustellen. Sie mußte Reichenhall berühren, um auch natürliche Sole aufzunehmen, die dort aus den Felsen quillt. Der kunstreiche Mann hat die Aufgabe in hervorragender Weise gelöst. Die Anlage galt lange Zeit als ein bewunderungswürdiges technisches Meisterwerk, und es gibt auch noch heute nur wenige Anlagen ihresgleichen.

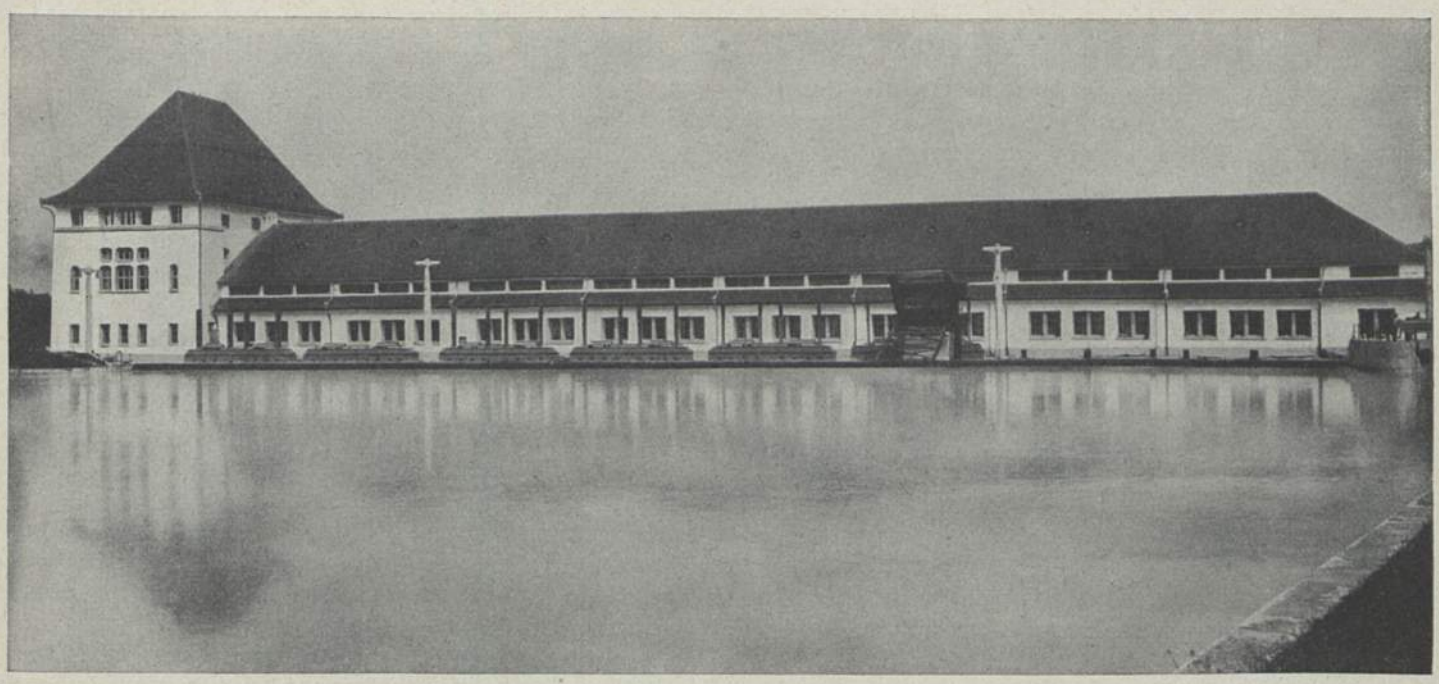
Die Wassersäulen-Maschinen sind auch als Kleinmotoren in gewerbfleißigen Städten verwendet worden, die eine Hochdruckwasserleitung besaßen. Die Bedachtsamkeit ihrer Bewegungen wurde aber schon immer als unangenehm empfunden, und in die heutige Zeit des Schnellbetriebs passen sie gar nicht mehr hinein. Ihre Anwendung wäre auch zu teuer wegen des beträchtlichen Entgelts, der für die Entnahme großer Wassermengen aus den Hochdruckleitungen entrichtet werden müßte. Die Klein-Antriebsmaschine der jetzigen Zeit, der Elektromotor, arbeitet billiger und mit jeder gewünschten Geschwindigkeit.

*

Die Talsperren sind technische Einrichtungen von schönster Einfachheit des Grundgedankens. Eine natürliche Senkung, die beiderseits von genügend hohen Hängen eingefaßt ist, möglichst ein Tal, das einen engen Ausgang hat, wird verschlossen, so daß alles, was darein rinnt und fließt,



248. Verteilungsleitung zwischen Staumauer und Turbinenhaus des Kraftwerks von Eguzon an der Creuse in Frankreich
Zwei Rohrleitungen mit einem lichten Durchmesser von 5 Metern führen das Wasser des 54 Millionen Kubikmeter fassenden Stausees den vier je 15 000 Pferdestärken leistenden Turbinen zu



249. Turbinenhaus vom Oberwassergraben aus gesehen, mit Rechen und Einlaufschützen
Aus Leo Galland, Die Wasserkräfte in der Natur

gefangen ist. Hinter dem Verschluß, im Staubecken, bildet sich ein Stauweiher oder Stausee, dessen angesammelte Wassermenge nach Belieben zurückgehalten oder ausgelassen werden kann.

Nicht selten wird auch ein natürliches Seebecken für das Stauen benutzt, indem man ihm das Wasser benachbarter Bäche oder Flüsse zuleitet, die bisher nicht darein mündeten. In beiden Fällen wird aus den Wasserläufen des Einzuggebiets, deren Spiegelhöhe sehr stark zu schwanken pflegt, eine ständig gleichbleibende Wassermenge gewonnen. Zugleich ist das Gefälle stark gesteigert, der Talverschluß bildet die Schwelle eines neuen Wasserfalls. Freilich sieht man diesen bei regelmäßigem Betrieb nicht schäumend und wirbelnd über den oberen Rand der Schwelle hinunterstürzen, sein Energie-Inhalt wird in technisch günstigerer Art durch am Fuße der Staumauer liegende Ausläße genutzt.

Die Talsperren dienen 5 verschiedenen Zwecken:

1. Der Trinkwasserversorgung.
2. Der Bewässerung.
3. Dem Hochwasserschutz.
4. Der Speisung von Schiffahrtstraßen.
5. Der Erzeugung von Kraftwasser.

Mit den Wirkungen 3 und 4 ist meist auch die Wirkung 5 verbunden.

Orte, die auf der Höhe oder in einem Gebiet liegen, das sehr eng bebaut ist, wie insbesondere die großen Industriebezirke, können oft nicht genügend Grundwasser für Trinkzwecke gewinnen. Befindet sich kein Fluß in der Nähe,

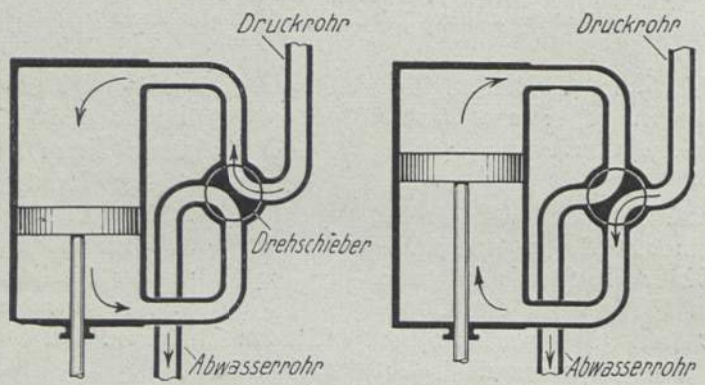
250. Turbinenhaus von der Unterwasserseite aus gesehen
Aus Leo Galland, Die Wasserkräfte in der Natur. M. Krayn Verlag, Berlin

der das ganze Jahr hindurch eine ausreichende Wasserfülle hat, dann muß in einem geeigneten Tal eine Stauung vorgenommen, ein See geschaffen werden, der als Sammelbehälter dient. Selbstverständlich kann das im See gestaute Oberflächenwasser erst nach genügender Reinigung für Trinkzwecke verwendet werden.

Acker mit gutem Fruchtboden vermögen kein entsprechendes Erträgnis zu liefern, wenn sie nicht in den Wachstumzeiten der Pflanzen ausreichend bewässert werden. Besonders in den warmen Ländern ist eine kräftige künstliche Bewässerung oft unbedingtes Erfordernis für das Heranreifen der Früchte. Ist der Lieferer des Wassers ein Fluß, der gerade in den wichtigsten Zeiten sehr flach geht, so muß eine Speicherung helfen.

Von kahlen unbewaldeten Hängen stürzt das Wasser zur Zeit der Schneeschmelze oder nach starken Regengüssen oft so heftig zu Tal, daß weite Gebiete überschwemmt werden. Die sehr großen Schäden, die das frei abgehende Hochwasser anrichten kann, verschwinden, wenn man die Fluten an geeigneter Stelle durch eine Abdämmung zurückhält.

Bereits in Abschnitt 15 (Bd. III) wurde darauf hingewiesen, daß die Speisung der großen, heute zur Verbindung von Stromsystemen geschaffenen Schiffahrtkanäle oft Schwierigkeiten macht, weil die Stammflüsse nicht immer genügend Wasser führen, um auch den neuen Lauf mitversorgen zu können. Man greift dann zu dem Hilfsmittel, in nicht zu großer Entfernung von dem neuen Kanal eine Talsperre in einem Nebenfluß anzulegen und das in ihrem Becken gewonnene Wasser der Schiffahrtstraße zuzuführen.




251. Wirkungsweise einer Wassersäulenmaschine

Eine Sperre für Kraftwassergewinnung ist eigentlich jedes Wehr, das quer über einen Bach oder Fluß gelegt wird, damit sein Wasser in den Werkkanal einläuft. Die künstlichen Staubecken für Kraftwasser-Gewinnung sind Wehre mit dahinterliegendem Behälter, und die Sperren dieser Art sorgen weit gründlicher als die einfachen Wehre dafür, daß die Turbinen zu jeder Zeit genügend Aufschlagwasser haben. Man braucht zur Versorgung der Maschinen jetzt nicht mehr einen breiten wasserreichen Strom, sondern kann auch bescheidene Wasserläufe nutzen. Es ist selbstverständlich, daß der Inhalt von Hochwasser-Schutzbecken zur Kraftgewinnung herangezogen wird, da ja durch sie eine nutzbare Gefällstufe gewonnen ist. Die Wirtschaftlichkeit von Kanalspeisebecken wird verbessert, wenn ein Turbinenhaus zu ihren Füßen angeordnet ist.

Die Verschlüsse an den Talausgängen werden als Erddämme oder durch Aufführen mächtiger Mauern hergestellt. Die Hauptmasse der Erddämme, welche in dieser Ausführung (Bild 253) als veraltet anzusehen sind, besteht aus Sand, der Rücken der Schüttung aber, der dem See am nächsten ist, wird in breiter Lage aus Lehm oder einem anderen undurchlässigen Stoff hergestellt, da die Sperre selbstverständlich wasserdicht sein muß. Der Sand wird durch Walzen möglichst dicht gemacht. Der Damm ist nach beiden Seiten hin geböscht. Auf der Wasserseite, wo der Abstieg sehr sanft zu sein pflegt, wird die Böschung mit Beton oder mit Steinplatten belegt, um Zerstörungen durch das Wasser zu verhindern. Jenseits legt man Mutterboden auf, damit die Bepflanzung den Abhang verfestigt, ihn vor Rutschungen und Rissen bewahrt.

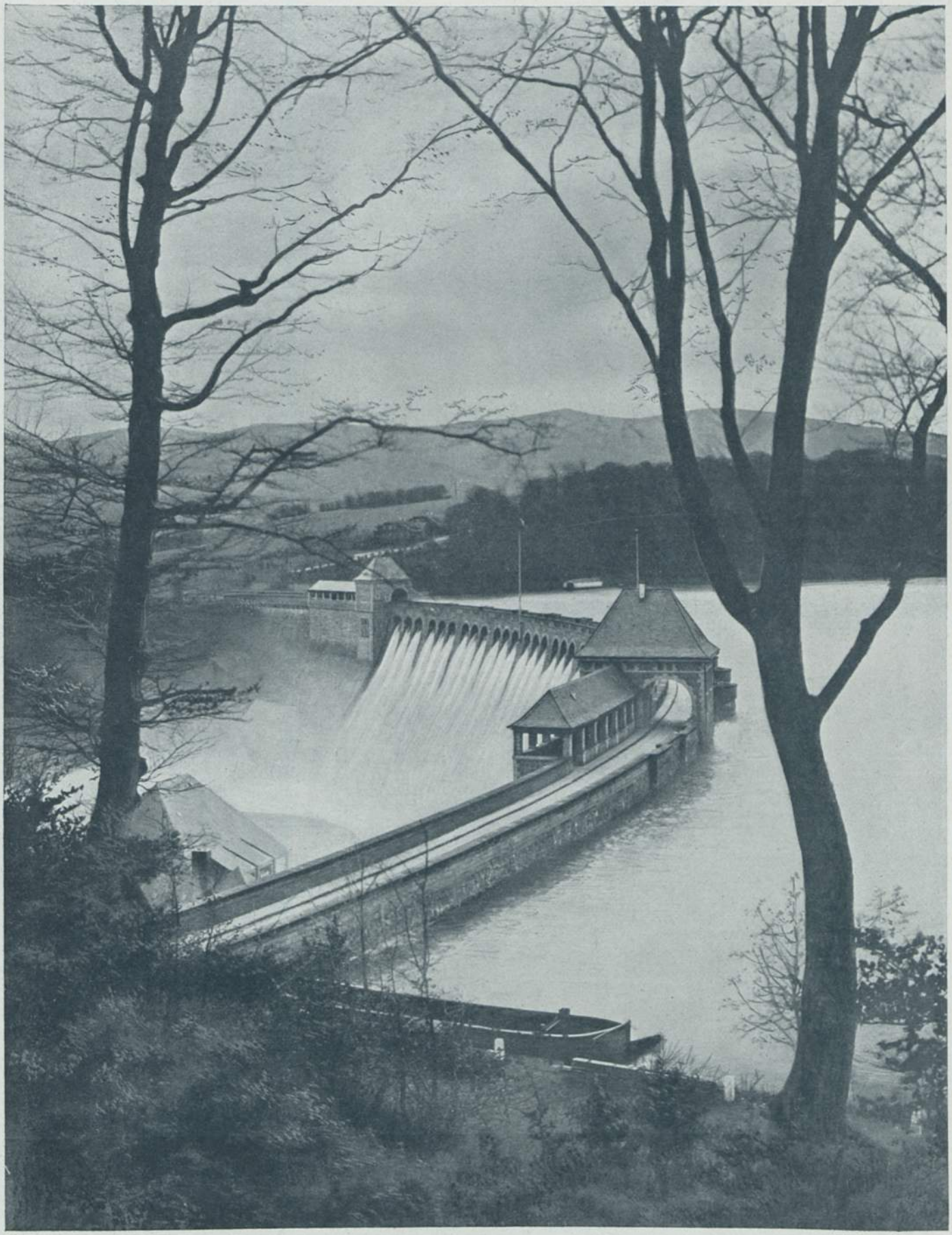
Die Sperrmauern sind die Zyklopen unter den neuzeitlichen Bauwerken, denn sie haben ungeheure Drücke bei einseitiger Belastung auszuhalten. Sie werden entweder geradlinig oder bogenförmig ausgebildet. Ihre Dicke wächst nach unten zu, weil ja der Druck der auflastenden Wassermenge nach unten stets größer wird (Bild 254). Die Wölbung des Bogens ist der Wasserseite zugekehrt, damit ein Teil des Drucks auf die Stirnseite in seitlichen Schub verwandelt wird.

Als Baustoffe verwendet man meist Bruchsteine, das sind unregelmäßige Stücke, wie sie beim Abbau des Steinbruchs mit der Hacke gewonnen werden, oder mächtige Quadern, nur bei sehr kleinen Sperren Ziegelsteine. Die einzelnen Stücke werden durch vorzüglichen Mörtel zu einem einheitlichen Ganzen vereinigt. Beton mit Eiseneinlagen oder mit eingebetteten Bruchsteinen findet in der letzten Zeit immer häufiger Verwendung. Die Bauwerke aus diesem Stoff werden an der Wasserseite durch Aufkleben mehrerer Schichten von Asphaltpappe, die mit einer äußersten Betonschicht zugedeckt werden, sehr sorgfältig gedichtet, da Beton ja Wasser durchläßt. Die meisten der bis jetzt errichteten deutschen Sperren sind Mauern aus Bruchstein; es wird bei uns der gewölbte Bau bevorzugt.

Der Boden, auf den die Mauer gestellt werden soll, muß sorgfältig daraufhin untersucht werden, ob er genügend Tragfähigkeit besitzt. Gleichzeitig ist zu prüfen, ob die Hänge, an welche die Mauer rechts und links anschließt, die seitlichen Höchstdrücke vertragen können. Sämtliche Anschlüsse müssen für alle Zukunft unverrückbar feststehen und vollkommen dicht sein.

Die Mauer wird noch etwa 1 bis 2 Meter über den höchsten Stau hinaufgeführt, damit der Rand bei starkem Sturm nicht von Wellen überschlagen werden kann. Die Krone ist meist geglättet und als Fuß- oder Fahrweg ausgebildet. Manche der deutschen Sperrmauern haben eine Kronenbreite von 6 oder 8 Metern, während die Querschnittlänge am Fuß 50 bis 60 Meter, hier und da auch mehr beträgt.

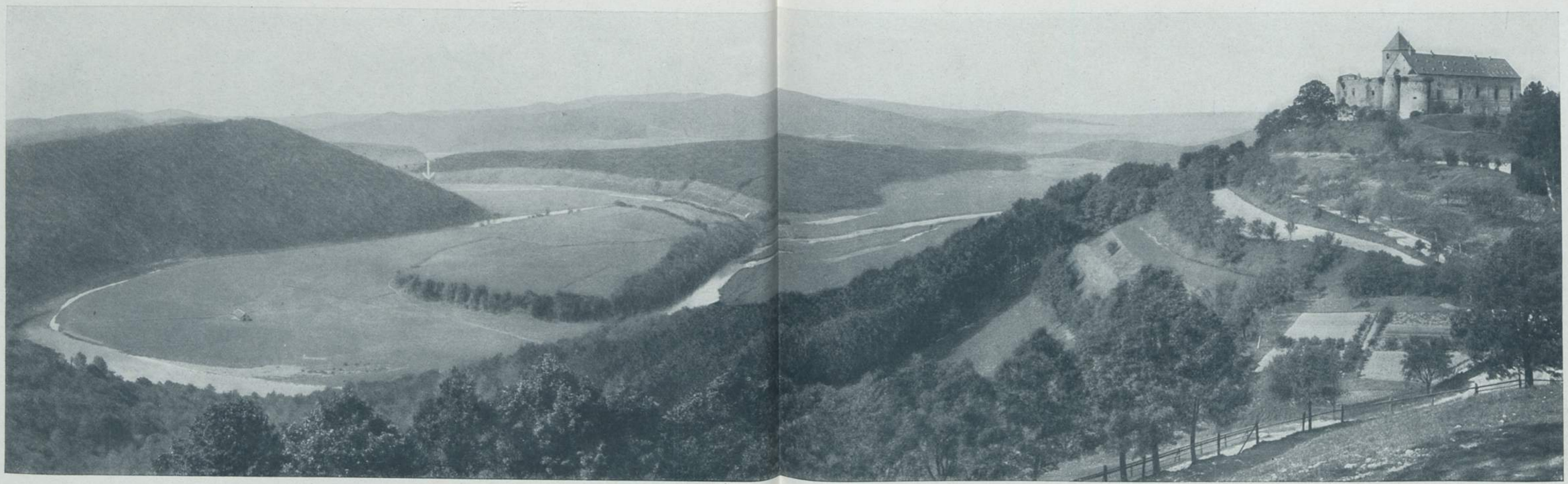
Die Talverschlüsse, obgleich sie manchen lieblichen Winkel unter den Fluten des Stausees begraben, sind, wenigstens in Deutschland, selten Zerstörer des Landschaftsbilds. Oft wird die Schönheit des Tals durch die Überflutung gesteigert. Große Talsperren sind meist das Ziel für die Ausflüge Tausender. Wo früher nur wellige Gefilde sich breiteten, ist jetzt das Blau des Sees der Landschaft als freundlicher Schmuck zugesellt. Die deutschen Architekten haben sich mit Erfolg bemüht, die Mauern anmutig in die Umgebung einzupassen. Ganz einfache Schmuckformen nur werden dem kalten technischen Bauwerk angefügt, dessen Würde sie erhöhen, aber nicht als überreicher Tand hinuntersetzen. Die lange gleichmäßige Erstreckung der Mauer, die sonst ermüdend wirken würde, wird durch baukünstlerische Betonung der



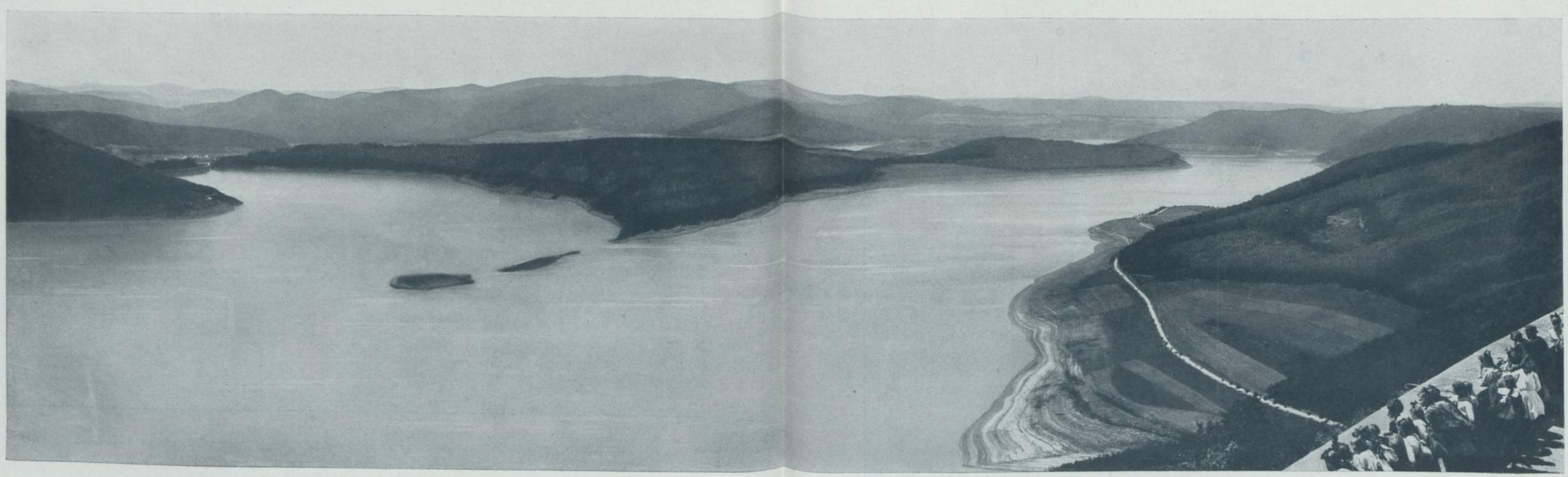
1. Blick auf die Sperrmauer bei Hochwasser
Das überflüssige Wasser strömt durch die unmittelbar unter der Mauerkrone liegenden Notausläße unbehindert ab

Die Edertalsperre bei Hemfurt
Phot. Eberth, Cassel

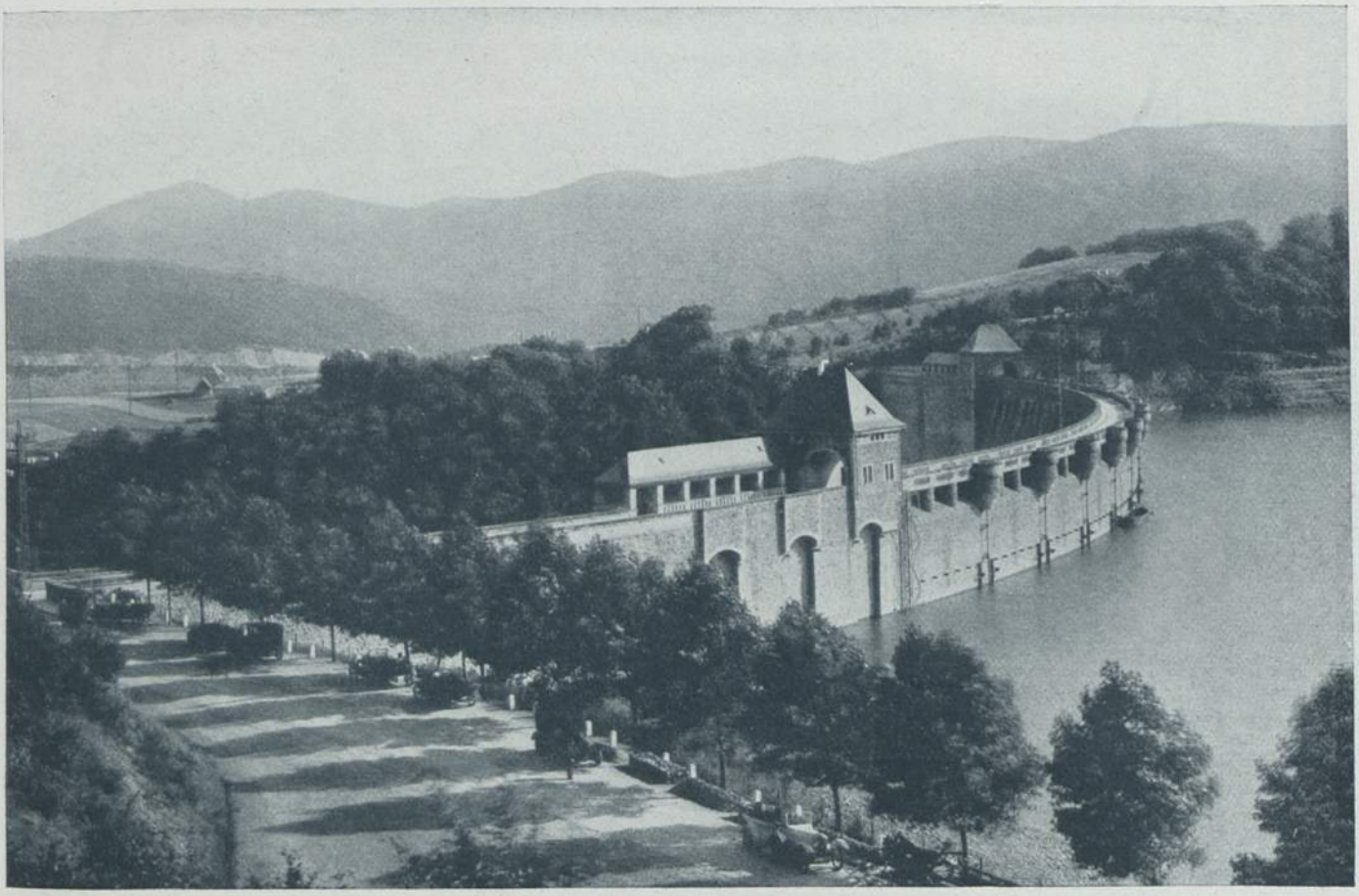
TECHNIK



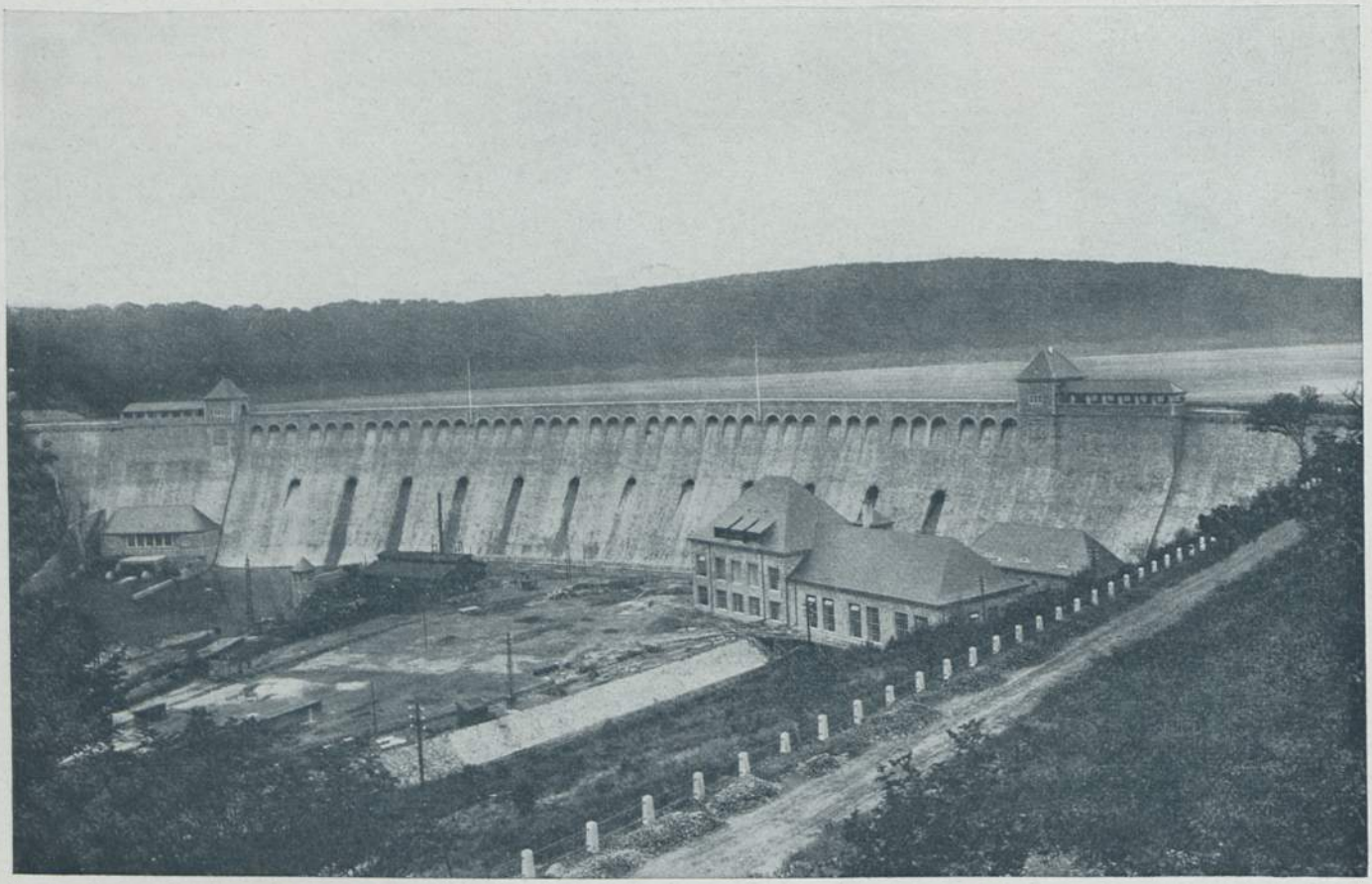
2. Das Tal der Eder mit Schloß Waldeck vor Anlage der Talsperre. Der weiße Pfeil bezeichnet die Stelle, wo die Sperrmauer errichtet wurde



3. Blick von Schloß Waldeck in das durch den Stausee überschwemmte Edertal. Im Hintergrund links: Die Sperrmauer



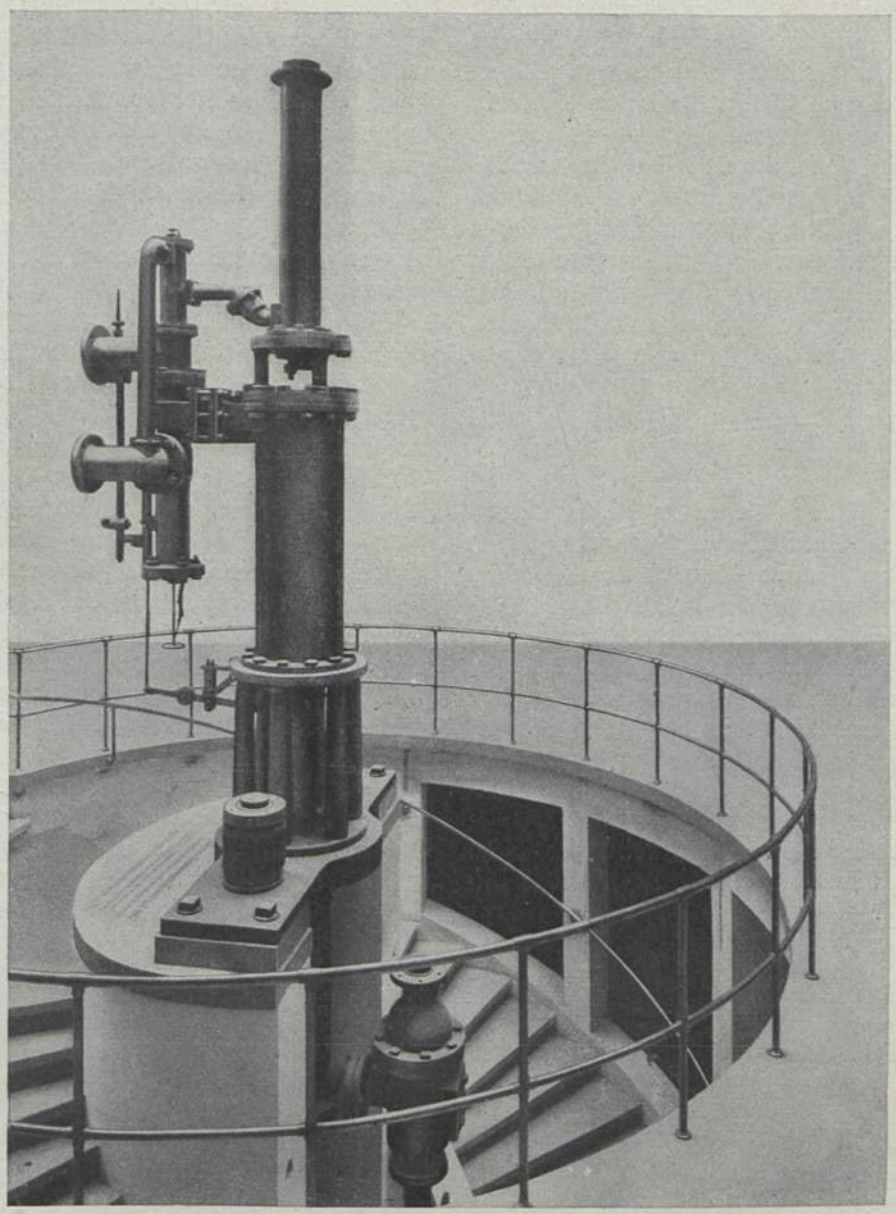
4. Ansicht der Sperrmauer von der Stauseite aus mit den Erkern, die die Bedienungsstellen der Schützen zu den in halber Höhe der Mauer gelegenen Auslässen enthalten



5. Die Sperrmauer von der Talseite aus gesehen. Rechts im Vordergrund: Das Kraftwerk

Bedienungsstellen (Tafel IX, 4) unterbrochen, indem man die Handwinden oder motorischen Einrichtungen zum Bewegen der Auslaßschieber in kleine, hübsch geformte Häuschen legt.

Denn die Mauer kann natürlich nicht ohne Durchlässe sein, wenn das Stauwasser verwendet werden soll, und die Öffnungen müssen nach Belieben verschlossen oder freigemacht werden können. Nicht weit über dem Boden werden Stollen vorgesehen, welche die Mauer quer durchziehen und zur Entnahme des Nutzwassers oder, nach Umschaltung auf den Leerschuß, als Grundabläße dienen. Mit ihrer Hilfe kann das Staubecken in Notfällen, wenn z. B. Risse in der Mauer auftreten, vollständig entleert werden. Da die Standfestigkeit der Mauer durch weite Öffnungen im Sockel geschmälert wird, legt man die Grundabläße auch öfter als Umläufe in die seitlichen Felswände. Vor den Öffnungen sind wasserseitig Schieber der auf Bild 255 dargestellten Form angebracht, die mittels niedergeführter Gestänge von der Krone aus bedient werden können. Das Gestänge verursacht das Heben und Senken einer schweren eisernen Platte innerhalb des Ventilgehäuses; meistenteils wird elektromotorischer Antrieb vorgesehen. Aber auch auf der Luftseite befinden sich meist Verschlüsse der gleichen Art, damit die hoch belasteten Auslaßrohre doppelt bewahrt sind.



252. Modell der Wassersäulenmaschine zu Ilsank bei Berchtesgaden
Deutsches Museum, München

Die gewaltigen Massen der Talsperrmauern bleiben nicht dauernd unverändert. Der Wechsel der Witterung wirkt auf sie ein und ebenso die Veränderung der Belastung durch die häufig sich ändernde Höhe des Stauspiegels. Man möchte sich daher gern häufig von dem Zustand im Inneren überzeugen. Zu diesem Zweck werden Besichtigungsgänge eingebaut, welche die Mauern in ihrer ganzen Längserstreckung und in verschiedenen Höhenlagen durchziehen (Bild 254). Durch Begehungen, die in regelmäßigen Zeitabschnitten erfolgen, kann der Zustand des Mauerwerks dauernd überwacht und jede Beschädigung rechtzeitig entdeckt werden.

Dicht unter der Krone sind Überfälle angebracht, über die allzu große Hochwassermengen frei wegstürzen können. Durch treppenförmige Ausbildung der Mauer (Bild 263) auf der Luftseite wird verhindert, daß die Wassermassen allzu geschwind ablaufen und unten befindlichen Anlagen gefährlich werden. Diese Kaskaden, die in Auffangbecken enden, bieten oft einen sehr reizvollen Anblick. Die Krafthäuser stehen entweder unmittelbar vor der Sperre (Bild 269 und Tafel IX, 5), oder sie sind in einiger Entfernung aufgeführt, wohin das Wasser durch Druckrohre geleitet wird (Bild 278).

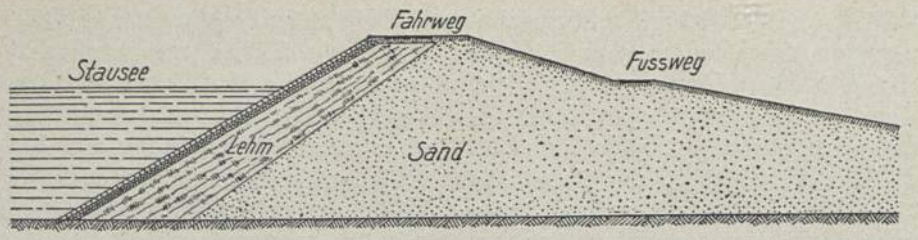
Die Talverschlüsse werden derart berechnet, daß sie noch ein Mehrfaches des zu erwartenden Höchstwasserdrucks bequem aufnehmen können. Man darf wohl sagen, daß Damm- oder Mauerbrüche an neueren, gut gebauten Sperren so unwahrscheinlich wie nur möglich sind. Schwere Konstruktionsfehler aber haben doch schon hier und da eine Sprengung des Verschlusses verursacht, und die Folgen waren stets katastrophal. Denn die ungehemmt austretenden, sehr großen Wassermengen müssen naturgemäß alles fortreißen, was ihnen in den Weg trat.

Über die Zerstörung der Austin-Talsperre in Pennsylvanien in Nordamerika, die am 30. September 1911 eintrat, berichtet das „Handbuch der Ingenieurwissenschaften“:

„Die Wirkung des Durchbruchs war furchtbar. Austin ist ein Platz von etwa 2300 Einwohnern, und der größte Teil des Orts liegt in dem Tal etwa 2½ Kilometer unterhalb des Staubeckens. Nach dem Durchbruch der Sperrmauer legte die Wasserwelle diesen Weg nach Angabe von Augenzeugen in 11 Minuten zurück. Die Flut riß alles nieder mit Ausnahme einiger weniger höher gelegener Gebäude. Außer der Zerstörung an Gütern war auch der Verlust von weit über 100 Menschenleben zu beklagen.“

Eine andere Katastrophe dieser Art trug sich gleichfalls in Amerika zu. Am 31. Mai 1889 brach der Staudamm

im Tal des South Fork-Flusses in der Nähe der Stadt Johnstown. Das Bauwerk war im Jahre 1842 errichtet worden. Es kamen hierbei 4000 Menschen ums Leben, und es wurde ein Sachschaden in Höhe von 35 Millionen Mark angerichtet.



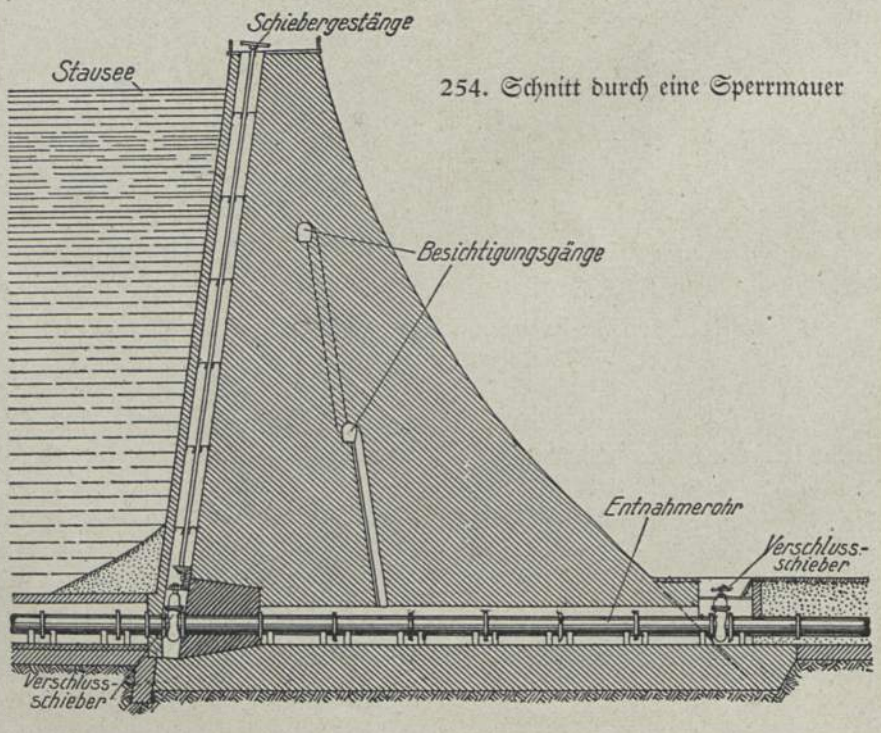

253. Schnitt durch einen Erddamm

Diese beiden Sperren waren bereits mehrere Jahrzehnte alt. Am Morgen des 1. Dezember 1924 aber barst die Mauer der Gleno-Sperre bei Bergamo (Bild 256) in den oberitalienischen Alpen, die erst in den Jahren 1921—1923 errichtet worden war. 5 Millionen Kubikmeter Wasser stürzten plötzlich frei zu Tal, zerstörten das Dorf Dezzo gänzlich und mehrere andere Orte zum größten Teil. 600 Menschen kamen dabei ums Leben. Der Riß war in der Mitte der Mauer entstanden. Die Untersuchung durch Sachverständige, darunter auch mehrere hervorragende Fachleute aus Deutschland, hatte das Ergebnis, daß erhebliche Fehler in der Bauausführung festgestellt wurden.

*

Der einfache Gedanke, in den Zeiten reichlicher Niederschläge Wasser für die trockenen Monate durch eine Sperrmauer zurückzuhalten, war schon im Altertum lebendig. Auch die damalige Technik vermochte die leichte Aufgabe zu bewältigen, standfeste und undurchlässige Erddämme zu schaffen. Der noch heute in Resten vorhandene Möris-See in Ägypten ist ein Staubecken gewesen, in dem sehr große Mengen Nilwassers während der Regenzeit gespeichert wurden. Der Pharao Amenemhêt I. hat hier um 199 vor Christo einen Damm errichten lassen, der eine natürliche Talsenkung abschloß.

Noch früher vielleicht sind Sperren in Indien und China gebaut worden. Die Assyrer schufen am Euphrat das Nitokris-Becken zur Bewässerung des Zweistromlandes. Die Anlage muß gewaltige Abmessungen besessen haben, denn es ist überliefert, daß die Fluten des Euphrat 22 Tage brauchten, um es zu füllen.




254. Schnitt durch eine Sperrmauer

Auf europäischem Boden sind Talsperren zuerst in Spanien und Italien errichtet worden. Deutschland sah die ältesten Bauwerke dieser Art im sechzehnten Jahrhundert. Sie dienten und dienen heute noch industriellen Zwecken. Ihre Stätte ist der Harz, in dem bereits seit sehr langer Zeit die Lagerstätten von Eisen, Kupfer, Blei und Silber abgebaut werden.

„Bald nachdem der Oberharzer Bergbau wieder erwacht war," so berichtet Soldan, „begann man die kleinen Waldtälchen in der Umgebung von Clausthal und Zellerfeld durch Dämme abzusperren und das aufgespeicherte Wasser nach den Bergwerken und Hütten zu leiten. Allmählich dehnte sich dieses Netz von Teichen und Gräben, das heute noch der Lebensnerv des Oberharzer Bergbaus ist, bis zum Abhang des mehr als 20 Kilometer von Clausthal entfernten Brocken aus. Wer den Oberharz durchwandert hat, dem ist das Bild der geheimnisvoll in den dunklen Tannenwäldern verborgenen Teiche unauslöschlich ins Gedächtnis eingegraben."

Es sind etwa 75 Talsperren errichtet worden, die den Wasserüberschuß des Winters speichern und dauernd Kraftwasser für die Fabriken und zum Antrieb von Pumpen für die Hebung der Grubenwässer liefern. Sie haben insgesamt einen Inhalt von 10 Millionen Kubikmetern.

Das bedeutendste dieser alten Staubecken im Harz, der Oderteich, nicht weit von St. Andreasberg, der in den Jahren 1714—1721 erbaut wurde und allein 1 700 000 Kubikmeter faßt, war bereits in jener Zeit durch eine Sperrmauer aus Granitblöcken verschlossen. Die Quadern werden nicht wie bei den heutigen Bauten durch Mörtel zusammengehalten, sondern sind mittels eiserner Klammern vereinigt. Es besteht die Absicht, die Sperrmauer des Oderteichs auf 58 Meter zu erhöhen, so daß hinter ihr 40 Millionen Kubikmeter Wasser gespeichert werden können.

Die gewaltigste Talsperre der Neuzeit, einer der allergrößten Ingenieurbauten, die je geschaffen wurden, ist das Stauwerk von Assuan. Es wurde in seiner ersten Form in den Jahren 1898 bis 1905 von den Engländern am ersten Nilkatarakt errichtet und speicherte damals rund 1 Milliarde Kubikmeter Wasser. Heute ist die Mauer bis auf 30 Meter über der Flußsohle erhöht, und sie vermag jetzt die ungeheure Menge von 2⅓ Milliarden Kubikmeter zurückzuhalten.

Der Nil ist noch heute wie in den biblischen Zeiten der Spender des Reichtums für Ägypten. Die Produkte des sonnendurchglühten Landes, hauptsächlich Baumwolle, Weizen und Zuckerrohr, gedeihen nur da, wo das Wasser des Stroms

Schlamm und genügende Feuchtigkeit hinträgt. Früher gingen die gewaltigen Fluten, die zur Hochwasserzeit den Nil hinunterkommen, zum Teil ungenutzt ins Meer, und monatelang herrschte Wassermangel, so daß trotz der fast andauernd günstigen Sonnenverhältnisse jährlich nur Eine Ernte eingebracht werden konnte. Heute ist es möglich, auf weiten Gebieten zweimal zu ernten, denn es steht immer genügend Wasser zur Verfügung.

Nachdem die Hauptflut des Nils vorüber ist, werden im September die Durchlässe in der Staumauer allmählich geschlossen, und das Becken füllt sich bis Ende Januar an. Der Stau reicht dann 225 Kilometer flußaufwärts. Nach sehr genau aufgestellten Vorschriften, deren Befolgung sorgfältig überwacht wird, läßt man das aufgespeicherte Wasser alsdann in der dürren Zeit den Äckern zufließen.

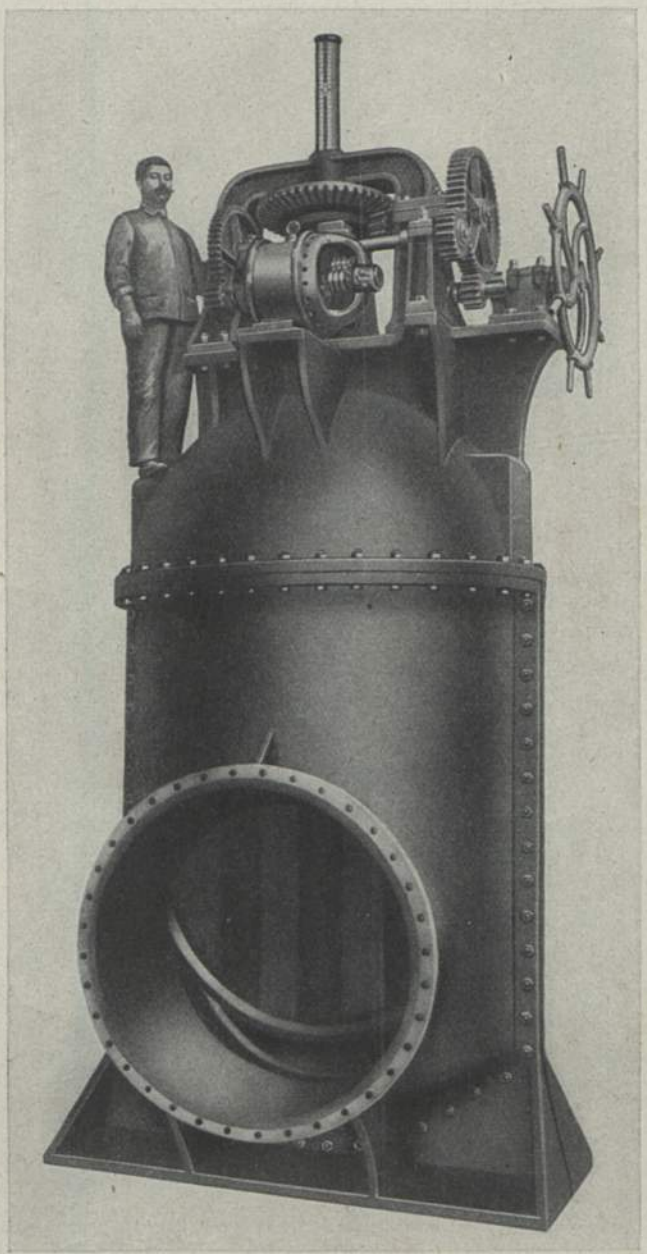
Das Tal des Nils ist an der Sperrstelle zwischen den einsäumenden Gebirgen 2000 Meter breit. Der Baustoff für die Mauer, die diesen ganzen Zwischenraum überbrückt, wurde in den benachbarten Gebirgen gebrochen, an denselben Stellen, wo viele tausend Jahre vorher die Pyramidenbauer Blöcke zugehauen hatten. Mancher von diesen, der den Dienern des Pharao in der Form mißglückte und liegengelassen wurde, ruht heute als Teil der Sperrmauer auf dem Grund des Nils. Die altehrwürdigen Steine haben hier keinen unangemessenen Platz erhalten. Denn was von unseren Zeitgenossen im Tal des alten ägyptischen Stroms erbaut worden ist, darf sich an Großartigkeit mit den Pyramiden beinahe messen.

Die Sperrmauer enthält 140 Auslaßöffnungen, die durch eiserne Schütze verschlossen werden können. Beim höchsten Wasserstand im Becken beträgt der Druck auf die unterste Schützreihe 210 000 Kilogramm. Trotzdem ist es möglich, daß jedes der auf Rollen gelagerten Schütze von Einem Mann mittels eines Windwerks geöffnet wird (Bild 257 u. 258).

Die Stauung durch den Damm von Assuan hat die eigentümliche Wirkung, daß die alten Tempel auf der Nilinsel Philae heute unter Wasser stehen. Der Hathortempel mit seiner reizvollen Darstellung antiker Tänzer und Musiker, der berühmte „Kiosk", den Kaiser Augustus begonnen, Kaiser Trajan vollendet hat, werden von den Fluten umspült und sind so sicherer allmählicher Zerstörung verfallen. Nur der hochgelegene Isistempel mit seinen riesigen Pylonen ragt mit seinem obersten Teil dauernd über den Wasserspiegel hinaus — als ein Grabdenkmal untergegangener Schönheit (Bild 259 u. 260).

Sehr große Wasserspeicher besitzt auch Amerika.

Um die Riesenstadt New York mit Trinkwasser zu versorgen, ist ein ganzes System von Talsperren im Croton, einem Nebenfluß des Hudson, errichtet. Das älteste Becken, der Old Croton-Weiher, der 1842 fertiggestellt wurde, liegt 65 Kilometer von New York entfernt. Seine Mauer ist heute tief im Wasser begraben, denn die neue Croton-Sperre, mit einem Wasserinhalt von 130 Millionen Kubikmetern, staut den Fluß 50 Meter hoch. Insgesamt speichert das System 388 Millionen Kubikmeter, die durch zwei Röhrenleitungen einem Behälter im Zentral-Park zu New York zugeführt werden.



255. Großer Verschlußschieber
Ausführung von Bopp & Reuther, Mannheim

Die Croton-Sperre wird von mehreren Anlagen gleicher Art im Westen der Vereinigten Staaten noch weit übertroffen. Dort ist man seit dem Anfang des Jahrhunderts eifrig bestrebt, Ödländereien durch reiche Bewässerung fruchtbar zu machen. Diesem Zweck dient die Pathfinder-Sperre im Staat Wyoming, die eine größte Stauhöhe von 58 Metern hat und 1350 Millionen Kubikmeter speichert, sowie die Roosevelt-Sperre im Salzfluß in Arizona, deren Stauhöhe sogar 67 Meter erreicht. Das Becken faßt hier 1700 Millionen Kubikmeter, die Mauer hat an der Sohle eine Breite von mehr als 47 Metern.

In Deutschland ist die Technik des Talsperrenbaus insbesondere durch die höchst verdienstvollen Arbeiten von Otto Intze, Professor an der Technischen Hochschule zu Aachen, entwickelt worden. Fast alle größeren Stauanlagen auf deutschem Boden, mit Ausnahme der neuesten, sind unter seiner Leitung oder nach seinen Plänen entstanden. Als Intze 1904 starb, konnte er auf ein Lebenswerk von seltener Größe zurückblicken. Seine Gedanken wirken nicht nur bei uns, sondern in fast allen Ländern der Erde noch heute nach.

Die erste Gelegenheit zur Betätigung fand der große Wasserbau-Ingenieur in dem Industriegebiet an der Ruhr, wo die rasch herangewachsenen, auf Bergrücken in erheblicher Höhe über den Wasser führenden Tälern liegenden Städte in große Sorgen um die Heranschaffung ausreichender Trinkwassermengen geraten waren.

„Es ist schwierig," so wird in dem „Handbuch der Ingenieurwissenschaften" ausgeführt, „in den Gebirgsländern in trockener Sommerszeit Trinkwasser zu beschaffen, und diese Frage kann für dichtbevölkerte Gegenden zu einer förmlichen Lebensfrage werden. Die Bedeutung dieses Gegenstandes wird klar, wenn man sich vergegenwärtigt, wie die Wasserversorgung in manchen Bezirken in der Notlage sich gestaltet.

„Ehedem boten den in den Bergen und Büschen zerstreut liegenden Gehöften die Quellen und Bäche der Hänge und

256. Das Unglück am Monte Gleno
Die Ruinen eines Kraftwerks

Täler eine ausreichende Wasserversorgung, und in den nur kleinen Städten auf den Höhen spendeten die Brunnen genügenden Zufluß, wenigstens bei nicht allzu großer Trockenheit. In langer sommerlicher Dürre versagten allerdings diese Mittel. Dann mußte das Wasser aus den Tälern heraufgetragen oder in Tonnen herbeigefahren werden. Das waren Notbehelfe, die bei einer spärlichen Bevölkerung und unter den früheren einfachen Arbeits- und Lebensverhältnissen noch hingehen mochten.

„Unhaltbar aber gestalteten sich diese Zustände bei dem starken Wachstum der Städte in der Neuzeit. Für eine gewisse Menge Menschen konnte selbst in sehr trockener Zeit auf die geschilderte mühsame Weise der Wasserbedarf gedeckt werden; aber es ist klar, daß es schon nicht mehr möglich ist, für eine auf der Höhe, etwa 100 bis 200 Meter über den Wassertälern, liegende mittlere Stadt von 40 000 bis 50 000 Einwohnern das Trink- und Verbrauchswasser auf Wagen oder durch Tragen heranzuschaffen. Die Erschwernisse wachsen dabei ins große, und der Preis des Wassers wird eine unerschwingliche Last, abgesehen von allen gesundheitlichen Bedenken.

„Als um die Mitte des abgelaufenen Jahrhunderts die Anlage von zentralen Wasserwerken möglich wurde, welche imstande waren, das in den Tälern gesammelte Wasser durch Dampfpumpen auf jede gewünschte Höhe zu drücken, wurden zwar derartige Unternehmungen vielfach im Gebirge, u. a. in Deutschland im Bergischen Land, ins Leben gerufen, allein sie vermochten die Grundfrage der Wasserversorgung, die dauernde Sicherung des ständig steigenden Bedarfs, nicht zu lösen."

Die Lage der Gemeinden wurde immer mißlicher, bis in der Anlegung von Staubecken ein Ausweg gefunden wurde.

Als erste Talsperre für solchen Zweck wurde in Deutschland in den Jahren 1889 bis 1891 auf Intzes Anregung eine Anlage im Eschbachtal geschaffen, deren Aufgabe die Versorgung der Stadt Remscheid mit Trinkwasser ist. Sie staut mit einer Mauer von 25 Metern Höhe rund 1 Million Kubikmeter. Das Wasser wird in zwei Druckrohr-Leitungen dem einige Meter unterhalb gelegenen Pumpwerk zugeführt, von wo es mittels einer Steigleitung der auf hohem Bergkegel liegenden Stadt zugeführt wird. In geringem Maß dient die Anlage auch der Kraftgewinnung.

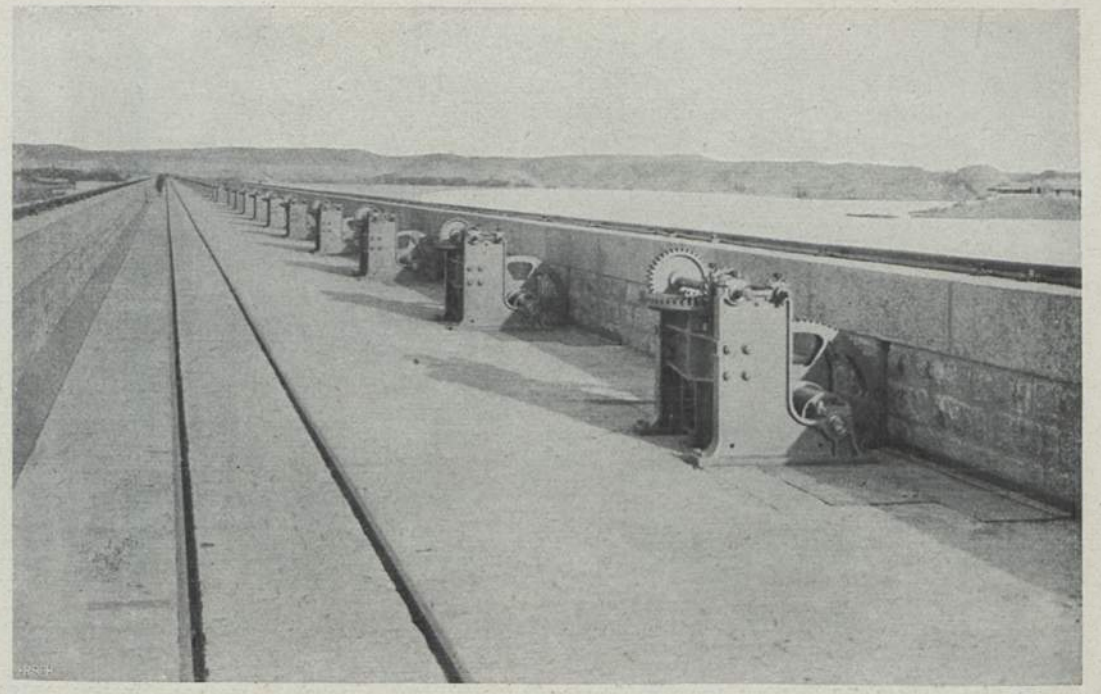
Nachdem die Bevölkerungszahl von Remscheid weiter gestiegen war, wurde im Neye-Tal bei Wipperfürth im Gebiet der Wupper ein zweites Becken mit einer Staufähigkeit von 6 Millionen Kubikmetern geschaffen. Es folgten unter anderen Bauten solcher Art im rheinisch-westfälischen Gebiet die Sperre im Panzertal zur Versorgung von Lennep mit Trinkwasser, im Herbringshauser Tal für Barmen und im Sengbachtal für Solingen.

Die Reinigung des Oberflächenwassers geschieht überall durch Sandfilter. Vor der Solinger Sperre ist ein mächtiger Springbrunnen angeordnet, dem das Wasser zunächst zugeleitet wird, damit es in innige Berührung mit der atmosphärischen Luft kommt. Es wird hierdurch reicher an Sauerstoff, der Eisengehalt wird gefällt, wodurch die Schmackhaftigkeit des Wassers steigt (Bild 261).

Seit fast 200 Jahren besteht im Tal der Ennepe, das sich zwischen Hagen und Gevelsberg in Westfalen erstreckt, eine lebhafte Kleineisen-Industrie. Friedrich Harkort,

der Gründer der ersten Maschinenfabrik in Deutschland, und Alfred Krupp haben hier mancherlei gelernt.

Von der Ennepe-Straße her hat sich die gewaltige Eisenindustrie des westlichen Deutschlands entwickelt. Die alten Reck- und Sensen-Hämmer, die Schmieden für Ambosse, Schraubstöcke und Pflugscharen arbeiteten von jeher hier mit der Kraft des zu Tal gehenden Wassers, die mittels Räder ausgenutzt wurde. Allmählich aber reichte das Aufschlagwasser während vieler Monate nicht mehr aus, da die Wälder im Ennepe-Gebiet rücksichtslos niedergeschlagen worden waren, so daß ihre regelnde Wirkung auf den Wasserabfluß schwand. In den Zeiten starker Niederschläge gingen Hochwasser überrasch zu Tal, und es folgten Zeiten der Dürre.



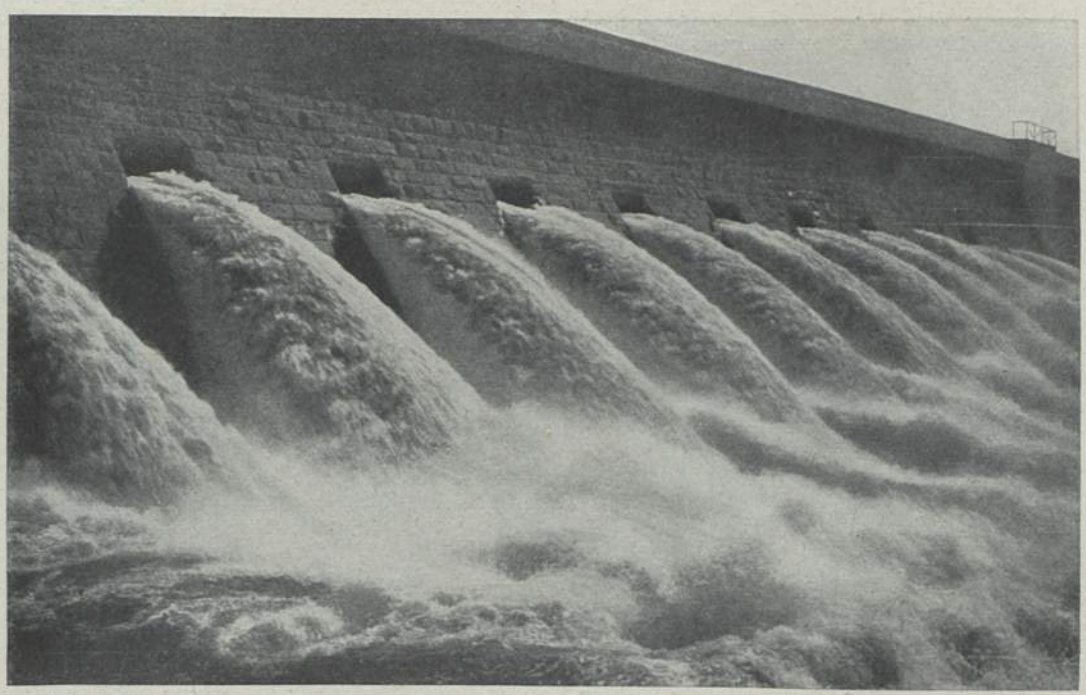
257. Windwerke der Auslaßschütze auf der Sperrmauer von Assuan
Aus „Handbuch der Ingenieurwissenschaften", III. Teil, Wasserbau, 2. Bd. Verlag W. Engelmann, Leipzig

Eine Sperre im Ennepe-Tal bei Radevormwald, die 1904 fertiggestellt wurde, hält nun das Hochwasser fest und liefert während des ganzen Jahres genügende Triebkraft sowie auch Trinkwasser. Mit einer Stauhöhe von 35 Metern faßt das Becken über 10 Millionen Kubikmeter. Zugleich wird von hier aus der Kreis Schwelm mit elektrischer Kraft versorgt.

Krafterzeugung ist neben dem von selbst sich einstellenden Hochwasserschutz der Hauptzweck der großen Urft-Talsperre bei Gemünd in der Eifel. Hier ist ein für deutsche Verhältnisse ungewöhnlich großes Nutzgefälle dadurch erreicht, daß das Kraftwerk nicht auf die Sohle des gleichen Tals gestellt ist, sondern in einem anderen tiefer liegenden Gebirgseinschnitt errichtet wurde (Bild 262).

Die Urft, ein kleines Flüßchen, zieht in vielen Windungen durch die Eifel, um sich endlich in die Rur, auch Roer geschrieben und nicht zu verwechseln mit der Ruhr, dem Nebenfluß des Rheins, zu ergießen. Die Rur eilt in ziemlich raschem Fall und mit weit ausladenden Schleifen der Maas zu. Kurz vor der Einmündung der Urft in die Rur ist das von ihr gebildete Tal durch eine 326 Meter lange und 58 Meter hohe Mauer verschlossen, deren Sohlenbreite 50 Meter beträgt. Der dahinter liegende Stausee hat eine Länge von 10 Kilometern und faßt mehr als 45 Millionen Kubikmeter Wasser. Neben dem linken Ende der Mauer, von der Luftseite her gesehen, ist ein 100 Meter breiter Freilauf treppenförmig in den Fels gehauen, den das überschüssige Hochwasser, aus dem Überfall kommend, in mächtiger Kaskade hinunterstürzt (Bild 263).

Das Kraftwerk steht bei dem Dorf Heimbach an der Rur. In seinem natürlichen Bett müßte das Wasser wegen der vielen Windungen von der Sperrstelle bis dorthin 25 Kilometer zurücklegen. Jetzt ist es mittels eines Stollens von 3 Kilometern Länge und 6 Quadratmetern Querschnitt durch das Gebirge geführt. Noch bei niedrigstem Wasserstand im Stausee



258. Ein Teil der Sperrmauer von Assuan mit geöffneten Auslässen

259. Die Nilinsel Phylae liegt im Staubereich des Damms von Assuan, sie ist daher teilweise überschwemmt

ist ein Gefälle von 70 Metern zur Verfügung; bei gefülltem Becken wächst der Höhenunterschied auf 110 Meter an.

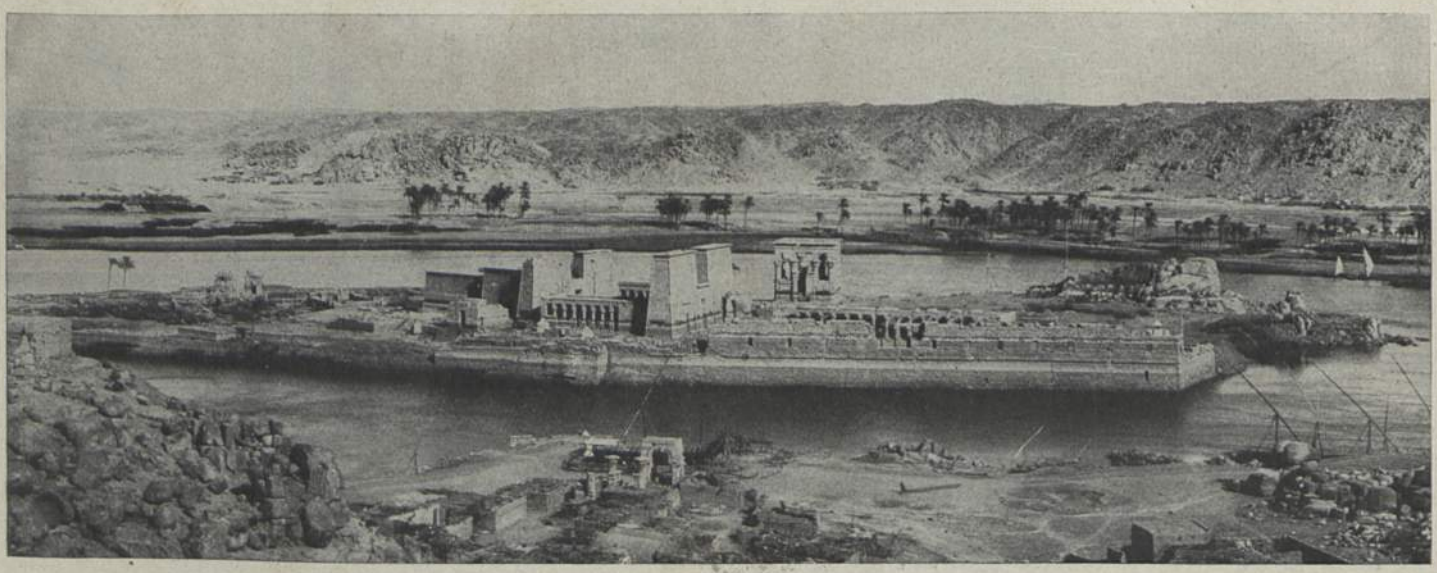
Die acht Francis-Turbinen im Kraftwerk Heimbach geben eine Leistung von 16 000 Pferdestärken. Es werden von hier aus Stadt- und Landkreis Aachen sowie die Kreise Düren und Schleiden mit elektrischer Energie versorgt.

Recht bedeutend ist auch die Moehne-Talsperre im Kreis Soest in Westfalen, die Wasser für die Trieb- und Pumpwerke an der unteren Ruhr abgibt sowie ein Kraftwerk von 2000 Pferdestärken Leistung mit Aufschlagwasser versorgt. Der Stauinhalt beträgt 130 Millionen Kubikmeter, die Stauhöhe über der Talsohle 32 Meter (Bild 264).

Einer unbedingten Anhängerschaft und Verehrung erfreut sich die Technik des Talsperrenbaus bei den Bewohnern des schlesischen Berglands. Diese Gegend liegt gerade in einer meteorologischen Zugstraße, die vom Adriatischen Meer zum Finnischen Busen verläuft und außerordentlich reich an Niederschlägen ist. Die schweren Regenwolken, die fortwährend von nördlichen und nordöstlichen Winden herangebracht werden, prallen gegen die Wände des Riesen- und Isergebirgs und lassen ihren Inhalt sehr rasch niederfallen. Die Zahl der Wolkenbrüche im schlesischen Bergland ist außerordentlich groß, sie verwandeln die Flüßchen und Bäche, die sonst mit unschuldigem Murmeln zu Tal gehen, in kürzester Zeit in reißende Ströme. Die Heftigkeit dieser Vorgänge wird durch die Gebirgsformation gesteigert, da die kahlen Hänge nicht die Fähigkeit haben, Wasser zurückzuhalten.

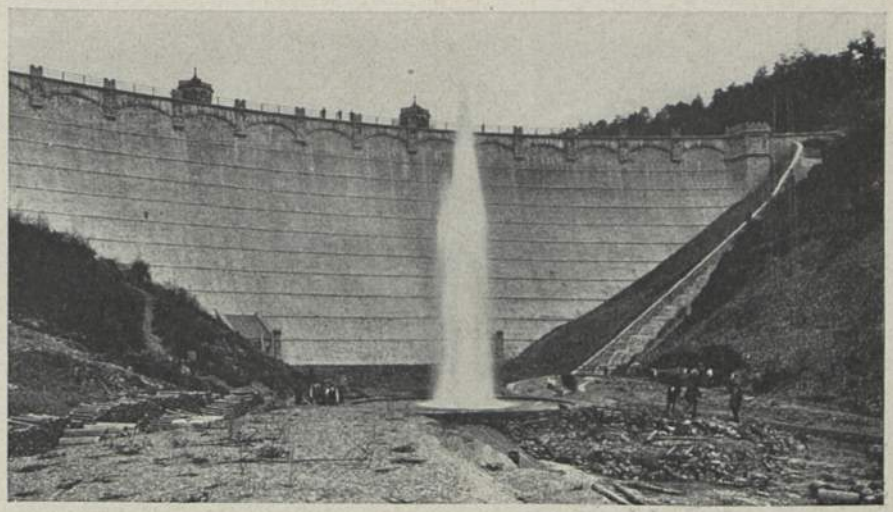
Hochwasser-Katastrophen der schlimmsten Art waren daher in jenen Gegenden keine Seltenheit. Niedergehende Fluten richteten z. B. am 15. Juni 1804, 2. August 1858, 3. August 1888 und besonders am 28. bis 30. Juli 1897 schwere Verwüstungen an. Es wurde nach einem Mittel gesucht, die unglückliche Bevölkerung in Zukunft vor solchen Ereignissen zu bewahren, und Intze wies nach, daß die schädlichen Wirkungen des Hochwassers in Schlesien durch den Bau von Talsperren beseitigt werden könnten.

„Man hat früher", so heißt es in dem bereits mehrfach erwähnten „Handbuch", „die Möglichkeit, durch Zurückhaltung

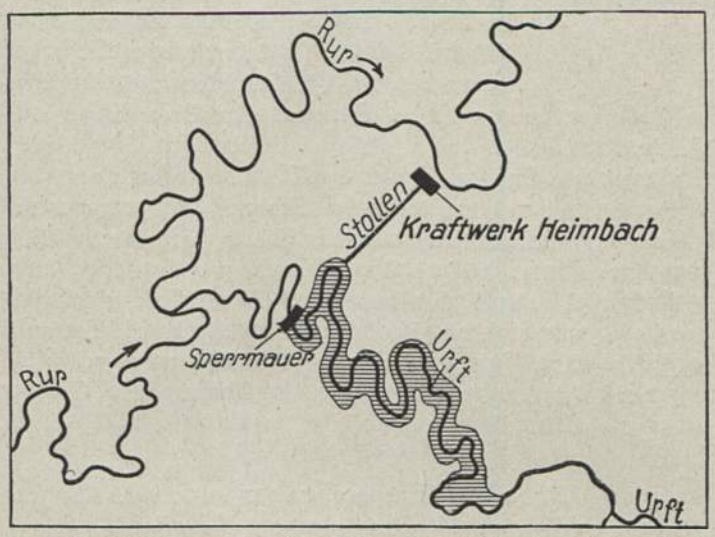


260. Ansicht der berühmten heiligen Insel Phylae vor Errichtung des Staudamms zu Assuan
Aus der Propyläen-Kunstgeschichte

des Wassers in Sammelbecken den Abgang des Hochwassers nennenswert beeinflussen zu können, förmlich in Abrede gestellt. Allerdings hatte man dabei die großen Flüsse im Auge. Man berechnete die Stauräume, die nötig sein würden, um die Hochfluten z. B. der Weichsel oder des Rheins nur für Tage zurückzuhalten, und kam dabei auf so große Aufspeicherungsräume, wie sie sicherlich in den Gebirgstälern nicht gewonnen werden können und wirtschaftlich vielleicht nicht berechtigt sein würden. Aber es ist kein Zweifel, daß man dabei wesentlich über das Ziel hinausgeschossen ist. Der Mensch muß sich im Kampf gegen die großen Mächte der Natur mit bescheidenen Mitteln und Wirkungen begnügen, und die Notwendigkeit, unsere jeweiligen Unternehmungen in wirtschaftlichen Einklang mit den Aufwendungen zu bringen,



261. Springbrunnen vor der Solinger Talsperre
Aus „Handbuch der Ingenieurwissenschaften", III. Teil, Wasserbau, 2. Bd.




262. Übersichtskarte der Urft-Talsperre bei Gemünd in der Eifel

zwingt uns, Anlagen zu schaffen, die unmittelbaren Nutzen gewähren.

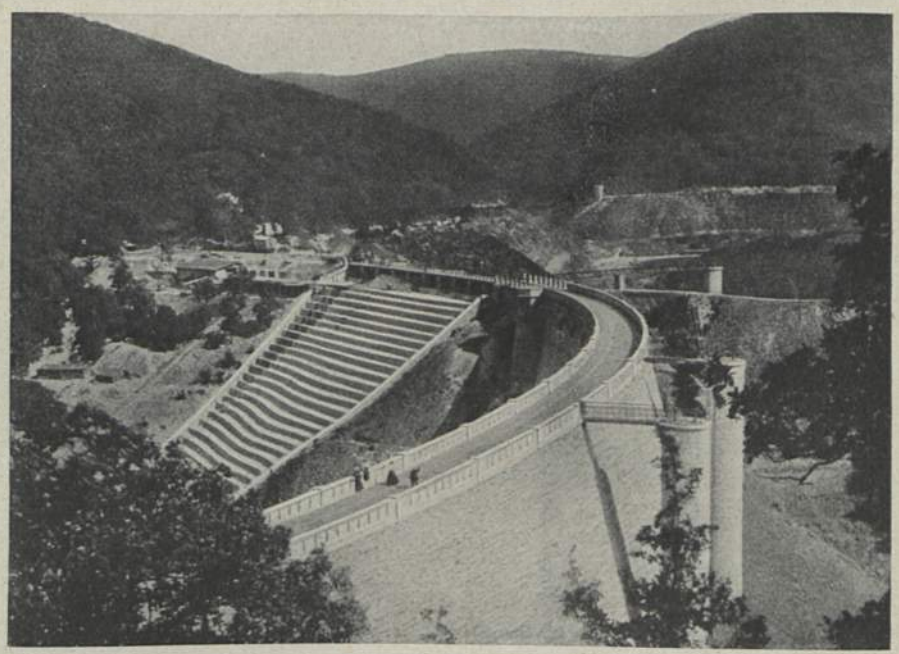
„Man scheut sich meist mit Recht, Werke ins Leben zu rufen, deren Rentabilität an sich zwar sicher, aber erst in vollem Umfang für künftige Geschlechter gegeben ist. Man würde zu sehr in alle bestehenden Verhältnisse eingreifen, wollte man, wenn auch die technische Möglichkeit geboten wäre, so ausgedehnte Staubecken, die bei Füllung großen Binnenseen gleichen müßten, herstellen, um einigermaßen eine Hochwasserwelle am unteren Flußlauf zu ermäßigen. Hierfür werden nur in Ausnahmefällen günstige örtliche Verhältnisse vorhanden sein."

Besser lagen die Dinge bei den kleinen Flüssen in Schlesien, und dort ist es tatsächlich gelungen, durch Sperren des Hochwassers vollkommen Herr zu werden. Im Gebiet des Queis, des Bober, der Katzbach und der Glatzer Neiße sind insgesamt 16 Becken mit einem Stauinhalt von 93 Millionen Kubikmetern geschaffen worden. Sie haben bewirkt, daß Überschwemmungen (Bild 265) in bedrohlichem Umfang dort nicht mehr eintreten können.

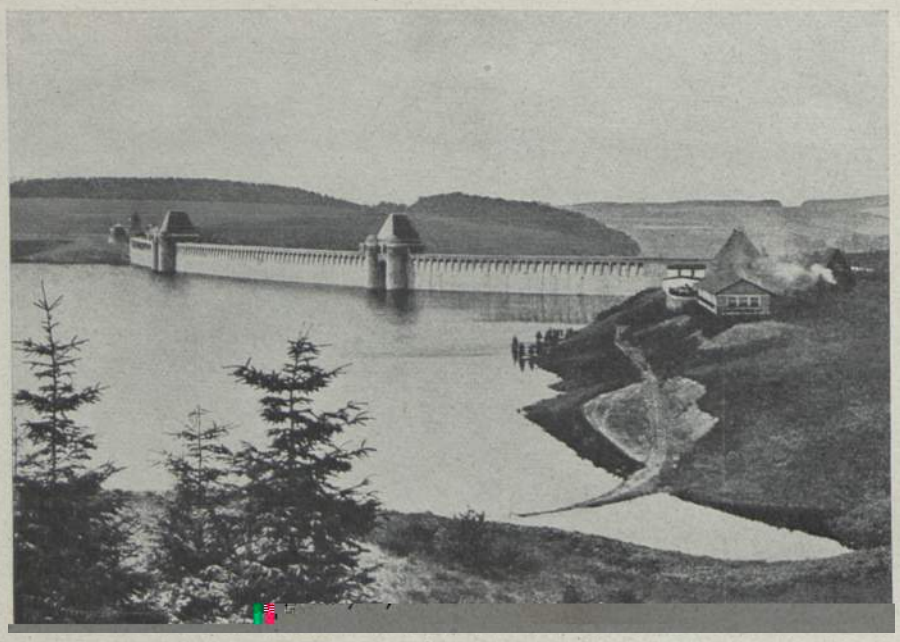
Die größte der schlesischen Sperren liegt bei Mauer (Bild 269) im Bober. Sie faßt 50 Millionen Kubikmeter mit einem Stau von 50 Metern Höhe. Der Queis, ein Nebenfluß des Bober, wurde bei Marklissa durch eine Mauer von 40 Metern Höhe gesperrt, hinter der 15 Millionen Kubikmeter gestaut werden können.

Die treffliche Wirkung der Anlage von Marklissa, die 1905 fertiggestellt war, zeigte sich bereits zwei Jahre später, als lang andauernde Regenfälle wiederum die Flüsse ringsum anschwellen ließen. Überall geschahen Zerstörungen, aber das Queisgebiet unterhalb der Sperre blieb verschont.

Die Becken von Mauer und Marklissa werden gleichzeitig zum Antrieb von Turbinen herangezogen. Das Kraftwerk bei Mauer kann 7200, die Turbinenanlage bei Marklissa 3500 Pferdestärken liefern (Bild 267). Da aber die Spiegelhöhe in den Seen stark wechselt, so sind die beiden Anlagen mit mehreren



263. Die Sperrmauer im Urfttal mit treppenförmigem Überfall als Energievernichter



264. Moehne-Talsperre im Kreis Soest (Westfalen)

Dampfkraftwerken im Waldenburger Kohlengebiet zusammengeschlossen. Sechs schlesische Kreise mit 370 000 Einwohnern werden von den vereinigten Werken mit elektrischer Energie versorgt.

Der Bau des großen Mittelland-Kanals, der vom Rhein über die Weser zunächst nur bis Hannover führte, jetzt aber bis zur Elbe verlängert wird (Band III, Seite 47), ward Ursache zur Errichtung der gewaltigsten Talsperren-Anlage in Deutschland, die zur Zeit ihrer Fertigstellung im Jahre 1914 zugleich die größte in Europa war.

Man hatte zuerst beabsichtigt, die Scheitelhaltung des Kanals bei Minden, wo er auf einer Trogbrücke die Weser überschreitet, aus diesem Fluß zu speisen. Das wäre aber nur nach einer Kanalisierung der mittleren Weser möglich gewesen, da der Wasserstand des Stroms sonst zu stark gesunken wäre. Berechnungen ergaben, daß es vorteilhafter und zugleich billiger sei, die Speisung aus künstlich geschaffenen Sammelbecken im Quellgebiet der Weser zu bewirken. So entstanden die Stauwerke bei Helminghausen im Tal der Diemel, in der Werra beim Letzten Heller oberhalb Minden und bei Hemfurt in der Eder, die ein langgestrecktes Tal mit hohen Rändern durchläuft.

Die Waldecker oder Eder-Sperre (Tafel IX) staut 202 Millionen Kubikmeter. Die Mauer, die in der Nähe des Schlosses Waldeck liegt, 400 Meter lang und 48 Meter hoch ist, hat hinter sich einen künstlichen See von 12 Quadratkilometern Oberfläche. An der breitesten Stelle beträgt die Entfernung der Ufer voneinander 1000 Meter, der Stau erstreckt sich über 27 Kilometer bis hinter Herzhausen. Ein Nebenflüßchen der Eder, die Werbe, ist gleichfalls in den Staubezirk mit eingezogen (Bild 268).

In dem weiten, heute vom Wasser begrabenen Bezirk lagen ein preußisches und zwei waldeckische Dörfer: Asel, Bringhausen und Berich mit Bericher Hütte und Stollmühle. Ihnen wurde das Schicksal, von dem Vineta nur in der Sage ereilt wird, tatsächlich zuteil: ihre Gemarkungen sind vollständig überdeckt worden. Zwei weitere Dörfer, Herzhausen und Niederwerbe, mußten einen Teil ihrer Gehöfte hergeben. 150 Familien wurden durch das große, zum Nutzen der Allgemeinheit errichtete technische Werk aus ihren alten Wohnsitzen verdrängt. Für viele Bauern, deren Urväter bereits hier gesessen hatten, galt es ein schmerzliches Abschiednehmen, und so sehr der preußische Staat als Erbauer des Kanals und der Sperre sich auch bemühte, den Vertriebenen die materiellen Verluste zu ersetzen, konnte er doch nicht alle Quellen des Grams zum Versiegen bringen.

Ein Teil der früheren Bewohner der verschwundenen Dörfer hat sich in der Domäne Büllinghausen bei Arolsen angesiedelt, wo das Dorf Neu-Berich entstanden ist. Die alte Kirche ist hier zum Teil wieder aufgerichtet worden, so daß ihr Geläute nicht, wie die Glocken Vinetas, klagend aus dem Wasser zu tönen braucht. In der Nähe des früheren Bringhausen ist unweit des Stausees Neu-Bringhausen entstanden.

Außer dem Speisewasser für den Mittelland-Kanal, das der Weser zufließt und von dieser bei Minden hochgepumpt wird, liefern das Diemelbecken 2000, der Stau in der Werra 5500 und der Edersee 18 000 Pferdestärken zur Erzeugung von elektrischem Strom. Ferner konnte noch an der Weser ein Kraftwerk mit einer Leistungsfähigkeit von 4000 Pferdestärken aufgestellt werden. Das gemeinsam gespeiste Stromnetz reicht im Norden bis Göttingen, im Süden bis Marburg und Gießen.

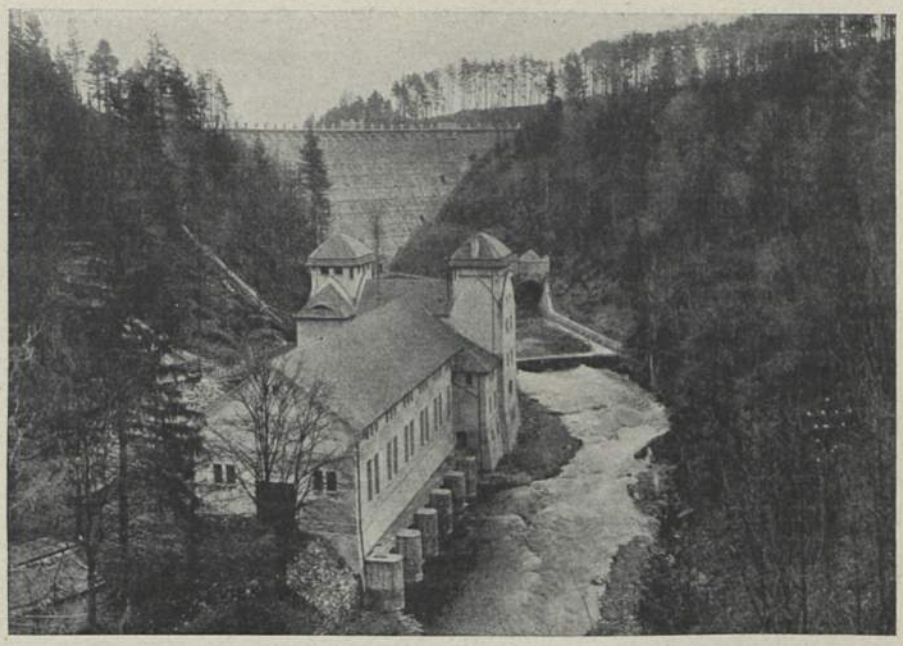
*

Obgleich Deutschland keine großartigen natürlichen Wasserstürze nach Art des Niagara- oder des Victoriafalls besitzt, sind doch auf seinem Boden in neuester Zeit einige Wasserkraftwerke errichtet worden, die zu den leistungsfähigsten auf

265. Der überschwemmte Marktplatz von Marklissa am 30. Juli 1897
Nach Bachmann, Die Talsperre bei Marklissa am Queis

der ganzen Erde gehören. Sie befinden sich sämtlich in Süddeutschland, wo von den Alpen und dem Schwarzwald recht bedeutende Wassermengen zu Tal gehen. Bayern ist vom Wassergott besonders reich mit kräftigen Gefällen ausgestattet, wenn er es auch den Bewohnern dieses deutschen Landes nicht immer ganz leicht macht, sie auszunutzen.

Mit Güte und Tücke zugleich hat der Gott in der Umgebung des Kesselbergs, einer Erhebung in den Voralpen, gewaltet. In einer Höhe von 870 Metern über dem Meer fließt hier die Isar vorbei. 70 Meter darunter breitet sich der Spiegel des Walchensees, und der Kochelsee ist in geringer Entfernung um eine gewaltige Stufe tiefer gelegt, nämlich um 200 Meter. Seit die Technik imstande ist, große Wasserturbinen zu bauen, waren begehrliche Blicke auf dieses Gefälle (Bilder 270 bis 272) gerichtet. Die Isar als reicher, nur in wenigen Monaten des Jahres geschwächter Zubringer, der Walchensee als Speicher, der Kochelsee, an dessen Ufern das Kraftwerk stehen sollte, als Ausgleichweiher, das heißt, als stets bereiter Aufnehmer des von den Turbinen abströmenden Wassers, das allmählich durch den aus ihm entspringenden Fluß, die Loisach, zu Tal geschickt werden kann, sie stellen ein vortrefflich gebautes Natursystem für die Gewinnung sehr großer Kraftmengen dar. Aber was nützte es, daß man die vorzügliche Bildung dieser Wassertreppe bewunderte! Der technischen Nutzung schien sie unzugänglich. Denn die Isar nähert sich zwar dem Walchensee auf geringe Entfernung, aber sie wendet sich gleich wieder schmollend ab, ohne mit dem Gewässer in Verbindung zu treten, und zwischen Walchensee und Kochelsee ist gar der hohe und breite Kesselberg als trennender Block eingelagert. Nur der sehr kostspielige Bau eines langen und weiten Tunnels durch diesen Fels konnte die Gottesgabe wirklich zu einem Geschenk machen, und vor Gewaltwerken solcher Art schreckte die Technik früherer Jahrzehnte zurück.

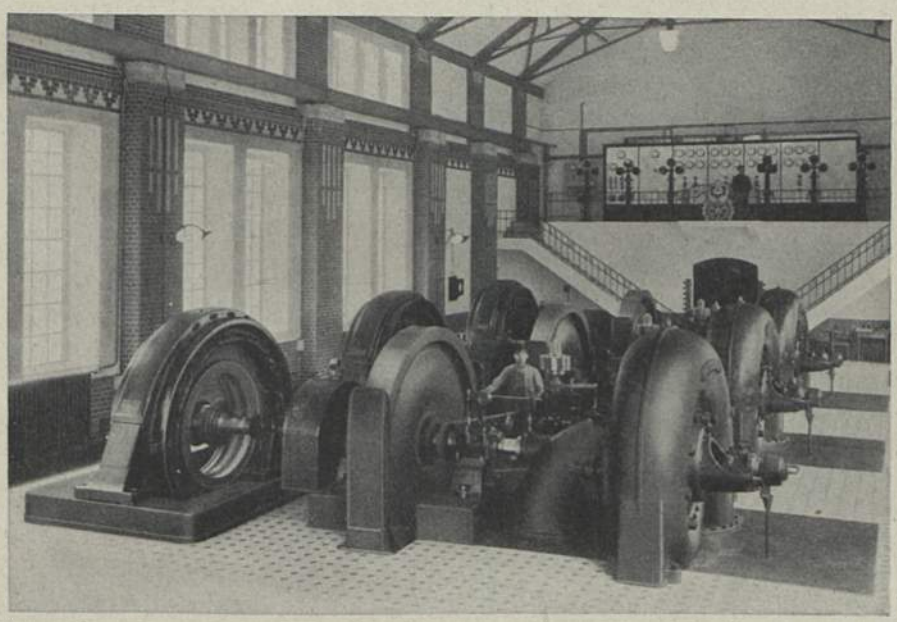


266. Sperrmauer mit Umlaufstollen und Kraftwerk bei Marklissa am Queis

Am Ende des vorigen Jahrhunderts jedoch war man mutiger geworden. Vom Jahre 1896 an wurden immer wieder Entwürfe für den Ausbau der Kraftstufe aufgestellt, der bayerische Staat beschäftigte sich immer eindringlicher mit der Aufgabe und veranstaltete schließlich im Jahre 1909 einen Wettbewerb. Es gingen mehr als dreißig Entwürfe ein, die wertvolle Anregungen gaben, von denen aber doch keiner zur Ausführung reif war. Erst als in den Jahren 1915 bis 1916 Oskar von Miller, der berühmte Begründer des Deutschen Museums in München, mit scharfem Blick für die Erfordernisse der Gegenwart und Zukunft einen wahrhaft umfassenden Plan für die gemeinsame Nutzung aller Elektrizitätskräfte in Bayern aufgestellt hatte, traten die Vorteile der Errichtung einer Walchensee-Kraftanlage mit ihrer ungewöhnlichen Leistungsfähigkeit so deutlich hervor, daß die Herstellung einer Verbindung der Isar mit den beiden Seen beschlossen wurde.

Millers Gedanke war, die im Turbinenhaus am Kochelsee erzeugte elektrische Energie durch eine sich weit ausbreitende Fernleitung mit einer Spannung von 110 000 Volt durch ganz Bayern zu führen und diese Landessammelleitung auch von anderen kleineren Kraftwerken speisen zu lassen. Um die Jahreswende 1918/19 wurde Miller von der bayerischen Regierung als Staatskommissar mit der Ausführung des großen Werks betraut, und er stand den Bauarbeiten bis 1921 vor. Zu dieser Zeit ging die Leitung an die inzwischen gegründete Bayernwerk-Aktiengesellschaft über. Es wurden mancherlei Abänderungen an den Plänen Millers vorgenommen, aber die von ihm aufgestellten Grundsätze sind durchgeführt worden.

Die zum Dauerbetrieb bestimmten Maschinen des Walchensee-Kraftwerks vermögen heute 120 000 Pferdestärken zu erzeugen. Bei Einsetzung der in Bereitschaft stehenden Turbo-Dynamos können sogar 168 000 Pferdestärken in das Fernversorgungsnetz geliefert werden.



267. Blick in das Turbinenhaus des Kraftwerks von Marklissa
Leistung: 3500 Pferdestärken. Ausführung von J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz

Das Speisewasser für die Turbinen wird grundsätzlich der Isar entnommen, die mit dem Walchensee verbunden ist. Der Fluß führt jedoch in den Wintermonaten, also gerade während der Zeiten, in denen sehr viel Licht- und Kraftstrom gebraucht wird, nur wenig Wasser. Jetzt wird in schönem Zusammenwirken der Inhalt des Walchensees zur Lieferung der Beaufschlagungsmengen herangezogen. Es ist gesetzlich zugelassen, die Spiegelhöhe des Beckens, das an der Oberfläche 16,2 Quadratkilometer groß ist, und dessen größte Tiefe 190 Meter beträgt, um 4,9 Meter zu senken. Hierdurch vermag der Walchensee 78 Millionen Kubikmeter Wasser zu liefern, genügend, um den Vollbetrieb der Turbinen jederzeit zu ermöglichen.

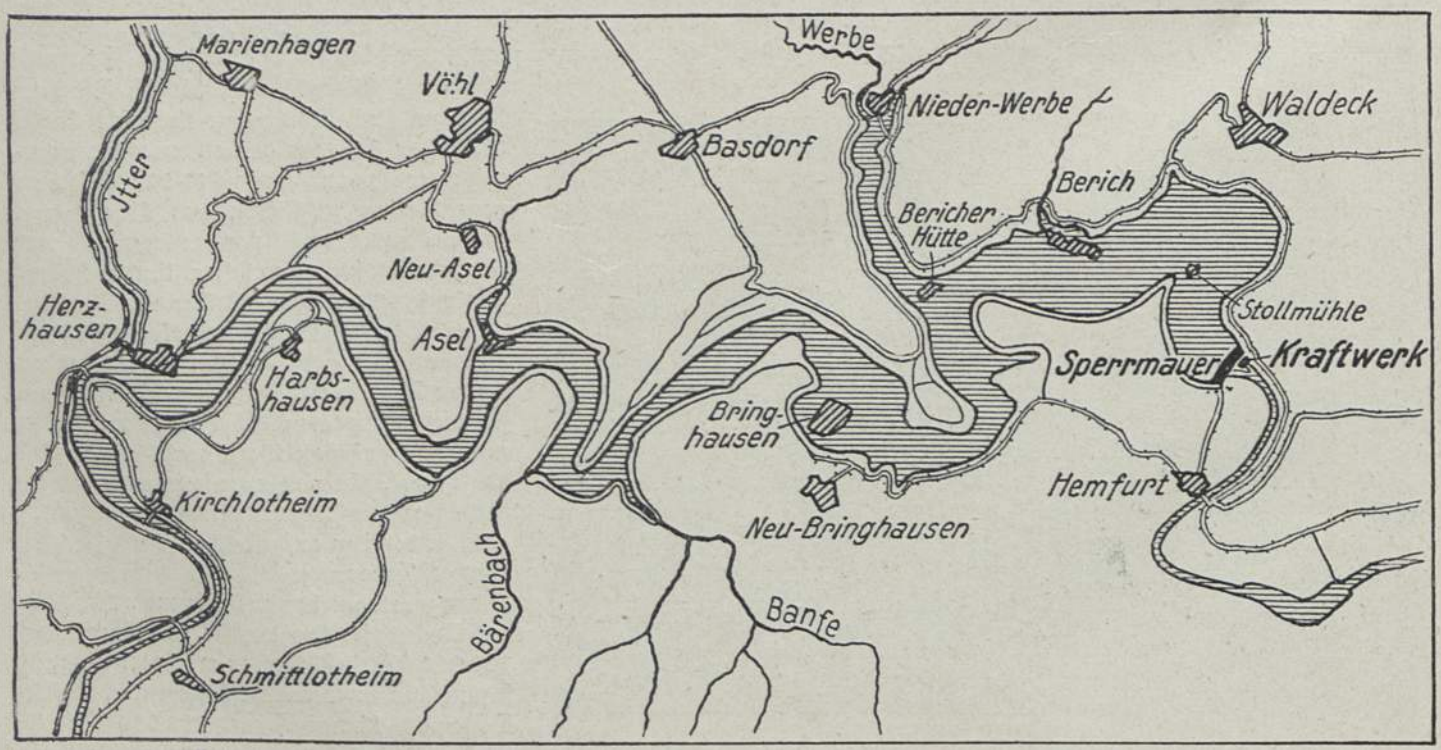
Durch das Hochwasser der Isar während der Schneeschmelze und deren Nachwirkungen wird der abgesenkte See dann innerhalb vier bis fünf Wochen, gewöhnlich bis Ende Mai, wieder auf seine volle Spiegelhöhe aufgefüllt. In der Sommerzeit also, wenn viele Reisende die melancholische Schönheit des Gewässers aufsuchen, wird das Bild des Talkessels nicht durch die kahle Nacktheit frei gesenkter Böschungen beeinträchtigt. Die anmutigen Formen der Senke, in die der Walchensee eingebettet ist, sind auch sonst aufs sorgfältigste vor jedem zerstörenden Eingriff bewahrt worden. Ein Besucher, der Zeichen dafür finden will, daß der einst so völlig weltabgekehrte Walchensee nun zum Glied einer technischen Großanlage geworden ist, muß schon sehr findig herumspüren, um etwas zu entdecken.

Die Form der ausgeführten Anlage ist auf den Bildern 246, 247, 270 bis 273 und Tafel X, 1, 2 dargestellt.

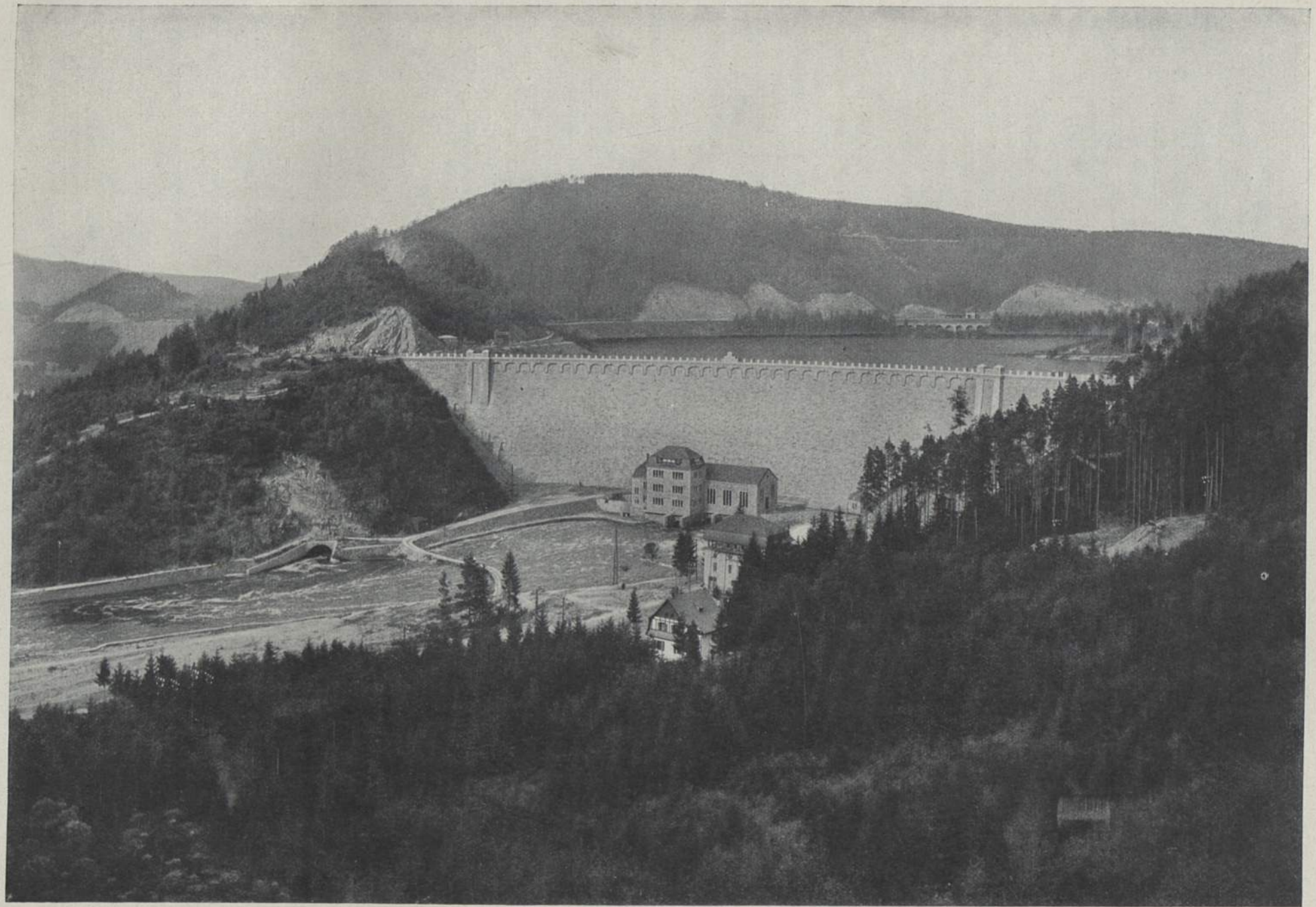
An dem Knie bei Wallgau kommt die Isar dem See am nächsten. Kurz oberhalb der Krümmung des Flusses ist bei Krün eine Wehranlage in diesem erbaut, die das Wasser 4 Meter hoch aufstaut. Hier beginnt ein Kanal von 3 Kilometern Länge, der unter dem Finzbach und der Staatsstraße nach Mittenwald hindurchgeführt ist und das Dorf Wallgau berührt. Darauf stellt sich dem Lauf die Wallgauer Höhe entgegen, ein Hügel, der mit einem Stollen von 1500 Metern Länge durchbohrt ist. Das Wasser erreicht nun den Sachensee, in dessen Becken es geklärt wird, stürzt darauf eine 8 Meter hohe Felswand hinab und wird dann durch einen zwei Kilometer langen Graben der ausgebauten Obernach zugeführt, die in den Walchensee mündet. Der Höhenunterschied von 60 Metern zwischen dem Sachensee und dem Walchensee soll später durch das Obernach-Kraftwerk ausgenutzt werden, das etwa 10 000 Pferdestärken hervorbringen wird.

Der natürliche Abfluß, den der Walchensee hatte, der Jachen, ist durch ein Abschlußwehr verbaut, und als neuer, künstlich hergestellter Ausgang öffnet sich den Wassermassen der 1200 Meter lange, durch den Kesselberg getriebene Stollen, der einen lichten Durchmesser von 4,8 Metern hat. Vor dem Tunnel liegt bei Urfeld ein Einlaufbauwerk (Bild 246), das aus einem kurzen, 12 Meter breiten Kanal besteht. Dieser öffnet sich trichterförmig zum Walchensee und enthält den Feinrechen. Mit Hilfe zweier hintereinanderliegender Schütze kann der Eingang zum Stollen jederzeit abgesperrt werden. Der Mund des Einlaufs liegt so tief, daß er bei der größten zulässigen Absenkung des Seespiegels noch so reichlich vom Wasser überdeckt ist, daß keine Luft eingesaugt werden kann.

Mit sanfter Neigung durchzieht der Tunnel das Dolomitgestein des Kesselbergs und mündet am jenseitigen Bergabhang in das Wasserschloß. Der Raum für dieses Bauwerk mit rechteckigem Grundriß von 26,5×17,6 Metern ist im Felsen ausgesprengt. Auf drei Seiten ist es von den Bergwänden umfaßt, die vierte, vordere Wand wird von einer Staumauer aus Beton gebildet, die am Fuß 16 Meter dick ist. Der so gewonnene offene Behälter faßt 10 000 Kubikmeter, die 22,5 Meter hoch anstehen. Wenn im Kraftwerk drunten der Zulauf zu einer Turbine oder zu mehreren Maschinen gleichzeitig abgesperrt wird, hat die in ihrem jähen Absturz plötzlich gehemmte Wassermasse einzig im Wasserschloß Gelegenheit, die ihr innewohnende Energie auszugeben. Es erfolgt ein Rückschlag, der das Wasser im




268. Übersichtskarte der Eder-Talsperre bei Hemfurt. Vgl. Tafel X

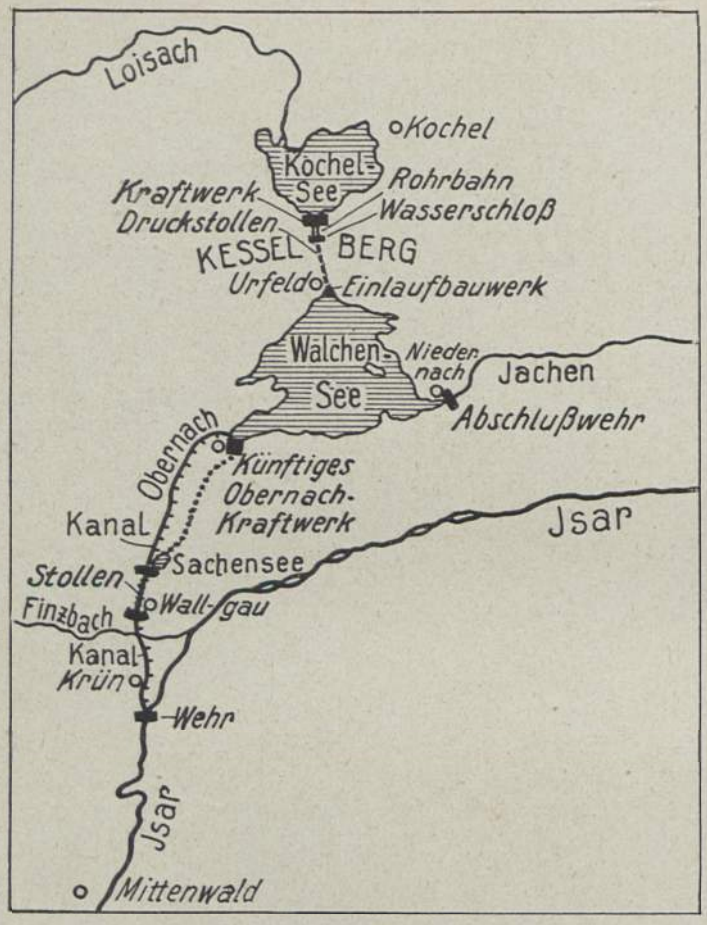


269. Die Bober-Talsperre bei Mauer

Im Vordergrund links: Mündung des Umlaufstollens. In der Mitte: Das Kraftwerk. Phot. F. Pietschmann, Hirschberg i. Schl.

Schloß rund 8 Meter über die Normalhöhe von 14,5 Metern emporhebt. Damit verrauscht die Wucht der niedergeführten Wassersäule, die unten nicht mehr den gewohnten Ausgang findet, und es braucht keine Zerstörung geschlossener Bauteile befürchtet zu werden.

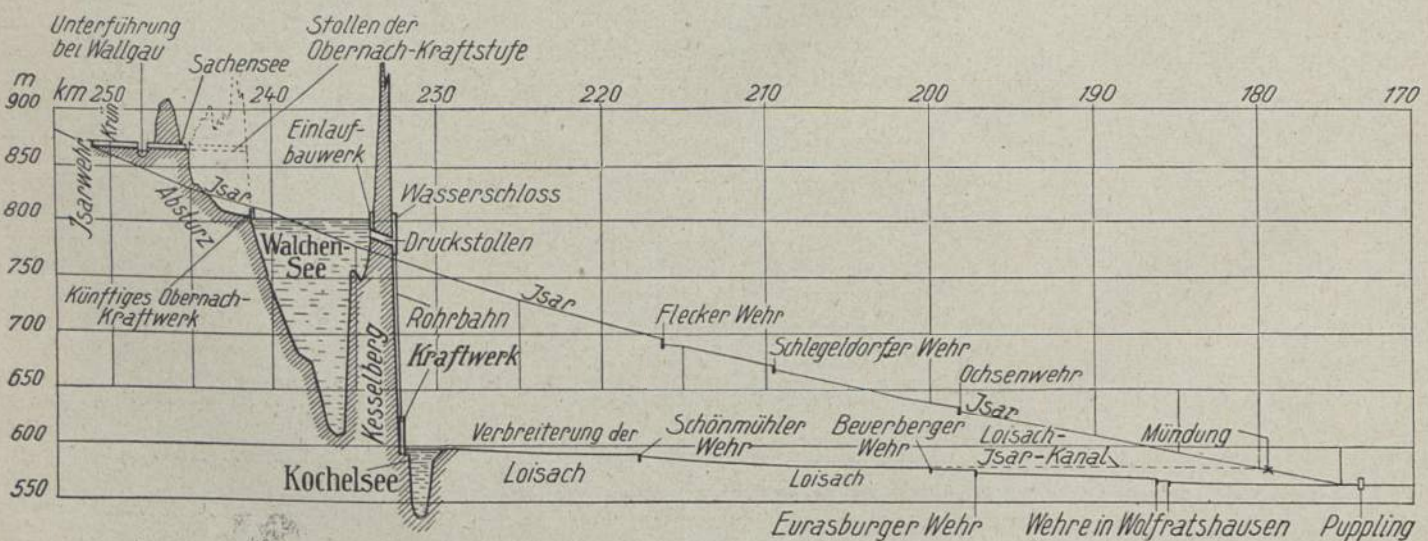
Denn nur in solchen wird das Wasser fortab weitergeleitet. Am Fuß der Vorderwand des Wasserschlosses setzen mit trichterförmigen Mündern sechs Druckrohre (Bild 247) an. Sie laufen zunächst ein kurzes Stück wagerecht und enthalten hier je zwei Drosselklappen, die als Verschlüsse benutzt werden können. Dann beginnt der Abfall zum Turbinenhaus, der, in der Senkrechten gemessen, 180 Meter beträgt. Wenn das Wasser in einem offenen Fall abwärts strömte, so würde hier ein „Donnerwasser" niedergehen, das einen erhabenen Anblick böte. Man beabsichtigt an dieser Stelle jedoch nicht, Anziehungskräfte auf Beschauer, sondern Nutzpferdekräfte für Maschinen zu erzeugen, und deshalb ist die Führung in völlig unromantischen Leitungen vorgezogen worden.




270. Lageplan des Walchensee-Werks

Die Rohre von je 2,2 Metern lichter Weite sind auf dem schrägen Abhang des Kesselbergs gelagert und haben eine Länge von je 430 Metern (Tafel X, 1). Dicht neben ihnen ist eine Seilbahn angeordnet, auf der während des Baus die einzelnen Rohrabschnitte von 8000 Kilogramm Einzelgewicht hinaufbefördert wurden und die jetzt den Beamten zu Fahrten über den Abhang dient, wenn Untersuchungen bestimmter Stellen der Rohrleitungen vorgenommen werden sollen. Die Leitungen führen in das große Krafthaus hinein, das auf der Jochwiese nahe am Ufer des Kochelsees erbaut ist. In dem Maschinensaal, der 105 Meter lang und 22 Meter breit ist, sind 4 Francis-Spiral-Turbinen von je 24 000 Pferdestärken und 4 Peltonräder von je 18 000 Pferdestärken Leistung aufgestellt. Das Wasser, das in den Turbinen gearbeitet hat, fließt durch den 400 Meter langen und 14 Meter tiefen Unterwasserkanal dem Kochelsee zu. Dessen Abfluß bildet die Loisach, deren Oberlauf verbreitert und geregelt ist. Von Beuerberg an werden die zahlreichen Windungen des Flusses durch einen 10 Kilometer langen Graben umgangen, der, ebenso wie die Loisach selbst, in die Isar fällt. Diese erhält nun das ihr bei Krün entzogene Wasser zurück. Später soll unterhalb der Einmündungsstelle des Grabens ein Wehr in den Fluß eingebaut werden, dessen Stau einen letzten, die Isarschleife abschneidenden Kanal versorgt und Aufschlagwasser für ein zweites Nebenkraftwerk, bei Puppling, heranführt.

Die Leistung der Maschinensätze (Bild 273) im Walchensee-Kraftwerk genügte nicht, um den Bedarf des Bayernwerks an elektrischer Energie zu decken. Es ist deshalb die Errichtung von Kraftanlagen auch an der mittleren Isar notwendig gewesen. Gleich hinter München beginnt ein Gefälle dieses vielgeplagten Flusses, das bis Moosburg reicht und rund 88 Meter beträgt. Es wurde nun ein beim Wehr von Oberföhring beginnender Seitenkanal angelegt, der bei 24 Meter Spiegelbreite und 6 Meter Wassertiefe auf der 53,7 Kilometer langen Kanalstrecke nur etwa 4 Meter Gefälle verbraucht. An diesem Kanal befinden sich vier Kraftwerke, die dauernd 82 200 Pferdestärken abzugeben




271. Höhenplan des Walchensee-Werks

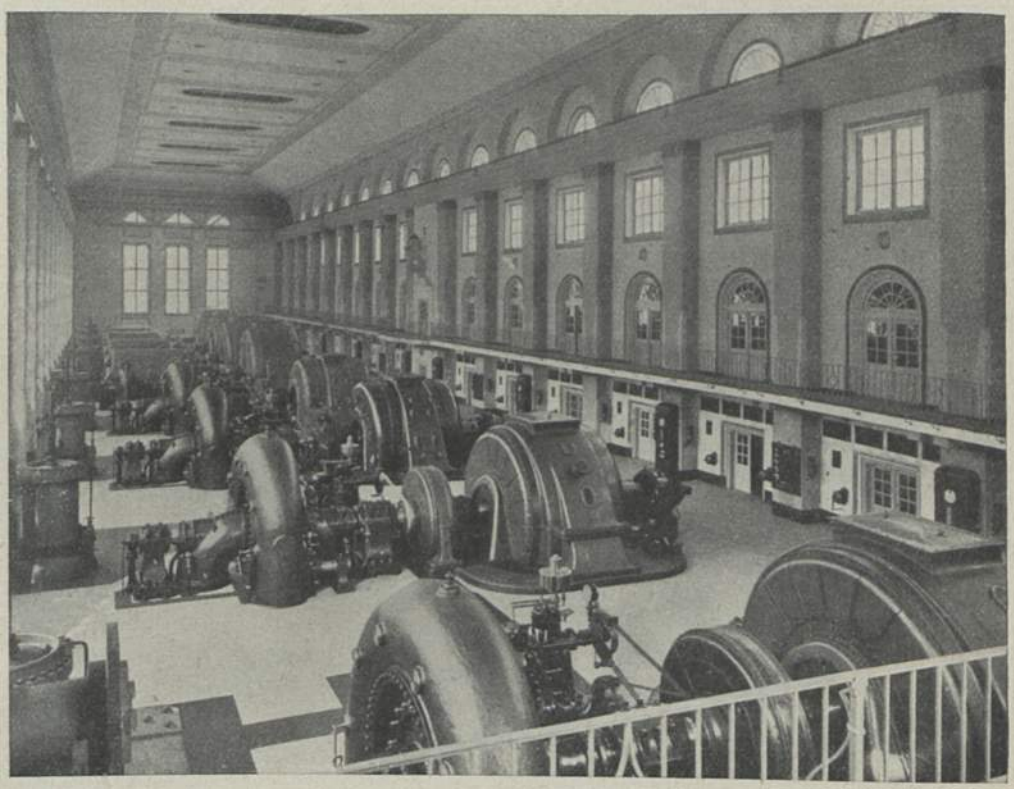
vermögen. Das Kraftwerk Finsing nutzt eine Stufe von 11 Meter, Aufkirchen 26,4, Eitting 25,3 Meter und Pfrombach 21,1 Meter Gefälle aus. Es wird weiter beabsichtigt, neben dem schon erwähnten Obernachwerk und der Stufe bei Puppling die Kräfte des Iller, des Lech und auch der Donau in dem Felsdurchbruch des Kachlet bei Passau dem Bayernwerk dienstbar zu machen.

In früheren Jahren schon, als die zentrale Stromlieferungs-Gesellschaft noch nicht durch die Errichtung ihrer zahlreichen Masten einen neuen bayerischen Wald hatte emporwachsen lassen, waren die Kraftwerke in Saalach und Leitzach entstanden. Nun ist für Sonderzwecke auch der breit und schäumend dahinziehende Inn ausgebaut worden. Wie viele Eisenbahnzüge mit schwarzer Kohle müßten dauernd von fernher nach dem an diesem Brennstoff sehr armen Oberbayern gefahren werden, damit man immerwährend die Energiemengen zu erzeugen vermöchte, die hier von der weißen Kohle in unmittelbarem Verfahren hervorgebracht werden! Das Deutsche Reich und der Bayerische Staat haben gemeinschaftlich das Kraftwerk Töging errichtet, das im Jahre 1925 in Betrieb gesetzt wurde und 100 000 Pferdestärken zur Versorgung der benachbarten Aluminiumfabrik und einer fünfzehn Kilometer entfernten Erzeugungsstätte für reinen Stickstoff zur Verfügung stellt. Es ist also auch hier ein Elektrizitätswerk von ungewöhnlichen Abmessungen entstanden, eine Zentrale, die allein so leistungsfähig ist wie der zwanzigste Teil aller deutschen Elektrizitätswerke zusammengenommen.

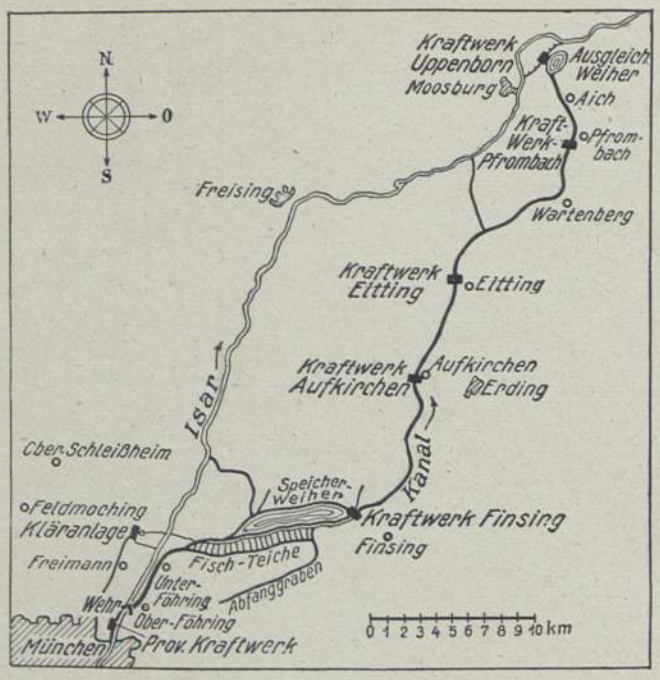
Bei Jettenbach ist der Inn um 6,5 Meter durch ein Wehr aufgestaut und das Wasser aus dem dahinterliegenden Becken in einem Oberwasserkanal 20 Kilometer weit bis zum Wasserschloß bei Töging geführt. 15 Rohre von 4 Metern lichter Weite und je 56 Metern Länge steigen alsdann das Gefälle von 31,5 Metern Höhe hinab, und jedes von ihnen versorgt eine der großen Turbinen. 7 von ihnen treiben Gleichstrom-Dynamos an, durch welche die Aluminium-Schmelzöfen gespeist werden, die anderen sind mit Drehstrom-Dynamos gekuppelt, welche die Fernleitung zur Stickstoffabrik versorgen.

272. Ansicht vom Walchensee und Kochelsee mit dem dazwischenliegenden Kraftwerk aus der Vogelschau

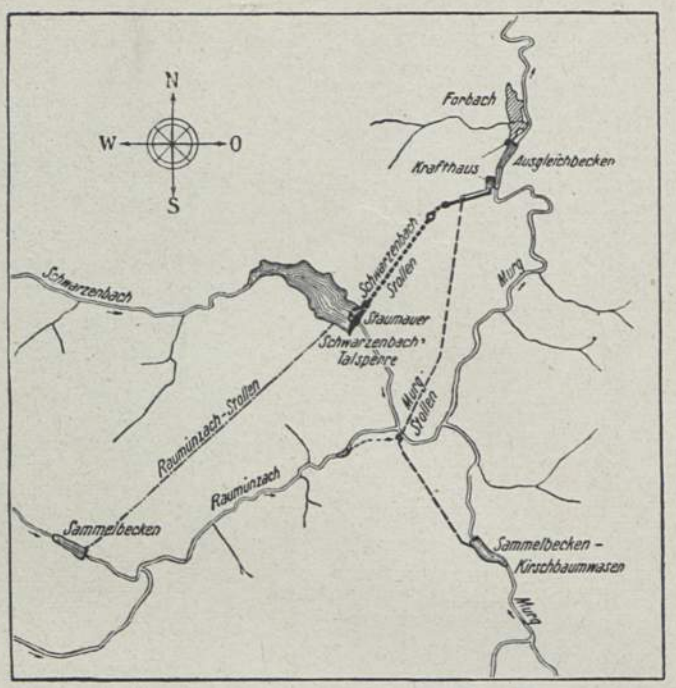
Ehe noch die altgehegten Pläne für die Stromversorgung Bayerns reif geworden waren, hatte man in einem anderen süddeutschen Land, in Baden, bereits die Ausbildung einer großen Sammelleitung in Angriff genommen. Sie wird



273. Maschinensaal des Walchensee-Werks mit Francis-Doppelspiralturbinen
Ausführung von J. M. Voith, Heidenheim an der Brenz




274. Übersichtskarte der Kraftwerke an der mittleren Isar



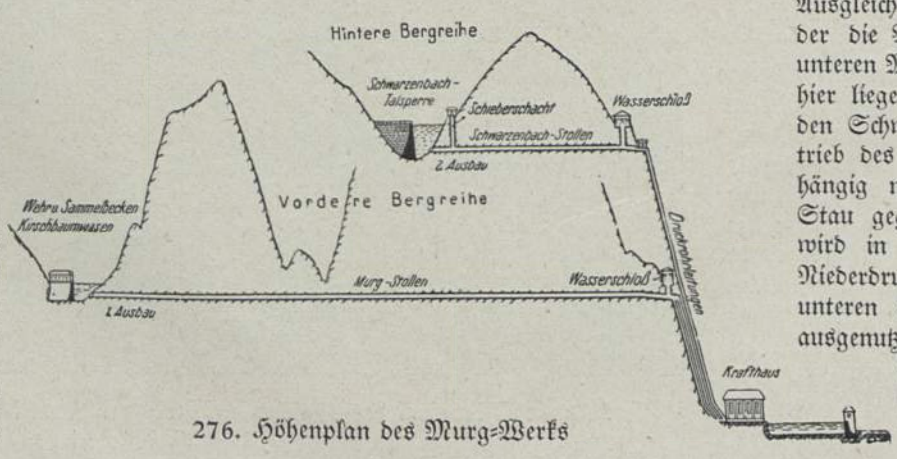

275. Lageplan des Murg-Werks im badischen Schwarzwald

nach ihrer Fertigstellung die Fläche des Landes, das in der Ost-West-Richtung nur schmal ist, von der Südgrenze bis fast zum nördlichsten Punkt in langer Erstreckung durchziehen. Für die Stromlieferung waren aus früherer Zeit bereits die Wasserkraftwerke im Rhein bei Laufenburg, Rheinfelden und Augst-Wyhlen im Süden und eine große Dampfkraftanlage bei Mannheim im Norden vorhanden. Im Jahre 1914 begann die Errichtung des Krafthauses bei Forbach zur Ausnutzung der in der Strömung der Murg enthaltenen Energie; 1918 war die Anlage im ersten Ausbau vollendet. Bald darauf wurde der zweite Ausbau des Murg-Werks begonnen, der gegen Ende des Jahres 1925 seine Wirksamkeit beginnen konnte.

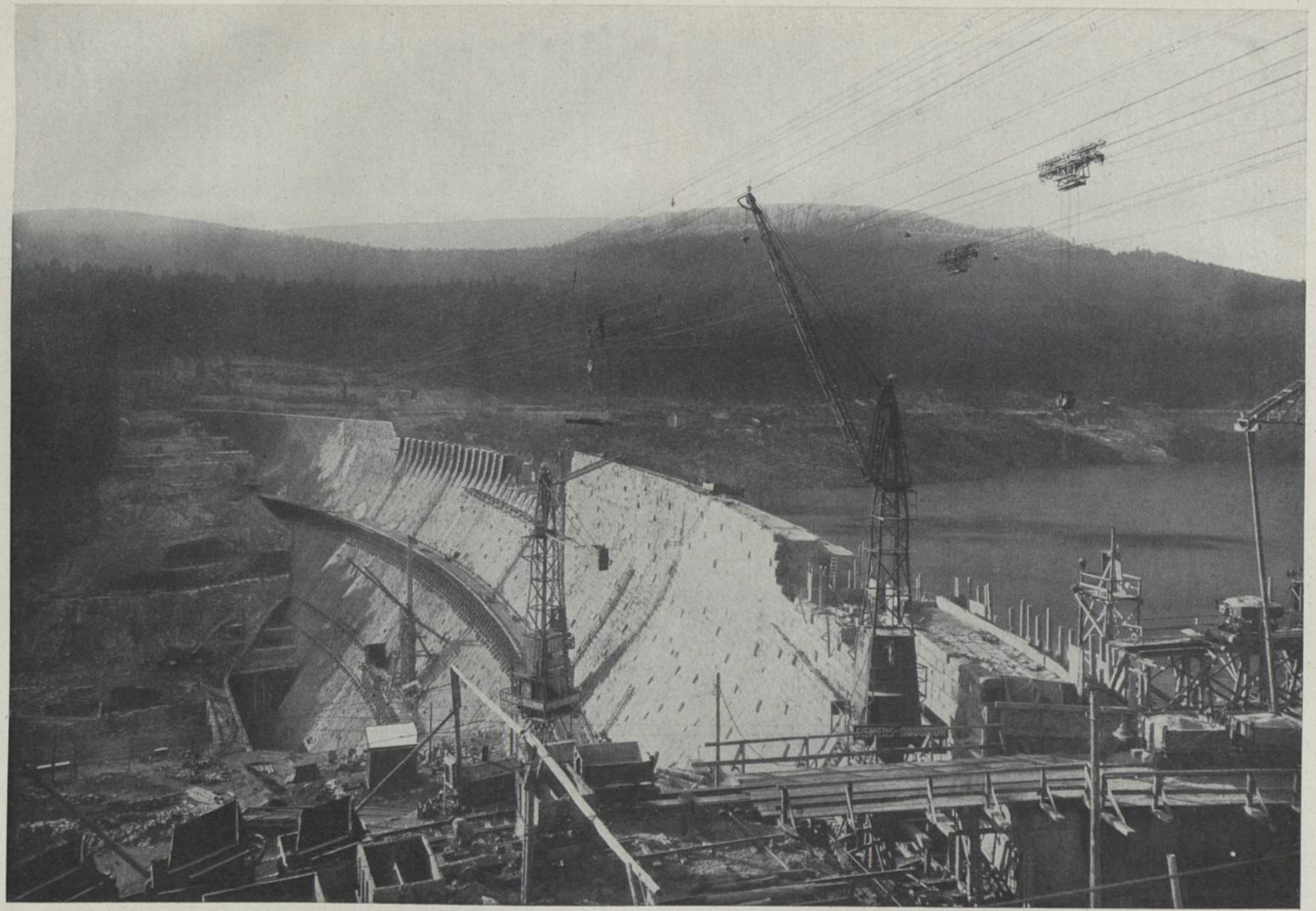
Es ist seltsam, daß vom Bayernwerk mit seinem Hauptstützpunkt, der Walchensee-Anlage, ganz Deutschland spricht, während das Badenwerk und die technischen Großschöpfungen an der Murg ziemlich unbekannt geblieben sind. Dabei verdienen die Einrichtungen, die am Abhang des Schwarzwalds zur Kraftgewinnung entstanden sind, durch das eigenartige Verfahren, mit dem hier räumlich getrennte Kraftgewinnungsstätten zu mechanischem Zusammenwirken vereinigt sind, wohl allgemeine Bewunderung. Sehr beachtenswert ist auch die Energiemenge, die von hier aus zur Landesversorgung beigesteuert wird. Die Ingenieure schlugen mit ihrem Mosesstab an die Felsen des Schwarzwalds und ließen eine Kraftquelle hervorbrechen, die nahezu 100 000 Pferdestärken liefert.

Die Murg entspringt am Kniebis im württembergischen Schwarzwald. Bei Schönmünzach tritt sie ins Badische über und mündet nach einem Gesamtlauf von 96 Kilometern Länge unterhalb Rastatt in den Rhein. Während des kurzen Laufs durch Baden fällt der Fluß um etwa 400 Meter. Er führt also stark reißendes Wasser. Dessen Kraft ist schon seit langem durch einfache Stauungen für den Betrieb von Sägewerken ausgenutzt worden, und auch heute werden sehr zahlreiche Fabriken, insbesondere solche zur Erzeugung von Holzschliff, durch Murgwasser betrieben. Das Badenwerk hat nun im Oberlauf der Murg bei Kirschbaumwasen ein Staubecken herstellen lassen. Es konnte nur geringe Abmessungen erhalten, nur zur Bergung von 360 000 Kubikmetern Wasser eingerichtet werden, weil sich die württembergische Grenze in der Nähe befindet und die Regierung dieses Landes unter keinen Umständen eine Stauung des Flusses auf ihrem Gebiet gestatten wollte, da sie ihre eignen Pläne zur Ausnutzung der Strömung hat.

Das im Becken bei Kirschbaumwasen gespeicherte Wasser wird (Bild 275 und 276) durch einen fast wagerecht liegenden Stollen von 5600 Metern Länge, der durch den Fels getrieben ist, zu einem Hang oberhalb Forbachs geführt. An der Berglehne steht zunächst das Wasserschloß, ein runder, aufgemauerter Behälter, und dann führen zwei Rohrleitungen das Wasser 150 Meter tief hinab zum Krafthaus. Es liegt am Ufer der Murg, die sich inzwischen so weit gesenkt hat. Drinnen laufen fünf Francis-Spiral-Turbinen von je 6800 Pferdestärken, die mit ebenso vielen Dynamomaschinen gekuppelt sind. Der Fluß empfängt das Aufschlagwasser nicht ohne weiteres zurück, das Ende des Untergrabens ist vielmehr zu einem Ausgleichweiher erweitert, der die Wasserführung der unteren Murg und damit die hier liegenden Fabriken von den Schwankungen im Betrieb des Kraftwerks unabhängig macht. Der kleine Stau gegenüber dem Fluß wird in einem besonderen Niederdruck-Kraftwerk am unteren Ende des Weihers ausgenutzt, in dem zwei Turbinen noch etwa 400 Pferdestärken entwickeln.




276. Höhenplan des Murg-Werks

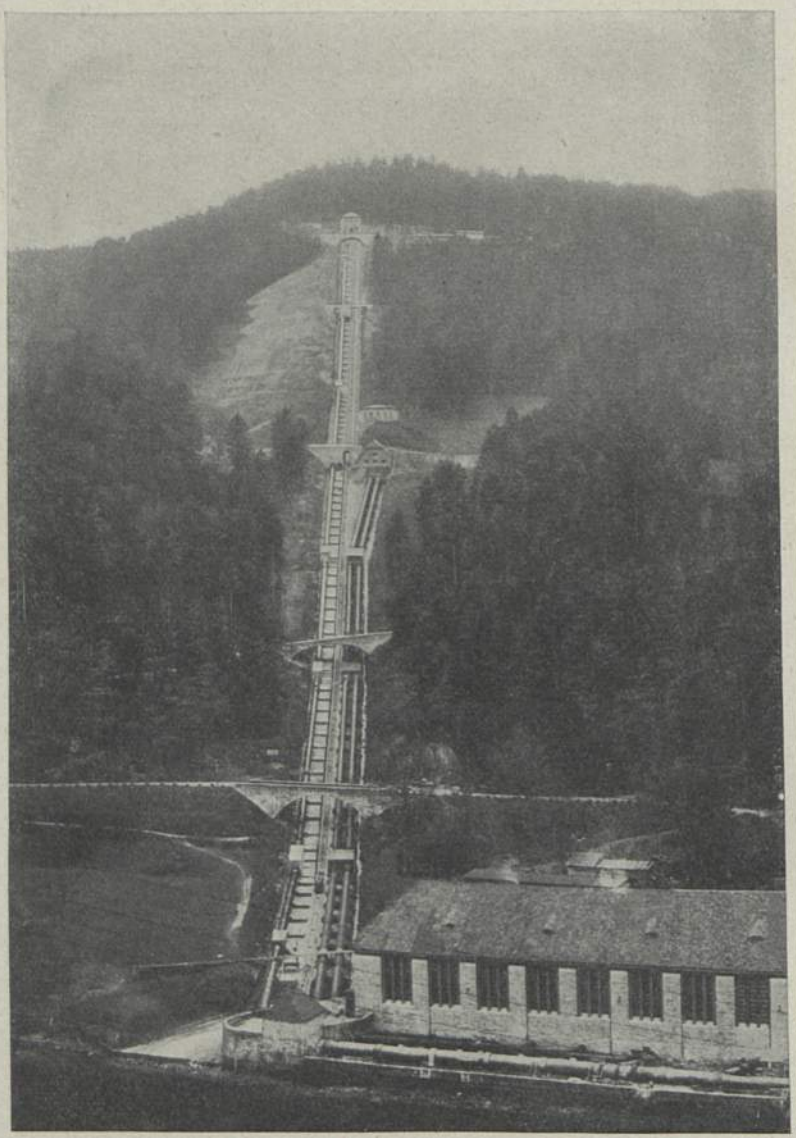


277. Sperrmauer der Schwarzenbach-Talsperre im Bau, mit Blick auf den Stausee
Das Wasser des Stausees wird mittels eines 1730 Meter langen Stollens durch die Talwand dem Wasserschloß und von dort durch eine Druckrohrleitung dem 360 Meter tiefer gelegenen Krafthaus Forbach zugeführt. Erbaut von Siemens Bauunion, Berlin

Der in Forbach erzeugte Strom fließt der großen Landessammelleitung zu. Während des Tags und weit in die Abendstunden hinein wird er zum Betrieb von Elektromotoren oder zur Bereitung von Licht dringend benötigt. Ja, in dieser Zeit reicht die gesamte Elektrizitätserzeugung in den sämtlichen Kraftwerken des Badenwerks nicht aus; das Land könnte noch mehr elektrische Arbeit gut verwerten. Aber in der Nacht stehen die meisten der an die Landessammelleitung angeschlossenen Fabriken still, und auch der Lichtverbrauch ist gering. Nun läuft das Wasser der Murg ohne rechtes Ergebnis durch die Turbinen bei Forbach, und auch die Kraftwerke am Rhein sind bei weitem nicht genügend ausgenutzt. Es werden gewaltige Kraftmengen in jeder Nacht verpufft, und einen solchen Leerlauf kann der neuzeitlich denkende Ingenieur nicht ertragen. Er hat daher zu einem Mittel ganz besonderer Art gegriffen, um diesen Leerlauf in Nutzlauf zu verwandeln.

Es ist nicht möglich, Elektrizität in sehr großen Mengen zu speichern. Akkumulatorenbatterien, die ausreichen würden, den ganzen überschüssigen Nachtstrom aufzunehmen, kann man nicht aufstellen, da sie zu teuer sind. Die Elektrizitätsspeicher könnten auch nur mit Gleichstrom geladen werden, so daß für ihre Füllung der Drehstrom der Landessammelleitung erst umgewandelt und dann für die Rückgabe während des Tages noch einmal zurückgewandelt werden müßte. Das ergäbe wieder eine unwirtschaftliche Gesamtanordnung. Es ist deshalb an Stelle der elektrischen eine hydraulische Speicherung des Nachtstroms vorgesehen. Der zweite Ausbau des Murgwerks wurde hergestellt, damit die überschüssige Nachtkraft Wasser in ein Hochbecken schaffen kann. Der neuzeitliche Gedanke für möglichst gründliche Nutzung des Kraftwassers, der bereits auf Seite 132 erwähnt wurde, wird hier angewendet.

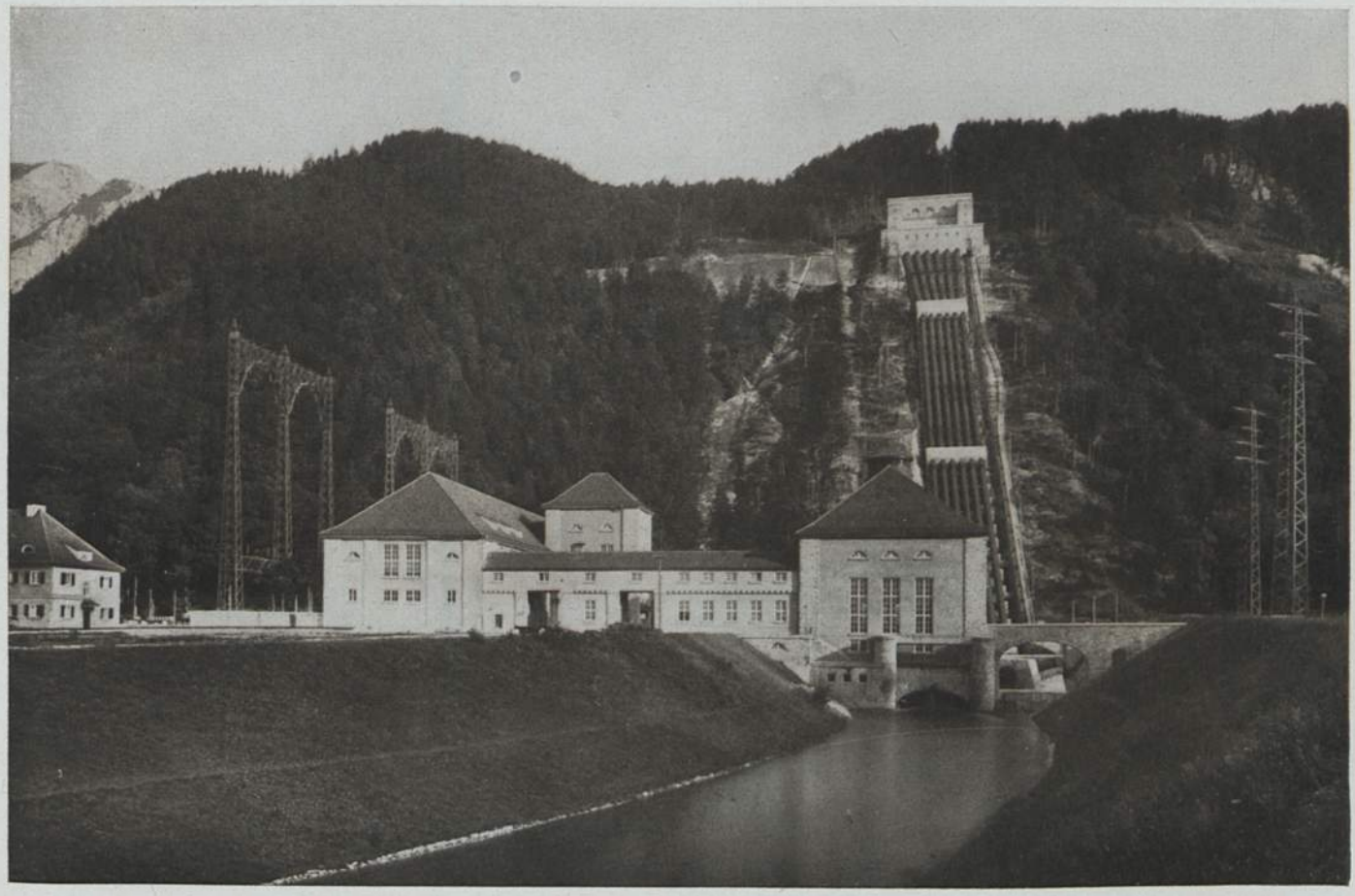
360 Meter über dem Murgtal fließt zwischen den Bergen des Schwarzwalds der Schwarzenbach. Er mündet in die Raumünzach, die ein Nebenfluß der Murg ist. Die Wasserführung des Schwarzenbächleins ist gering, und wenn man an seinen grünen Ufern unter den Wipfeln der düsteren Tannen wandelt, liegt nichts ferner als der Gedanke, daß dieses Rinnsal für die Kraftversorgung des badischen Landes eine Rolle spielen könnte. Und doch wird eine solche Wirkung erzwungen. An einer Stelle, wo das Schwarzenbachtal schmal ist, wurde eine gewaltige Sperrmauer errichtet (Bild 275 und 276), die zu den allergrößten Bauten dieser Art gehört. Sie ist 380 Meter lang, 65 Meter hoch und hat am Fuß eine Dicke von 50 Metern. Hinter ihr kann sich ein Stausee bilden, der 15 Millionen Kubikmeter Wasser faßt (Bild 277). Der Schwarzenbach selbst bringt nur wenig Wasser heran. Es würde Wochen dauern, bis der Bach nach einigen Stunden starker Wasserentnahme den Stauspiegel wieder auf die Normalhöhe gebracht hätte.



278. Kraftwerk Forbach des Murg-Werks
mit den beiden 360 und 150 Meter hoch gelegenen Wasserschlössern und den zugehörigen Druckrohrleitungen

Da greift nun die überschüssige elektrische Arbeit aus der Landessammelleitung helfend ein. Während der Nacht laufen zum Beispiel nur 2 Turbinen von den 5 des ersten Ausbaus im Kraftwerk Forbach. Die frei bleibenden Wassermengen werden durch ein besonderes Druckrohr, den Saugstutzen, zwei großen Hochdruckpumpen zugeführt. Da diese 145 Meter unter dem Wasserschloß des ersten Ausbaus stehen, empfangen sie das Wasser bereits mit dem entsprechenden Druck. Sie haben es nur noch um den restlichen Betrag 360 — 145 = 215 Meter emporzufördern, um es in das Schwarzenbach-Staubecken zu bringen. Dieses kann also trotz der Geringfügigkeit des natürlichen Zuflusses jeden Tag zu einer sehr erheblichen Kraftabgabe herangezogen werden. Der sehr große Inhalt vermag ferner zu Zeiten, in denen die Murg sehr wenig Wasser führt, die Gesamtversorgung des Kraftwerks allein zu übernehmen.

Das Wasser aus dem Schwarzenbachbecken wird durch ein Druckrohr aus Eisenbeton einem Stollen zugeführt, der mit einer Länge von 1730 Metern bei einem Durchmesser von 3 Metern den vorgelagerten Berg durchdringt. Von dort fällt das Wasser in einem Rohr, das 900 Meter lang ist, 360 Meter tief zum Krafthaus Forbach (Bild 278), wo es zwei Drillings-Freistrahlturbinen (Pelton) von je 27 500 Pferdestärken, die größten Turbinen in Deutschland (Bild 237) mit dem größten bisher bei uns hergerichteten Druckgefälle, antreibt. Nachts laufen die beiden Dynamos des zweiten Ausbaus als Elektromotoren, die von der Landessammelleitung mit Strom versorgt werden. Sie treiben nun die zwei am Tag abgekuppelten Hochdruckpumpen an, und das Wasser strömt durch dieselbe Rohrleitung, die es

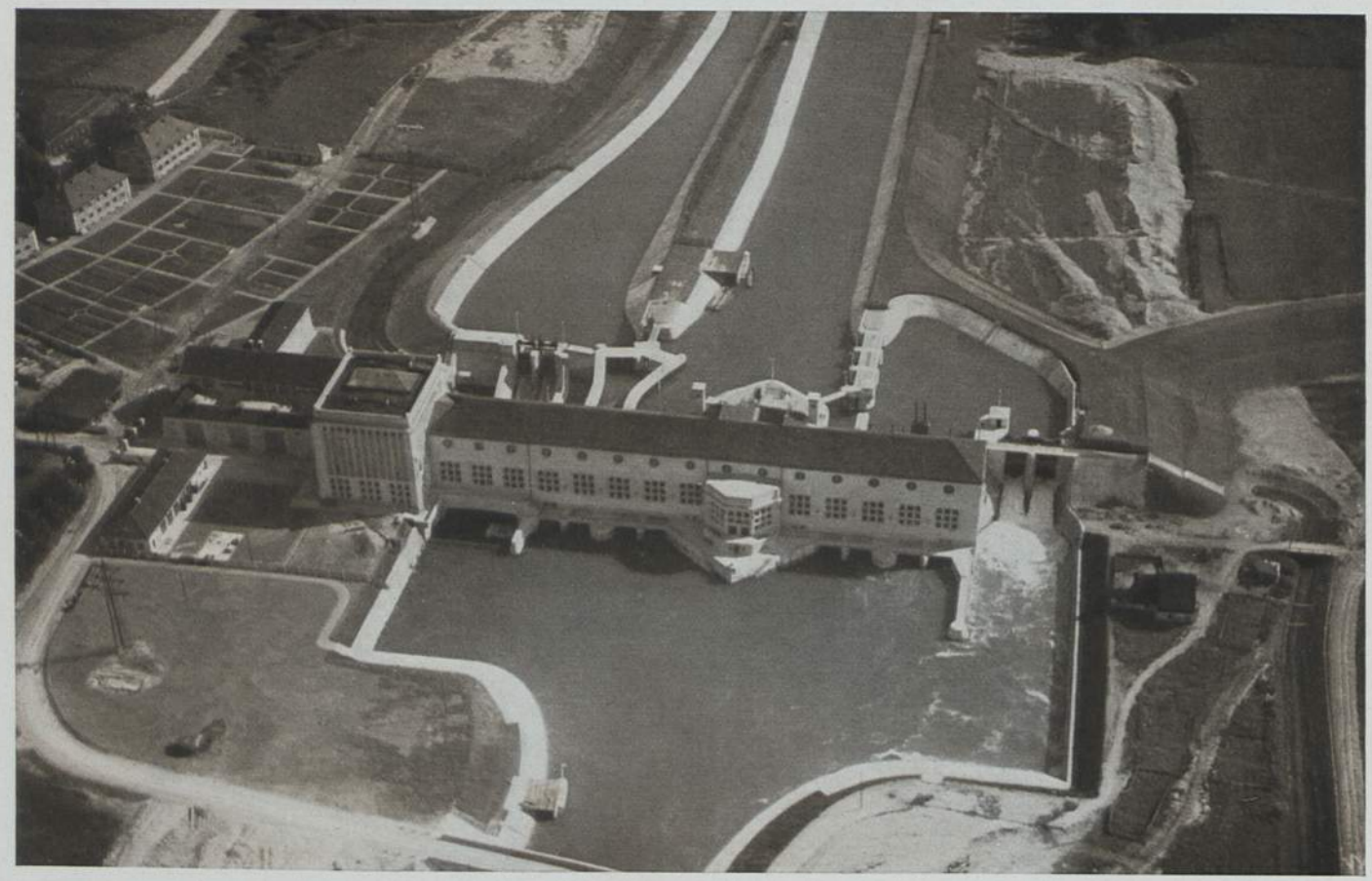


1. Turbinenhaus des Walchensee-Werks mit Rohrbahn und Wasserschloß

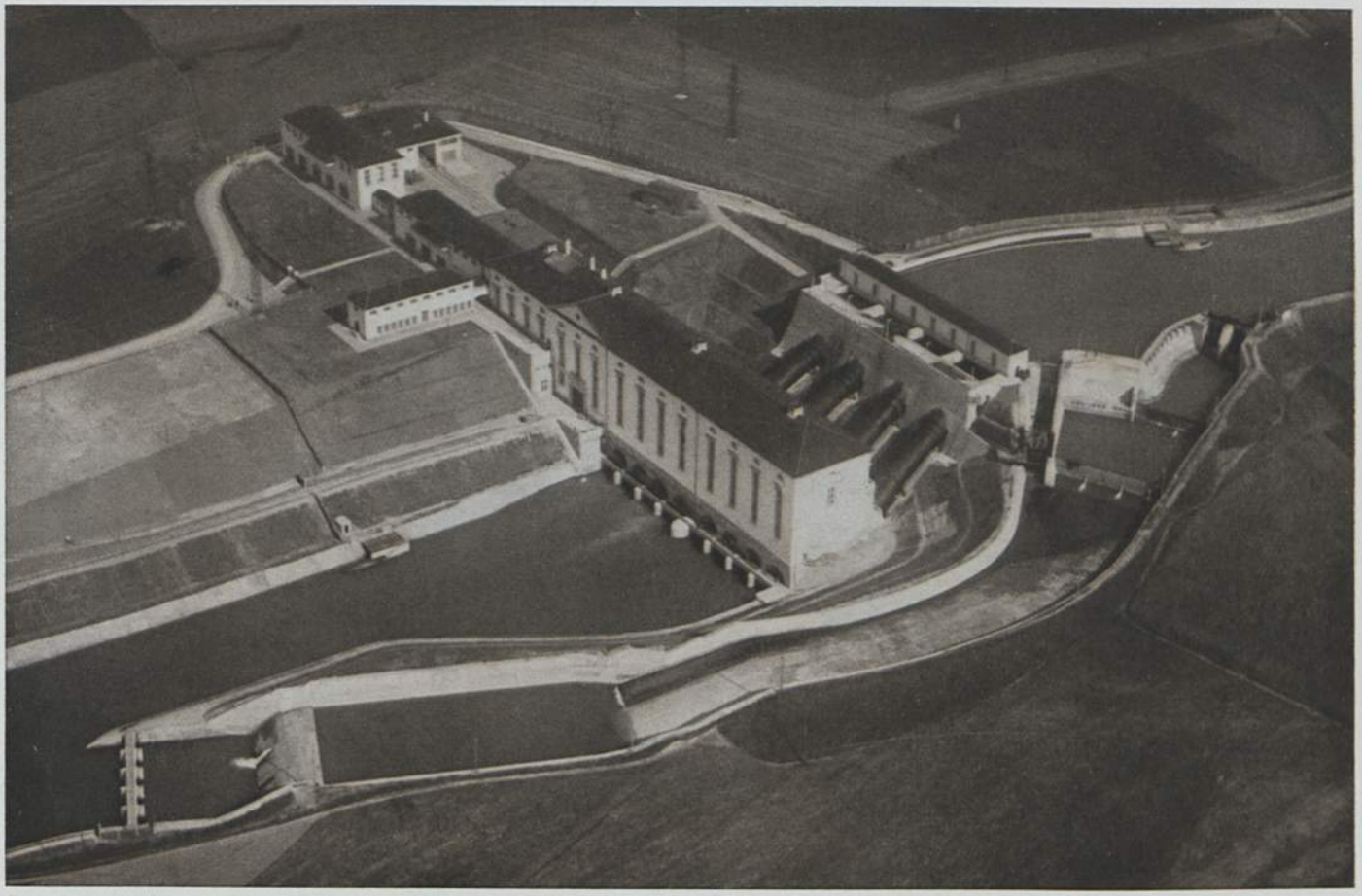
2. Schaltraum im Turbinenhaus des Walchensee-Werks

Das Bayernwerk

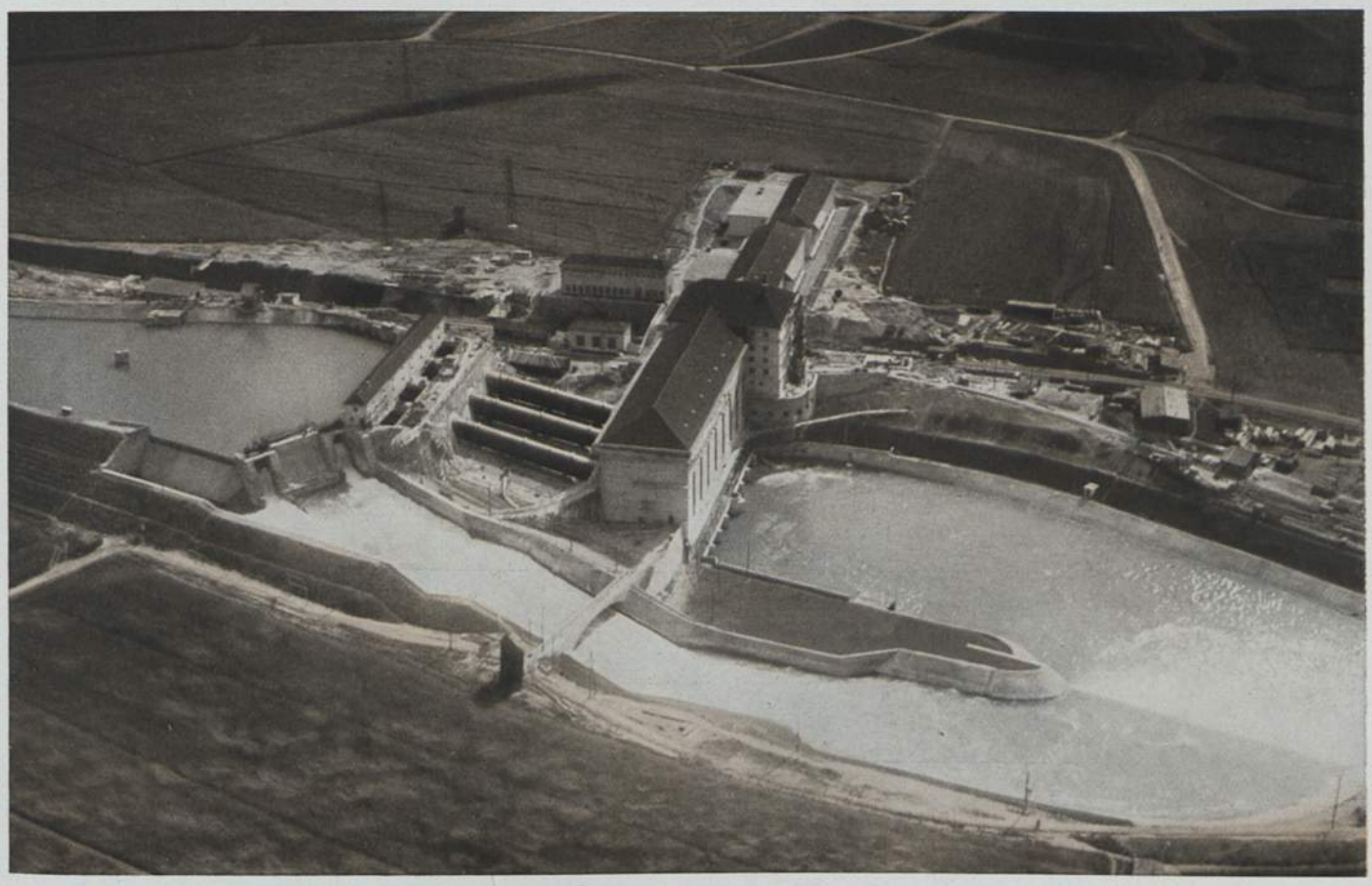
3. Schleusenwehr in der Isar bei Oberföhring mit Einlauf in den Werkkanal



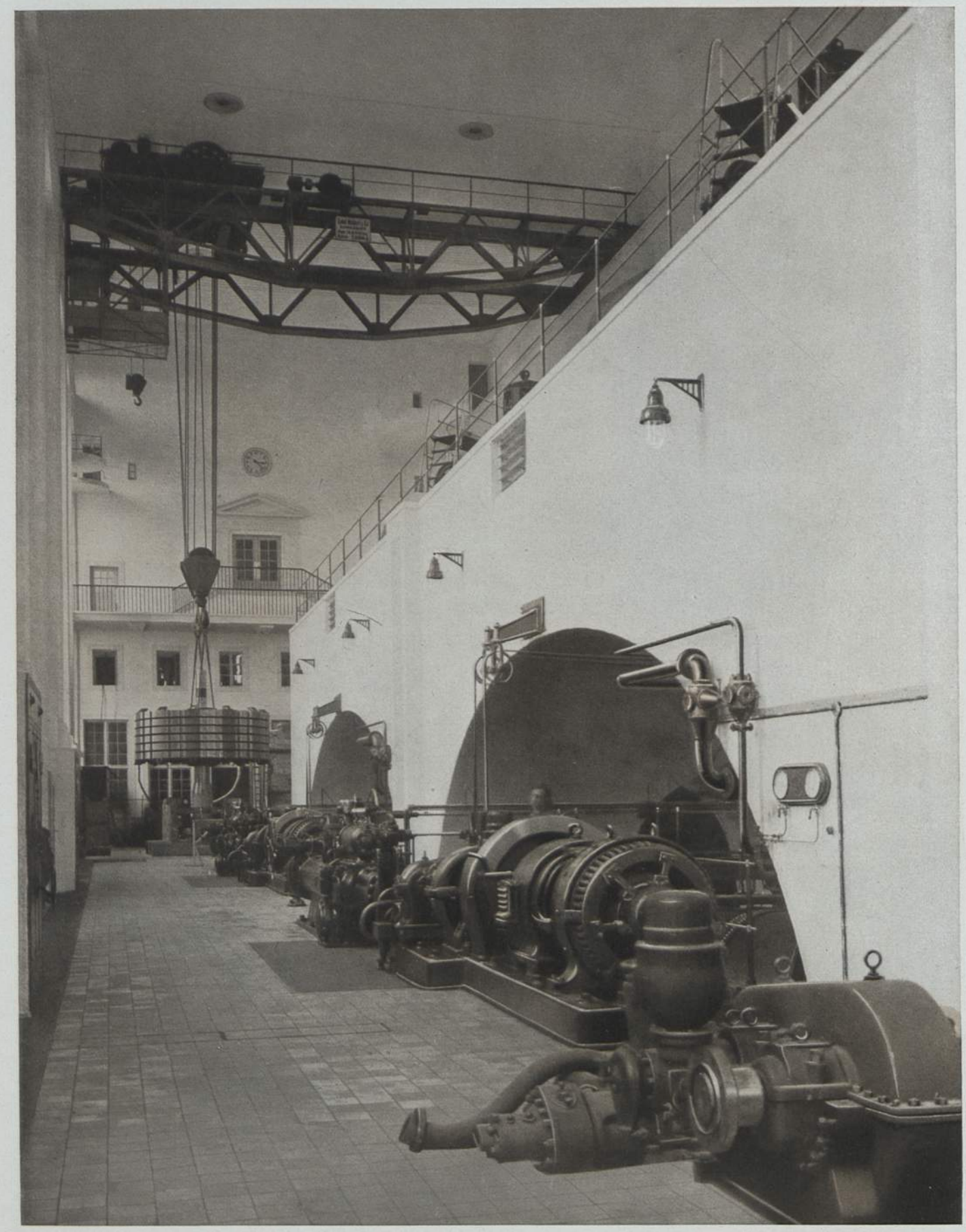
4. Kraftwerk Finsing; Nutzgefälle: 11 Meter, Höchstleistung: 14 200 Pferdestärken



5. Kraftwerk Auftirchen; Nutzgefälle: 26,4 Meter, Höchstleistung: 34 200 Pferdestärken



6. Kraftwerk Eitting; Nutzgefälle: 25,3 Meter, Höchstleistung: 32 800 Pferdestärken



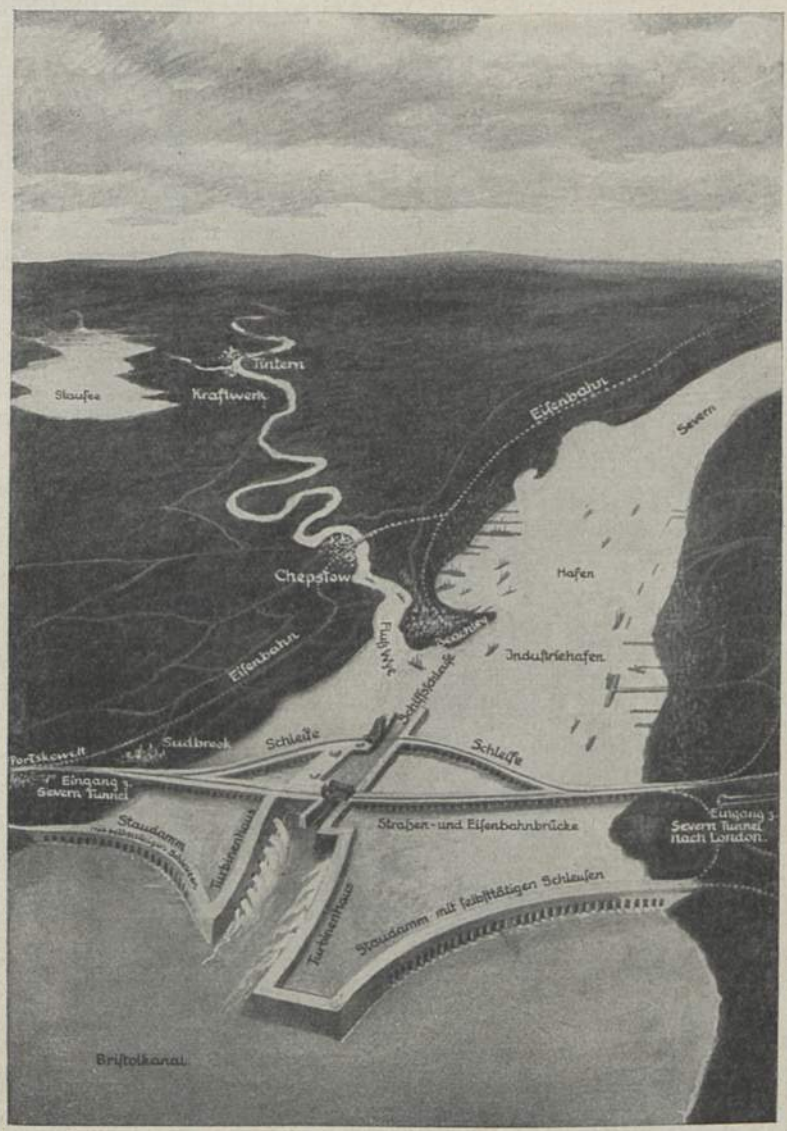
7. Blick in das Maschinenhaus des Kraftwerks Aufkirchen: Vor den beiden Tonnengewölben die selbsttätigen Geschwindigkeitsregler der in den Boden versenkten, zusammen eine Höchstleistung von 34 200 Pferdestärken liefernden Turbinen. Auf den Gewölben sind die mit den senkrechten Turbinenwellen unmittelbar verbundenen Stromerzeuger aufgebaut. Im Hintergrund hängt noch einer der Rotoren an der Krankette

während der Bedarfsstunden niederführt, nun nach oben. Der Wasserspiegel des Beckens wird wieder auf die Normalhöhe gebracht. Durch diese Ausgestaltung des Murgkraftwerks wird eine Energiewirtschaft mit sehr günstigem Nutzeffekt erzielt.

In einem dritten Ausbau sollen die Wasser der Raumünzach, des Hundsbachs und der Biberach in einem kleinen Zwischenbecken gesammelt werden, das durch einen 5 Kilometer langen Stollen mit dem großen Schwarzenbach-Behälter verbunden wird. Im südlichen Baden wird ferner am Ende der Landessammelleitung das Schluchseewerk errichtet werden.

Eine Hochspeicheranlage mit sehr bedeutender Leistungsfähigkeit ist ferner von schweizerischen Ingenieuren im Waggital in der Nähe des Zürichsees errichtet worden. Von dem Stausee bei Innertal führt ein Stollen das Wasser zunächst 258 Meter hinab zum Kraftwerk Rempen, und weitere 197 Meter tiefer steht die Zentrale Siebnen. Durch das Gesamtgefälle von 458 Metern werden 140 000 Pferdestärken erzeugt.

Das größte bis jetzt von einer Wasserkraftanlage ausgenutzte Gefälle befindet sich im Tal der Rhone oberhalb Martigny. Es beträgt 1630 Meter. In dem Werk arbeiten 4 Pelton-Turbinen von je 3000 Pferdestärken Leistung. Das aus den Düsen strömende Wasser trifft die Schaufeln der Laufräder mit einer Geschwindigkeit von 180 Metern in der Sekunde.




279. Das geplante Flutwerk an der Mündung des Severn in den Bristol-Kanal

Aus Günther, Technische Träume. Verlag Rascher & Cie., Zürich

*

Die Technik von heute hat, wie wir gesehen haben, ausreichende Machtmittel in der Hand, um gewaltige Wassermengen zu zwingen, aus den Turbinen, die man ihnen in den Weg stellt, Millionen von Pferdestärken zu bereiten. Aber diese Leistungen verblassen zu weniger als einem Nichts, wenn man sich überlegt, daß die stärkste der Wasserbewegungen auf der Erde überhaupt noch nicht ausgenutzt wird. Ungeheure Energiemengen wälzt der Erdball täglich in den Gezeiten um sich, und sie gehen für den Menschen noch immer vollkommen verloren.

Der Astronom Bessel und der Physiker-Philosoph Fechner haben, nach einem Bericht Moszkowskis in seinem Buch „Einstein", einmal versucht, für die Kräfte, die beim Wechsel von Ebbe und Flut auftreten, eine vergleichende Anschaulichkeit aufzufinden, die gar nicht überzeugender sein könnte: „An der größten ägyptischen Pyramide haben 360 000 Menschen 20 Jahre zu bauen gehabt, und ihr Inhalt beträgt doch nur etwa den millionsten Teil einer Kubikmeile; vielleicht mißt alles, was die Kräfte des Menschen und alle ihm zu Gebote stehenden Mittel seit der Sintflut bis jetzt von der Stelle bewegt haben, noch nicht eine Kubikmeile. Dahingegen schafft die Erde in ihrer Flutbewegung jeden Vierteltag an 200 Kubikmeilen Wasser aus je einem Viertel des Erdumfangs in den anderen. Hiernach leuchtet es ein, daß alle Kohlenbergwerke der Erde uns vollkommen gleichgültig sein könnten, wenn es uns gelänge, von der Pulskraft der Erde auch nur irgendwelchen Teil für menschliche Betriebe nutzbar zu machen."

Es handelt sich hier um Trillionen von Pferdestärken. Daß diese noch völlig brachliegen hat seine Ursache in der ungünstigen Form, in der die Wasserkraft hier auftritt. Wie wir schon in dem Abschnitt „Die Häfen" in Band III auf Seite 78 gehört haben, ist die Fluthöhe an den Küsten sehr verschieden. Vor der Elbmündung beträgt sie nur 3 Meter, an der französischen Küste fast 12 Meter, und in der Fundy-Bai in Amerika steigt sie auf 15 Meter an. Die großen Gefälle wären willkommene Kraftquellen, wenn sie nicht ausschließlich an Steilküsten aufträten, wo die Schaffung von Speicherbecken zur Zurückhaltung der Flut sehr teuer und nur in ganz besonderen Fällen überhaupt möglich ist.

Wenn man kleine Gefälle nutzen will, ist es besonders unangenehm, daß die Fluthöhe auch an der gleichen Stelle keineswegs dauernd die gleiche ist. Sie wechselt zwischen Springflut und Nippflut täglich so stark, daß im ungünstigsten Fall nur ein Bruchteil der Höchstleistungsfähigkeit zur Verfügung steht. Außerdem ändern die Flutzeiten fortwährend die Stunde ihres Auftretens.

All das zusammen ergibt eine technisch höchst unliebsame Wirkung. Die Gewinnung von Wasserkraft aus den Gezeiten ist nur dadurch möglich, daß man ein großes Becken schafft, in dem das Flutwasser von einer gewissen Höhe an gespeichert wird. Ist das Becken flach, so tritt ein genügendes Gefälle nur im letzten Teil der Ebbe ein; wenn der Boden des Beckens tief liegt, kann man auch das

steigende Wasser zur Beaufschlagung von Turbinen heranziehen. Immer aber treten während des Wechsels der Gezeiten Stunden ein, in denen kein genügender Höhenunterschied zwischen den Wasserspiegeln außerhalb und innerhalb des Beckens vorhanden ist, und diese Stillstandzeiten der Turbinen wechseln fortwährend ihre Lage im Tag. Daher wird wohl immer eine Hilfsanlage notwendig sein.

Deren Schaffung und die Anlage des Beckens, das sehr umfangreich sein und immerwährend durch Baggerungen von eindringendem Schlick befreit werden muß, machen Gezeiten-Kraftwerke sehr kostspielig und vorderhand unmöglich. Einigermaßen günstig liegen die Dinge nur dort, wo eine natürliche Bucht durch einfaches Aufführen eines Abschlußdamms zum Sammelbecken gemacht werden kann. Die Technik bemüht sich, die Nutzung von Ebbe und Flut dadurch zu fördern, daß sie Turbinen schafft, die bei den stark wechselnden Gefällhöhen stets einigermaßen gleichmäßig zu arbeiten vermögen. Schwierigkeiten macht bei der Lösung der Aufgabe niemals das Technische, aber die Wirtschaftlichkeit hat noch keiner nachzuweisen vermocht.

In seinem schon mehrfach erwähnten Werk „Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaus" macht Beck eine treffende Anmerkung. Als am Ende des 19. Jahrhunderts, so sagt er, die Zeitungen berichteten, daß ein Ingenieur den Plan habe, Ebbe und Flut als Kraftquelle zu benutzen und die so gewonnene Kraft in Form von Elektrizität in das Binnenland zu leiten, schien vielen der Gedanke, das periodisch wiederkehrende Steigen und Sinken des Meerwassers als Kraftquelle nutzbar zu machen, als eine ganz neue und höchst geniale Errungenschaft. Aber Beck weist dann nach, daß schon in einem Skizzenblatt, das aus der Zeit der Hussitenkriege stammt, eine Gezeiten-Kraftanlage unverkennbar dargestellt ist. Ein Teich steht durch zwei Kanäle, die durch Schleusen abgeschlossen werden können, mit dem Meer in Verbindung. An dem einen der Gräben, der als Auslauf dienen soll, ist mehrmals bemerkt: Hic molendum. (Hier soll gemahlen werden.)

Und um 1617 schrieb Faustus Verantius, den wir schon auf Seite 18 als Schilderer einer Seilbahn kennengelernt haben: „Wer hat seither das Meer so bezwingen können, daß es Mühlen treibe und zu anderen Bewegungen dienlich sei? Wir glauben, daß dies möglich ist, aber nicht allenthalben, sondern nur an engen Stellen des Meeres. Man muß sich jedoch vorsehen, daß der Ort nicht offen und jeglicher Wellengewalt ausgesetzt sei. Es gibt auch eine andere Art, uns das Meer hierin dienstbar zu machen. Man sollte an dem Gestade einen Teich ausgraben, so hoch, wie das Meer zu wachsen pflegt, damit der Teich sich füllt, wenn das Meer steigt, und Wasser, wenn das Meer wieder fällt, durch Rinnen oder Kanäle abläuft und die Mühlen treibt ..."

Wir sind eigentlich heute nicht weiter, als man damals war. Viele Pläne sind aufgestellt worden, die auf dem Papier vorzüglich aussehen und die letzten Künste der Neuzeit verwenden wollen. Aber immer noch gibt es kein wirklich ausgeführtes Gezeiten-Kraftwerk.

In Deutschland sind jahrelang Entwürfe ausgearbeitet, durchgearbeitet und immer wieder umgearbeitet worden, um derartige Anlagen in der Elbe beim Pagensand oder an der Nordseeküste bei Husum zu errichten. An beiden Stellen ist es niemals bis zum ersten Spatenstich gekommen. Die Engländer beschäftigen sich sehr lebhaft mit dem Unternehmen, die buchtartig sich verbreiternde Mündung des Severn-Flusses in den Bristol-Kanal zu einem Becken auszubauen und mit dessen Hilfe sowie durch eine Nebenanlage dauernd 500 000 Pferdestärken zu erzeugen. Die Fluthöhe beträgt an dieser Stelle im Durchschnitt nicht weniger als 12,6 Meter.

Bild 279 zeigt die großartige Sperranlage, die sich an der Stelle erheben soll, wo der Fluß bereits in einem großen Tunnel von der Eisenbahnstrecke nach London unterfahren wird. Die Schütze in den geschwungenen Dammteilen sollen sich selbsttätig öffnen, wenn die Flut ansteigt, so daß diese das Becken füllen kann. Nachdem dann später der Meeresspiegel während der Ebbe um ein beträchtliches Stück gesunken ist, soll das im Becken aufgestaute Wasser durch die Turbinenhäuser laufen, die in den Damm selbst eingebaut sind, und große Dynamomaschinen zur Versorgung der Umgebung mit Licht- und Kraftstrom antreiben. Während dieser Zeit steht, so sagen die Unternehmer, überschüssiger Strom in so großen Mengen zur Verfügung, daß mittels Pumpwerke gleichzeitig ein Stausee am Nebenfluß Wye aufgefüllt werden kann, der 16 Kilometer von der Severn-Mündung entfernt liegt. Das hier gespeicherte Wasser soll bei seiner Absenkung die Turbinen eines eigenen Kraftwerks beaufschlagen und hierdurch einen zehnstündigen Betrieb der Gesamtanlage während jeden Tags ermöglichen. Zwischen den parallel laufenden Dämmen am Meer, die zugleich Turbinenhäuser sind, wird eine Schleusenanlage vorgesehen, die den Schiffen die Einfahrt in den Severn gestattet.

Auch in Frankreich und in Japan plant man Gewaltiges. Es ist keineswegs unmöglich, daß die eine oder die andere dieser Absichten im Laufe der Zeit verwirklicht wird. Im Kreis der Wasserkraft-Ingenieure wird heute sehr eifrig an der Lösung der Aufgabe gearbeitet, deren Größe nicht zu verkennen ist. Es dürfte endlich doch gelingen, wenigstens einen Teil der Maschinen, deren sich die Menschen bedienen, durch die Erde selbst drehen zu lassen. Denn ihre Bewegung um die eigene Achse ist es ja letzten Endes, die den Gezeitenwechsel verursacht.

# 27. Die Kolbendampfmaschine

Im siebzehnten Jahrhundert herrschte in England bereits eine sehr lebhafte industrielle Tätigkeit. Man wühlte in den Eingeweiden der Erde nach Kohle, die zur Gewinnung der Erze niedergebrachten Schächte wurden immer tiefer eingesenkt, die Eisenbereitung war schon ein bedeutendes Gewerbe, und in vielen Spinnereien liefen die Spindeln um. Das technische Leben der damaligen Zeit entbehrte aber der Frische und Hoffnungsfreudigkeit. Der Körper war nicht gesund. Denn es gebrach ihm an dem wichtigsten Besitztum zur Ausübung schaffender und aufbauender Tätigkeit: es fehlte ihm die ausreichende Antriebkraft.

Für das Ausschöpfen der Gruben, die vom Grundwasser bedrängt wurden, zum Herausschaffen des drunten gewonnenen Guts, für den Betrieb der Blasebälge an den Öfen, zum Bewegen der Hämmer und zum Drehen der Spinnmaschinen hatte man keine anderen Antriebmittel zur Verfügung als menschliche und tierische Kraft sowie das Wasserrad. Das Wirken dieser letzten Kraftmaschine war noch dazu auf die wenigen Orte beschränkt, wo fallendes Wasser zur Verfügung stand, so daß als freizügige, überall aufzustellende Antriebmaschine nur der Göpel (Bild 280) übrigblieb. Bei Benutzung wirklicher Pferdekräfte können aber nicht sehr viele Pferdestärken an einem Ort zusammengedrängt werden. So kam es denn, daß die Besitzer der im Wasser ertrinkenden Bergwerke, das eisengewinnende und eisenbearbeitende Gewerbe sowie die Inhaber der Spinnereien die Hände flehend zum Himmel erhoben und schrien: Herr, gib uns Kraft!

Dem ewigen Hunger der Menschheit nach Gold zu vergleichen ist der Hunger jener Zeit nach Kraft. Viele neue technische Gedanken waren herangereift, die Saat von Jahrhunderten lag bereit zum Aufgehen, aber die fruchtversprechende Pflanze konnte nicht zutage treten, weil ihr die Triebfähigkeit zum Durchbrechen der letzten übergebreiteten Schicht fehlte. Es war ein Harren und Drängen unter dünner Decke — die schließlich barst.

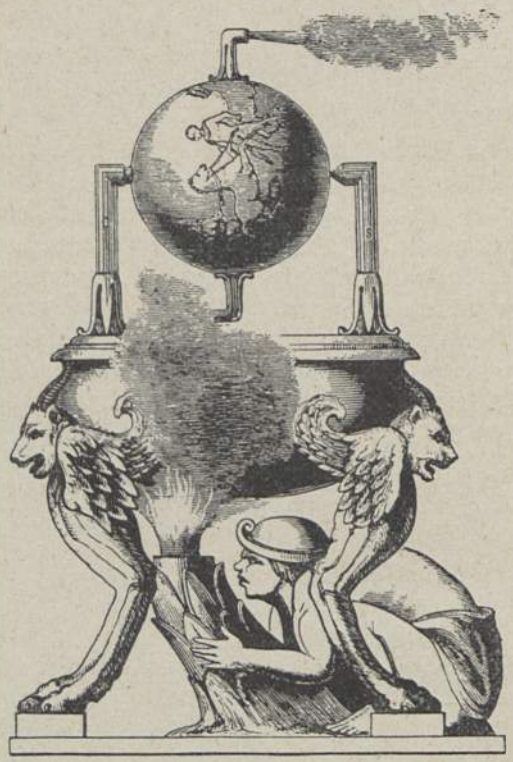
280. Pferdegöpel als Fördermaschine im Bergwerk
Aus Jacob Leupold, Theatrum machinarum hydraulicarum, Leipzig 1724

Denn immer noch, wenn die Menschheit ernstlich mit strebendem Eifer und ohne Ermüden etwas gewollt hat, das im Bereich des Möglichen lag, hat sie es erreicht. Wahrscheinlich ist die Natur in der Lage, alles zu leisten, was das Gehirn des Menschen zu erdenken vermag, der doch selbst ein Kind der Natur ist. Manchmal dauert es nur zehn, manchmal aber auch hundert oder gar tausend Jahre, bis das Ziel erreicht ist, und die seltsamsten Umwege müssen beschritten werden. So ward auch die von allen Übeln befreiende Kraftmaschine erst nach unendlichen Mühen und nach der Beschreitung vieler falscher Pfade geboren. Das konnte auch nicht anders sein, denn sie trat zutage als das Ergebnis einer Mischung von Naturprodukten, von der niemand zuvor ein nutzvolles Wirken zu erhoffen vermochte.

Feuer und Wasser sind Gegensätze, die einander ausschließen wie Gut und Böse oder Hell und Dunkel. Das Wasser vernichtet das Feuer,

die Flamme gibt dem Feuchten rasch den Tod. Wer hätte ahnen können, daß gerade Feuer und Wasser, in einem gemeinsamen Behältnis zusammengesperrt, nur durch eine dünne Wand voneinander getrennt, der Menschheit die mächtigsten Helfer sein würden! Das vom Feuer erhitzte Wasser ist die Quelle der Kraft geworden, nach der die Technik sich so lange und mit solcher Inbrunst gesehnt hatte, ein immer fließender, immer bereiter, überall zu weckender Bronn, der nun schon seit mehr als zwei Jahrhunderten seine Segnungen verbreitet, der die unendlichen Saaten aufgehen ließ.

Auch das kalte Wasser kann Maschinen treiben, die mächtigsten sogar, die es gibt, wie wir aus dem vorigen Abschnitt wissen; aber es wirkt in dieser Weise nur dann, wenn die Natur besonders günstige Ortsverhältnisse zur Verfügung stellt. Der Mensch vermag nicht, an jeder gewünschten Stätte Wasserkraftmaschinen zu betreiben. Das hoch erhitzte Wasser aber, das zu Dampf wird, ist überall bereit, seine unerhörte Gewalt zur Verfügung zu stellen. Nachdem einmal die Zauberformel gefunden worden ist, die den Dampf zum dienstbaren Knecht macht, hat die Menschheit praktisch überall und in jeder gewünschten Fülle Kraft zur Verfügung. Es ist wie im Märchen. Aladin reibt seine Wunderlampe, und der helfende Geist erscheint mit den Worten: „Zur Stelle! Dein Sklave, der zwischen deinen Händen steht, ist gekommen!" Wir entfachen das Feuer im Kessel, und der Sklave Dampf stellt sich, herbeigezaubert, ein, um jegliche Arbeit zu leisten, die wir von ihm verlangen. Er nimmt der Menschheit die niederdrückende Fron ab, die sie sonst leisten müßte und, wie zu Beginn des vorigen Abschnitts ausgeführt wurde, früher tatsächlich geleistet hat.



281. Alte Darstellung der Aeolipile des Heron von Alexandria

Die Öffnungen sind senkrecht zur Bildebene zu denken, da sonst eine Drehung der Kugel unmöglich ist

Die Dampfmaschine war, als sie erschien, praktisch die Alleinherrscherin im Reich der Kraft. Fast zwei Jahrhunderte lang hat sie den Thron in erhabener Einsamkeit innegehabt, und wenn ihr heute auch wirkungsfähige Mitregenten zur Seite stehen, so ist sie doch immer noch unbestritten das Haupt der Familie, dem nicht nur wegen seiner Altehrwürdigkeit die erste Stelle zusteht. Was wir heute Technik nennen, ist erst durch die Dampfmaschine entstanden und konnte erst durch sie hervorgebracht werden, weil Technik ohne ausreichende Kraft so wenig zu bestehen vermag wie das Leben auf der Erde ohne die Sonne.

Die Dampfmaschine erst ermöglichte es dem Menschen, die Schätze des Erdbodens in Fülle zu gewinnen. Sie ließ das Großgewerbe entstehen, sie ward die Mutter des Verkehrs. Die gesellschaftlichen Verhältnisse, in denen wir heute leben, sind von der Dampfmaschine weit stärker beeinflußt worden als von der Gesamtheit aller sozialen Theorien. Jacob Grimm sagte 1863: „Aus der Erfindung der Buchdruckerkunst ist die Freiheit des Glaubens hervorgegangen, wie aus der Erfindung der Dampfkraft die bürgerliche Freiheit hervorgehen muß." Die Dampfmaschine verursachte die Wandlung des selbständigen Handwerkers zum Arbeiter, und es ist hier nicht die Stelle, zu entscheiden, ob das für die Menschheit ein Segen oder ein Fluch geworden ist.

Das Recht auf die Dankbarkeit aller aber hat sich die Dampfmaschine unzweifelhaft erworben durch die erstaunliche Verbesserung der Lebenshaltung, deren Ursache sie ist. Wenn wir heute die Bodenerzeugnisse aller Länder der Erde zu unserer Nahrung verwenden können, wenn selbst der einfache Mann in einem Haus wohnt, dessen Einrichtung unvergleichlich hoch über den Ausstattungen der Paläste früherer Jahrhunderte steht, wenn die ärmste Frau Kleider zu tragen vermag, die früher keiner Königin erreichbar waren, so hat das alles seine Ursache in unserem Besitztum an Kraft, das bis vor kurzem ganz allein aus der Dampfmaschine floß.

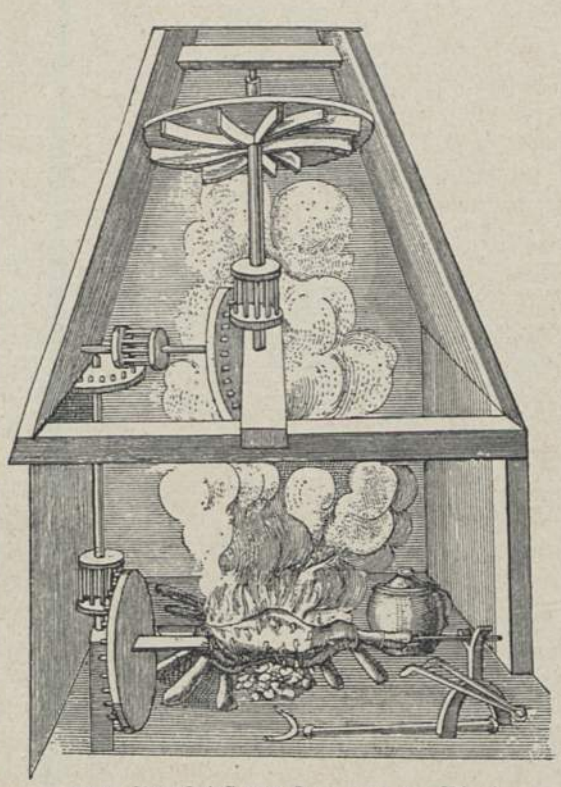
Ohne sie wäre uns die Erde nicht durch die Eisenbahn und das Schiff erschlossen worden, das Buch könnte nicht als Scheidemünze der Bildung überall umlaufen, wir wären nicht imstande, in den Städten so ausgezeichnete gesundheitliche Verhältnisse zu schaffen, wie Wasserleitung und Kanalisation sie überall ermöglichen. Unsere Nächte lägen noch immer im Dunkeln, wir müßten zur kalten Jahreszeit frieren, gäbe es nicht die Dampfmaschine, mit deren Hilfe allein Kohle in Massen aus dem Boden geholt werden kann. Ja Millionen unserer Zeitgenossen wären gar nicht zur Welt gekommen, wenn nicht vor ihnen dieses Höchstwerkzeug der Technik geboren worden wäre. Denn stünden uns nicht die gewaltigen Kraftmengen zur Verfügung, um der Natur Genügendes für den Lebensunterhalt abzuringen, es könnten längst nicht so viele Menschen auf der Erde leben, wie diese heute trägt. Hierbei gehen wir wiederum über die philosophische Frage hinweg, ob es für die Millionen wirklich ein Glück ist, daß sie geboren wurden.

Wenn das kalte Wasser kraftspendend wirken soll, braucht es ein Gefälle. Die mit hoch erhitztem Wasser arbeitende Kraftmaschine fordert, wenn sie nutzvoll arbeiten soll, ebenfalls ein Droben und Drunten. Es ist aber keine körperliche Höhenverschiedenheit, die hier wirksam wird, sondern eine physikalische Zustandsdifferenz: das Wärmegefälle.

Indem durch Entfachen eines Feuers unter dem Dampfkessel die Temperatur des darin eingeschlossenen Wassers weit über die Wärmegrade der Umgebung gesteigert wird, geschieht, theoretisch-mechanisch angesehen, dasselbe, wie wenn kaltes Wasser hoch empor gepumpt wird. Die Wärme des Kesselwassers kann auf die Temperatur der Umgebung hinabstürzen, und die Dampfmaschine ist eine Vorrichtung, die es ermöglicht, aus diesem physikalischen Wasserfall Arbeit zu gewinnen. Das Wärmegefälle hat nun den außerordentlichen Vorzug, daß es überall mittels Brennstoffe hervorgerufen werden kann, die sich leicht heranschaffen lassen. Die Dampfmaschine besitzt also vollkommene Freizügigkeit, und das ist eine der Haupturſachen ihrer unvergleichlichen Nutzwirkung.

Es kommt hinzu, daß die Vorrichtung heute für jede beliebige Leistung hergestellt werden kann, daß sie höchste Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit besitzt. Eine gut gebaute Dampfmaschine stellt nur sehr geringe Ansprüche an die Bedienung. Läuft doch die ungemein hart beanspruchte Lokomotive stundenlang in Staub und Ruß, ohne daß die bewegten Teile für die Mannschaft erreichbar sind, arbeitet doch die Riesenschiffsmaschine zehn Tage lang ohne Unterbrechung, bis der Weg von Hamburg nach New York zurückgelegt ist.

Die Schmiegsamkeit der Dampfmaschine ist erstaunlich. In rasendem Umlauf treibt sie die Dynamo, mit äußerster Langsamkeit treibt sie große Pumpmaschinen. Als Fördermaschine im Bergwerk erlaubt sie ein so rasches Abstoppen mitten im geschwinden Lauf, daß die Plattformen der Förderkörbe genau vor der Dielung der Hängebank oder der Sohle des Stollens stehen bleiben, im Walzwerkbetrieb läßt sie Tausende von Pferdestärken jetzt in der einen, im nächsten Augenblick in der anderen Richtung wirken. Sie geht unter voller Belastung ebensogut an wie beim Leerlauf. Es gibt keine zweite Kraftmaschine, die alle diese hervorragenden Eigenschaften in sich vereinigt.

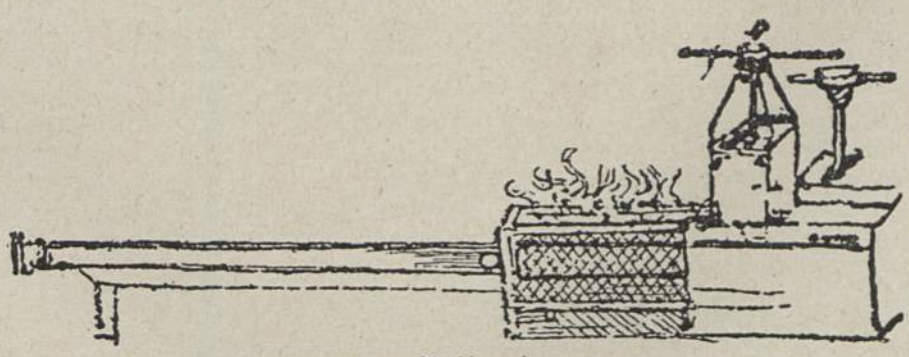


282. Bratspieß des Leonardo da Vinci
Die Abgase des Herdfeuers sollten den Bratspieß drehen. Aus Jacob Leupold, Theatrum machinarum generale, Leipzig 1724

Und dennoch ist es seltsam, ja für die Technik beschämend, daß die Dampfmaschine die vor allen bevorzugte Stellung hat. Denn sie besitzt einen Charakterfehler, sie leidet in ärgster Weise an der Verschwendungssucht. Für jeden Freund der Technik ist es ein Augenblick höchsten Erstaunens, ja der Niederschmetterung, wenn er zum erstenmal hört, daß der vielgepriesene Krafterzeuger von der ihm zugeführten Wärme-Energie im Durchschnitt nur gerade 12 v. H. als nutzbringende Arbeit wiedergibt, während 88 v. H. unwiederbringlich verlorengehen. Kopfschüttelnd wird der also Belehrte inne, daß er die Dampfmaschine mit einem Menschen vergleichen muß, der von jedem Hundertmarkschein, den er verdient, nur 12 Mark nutzt, während er die übrigen 88 Mark vergeudet. Man möchte das nicht glauben, und es bricht sofort die Frage hervor: ist denn das nicht zu ändern?

Es ist nicht zu ändern. Die Dampfmaschine hat in ihrer Entwicklungszeit eine weite Wanderung über endlose Strecken zurückgelegt, die ständig aufwärts führten. Aber alle Verbesserungen haben nur zu bewirken vermocht, daß der Nutzeffekt in ganz besonders günstigen Fällen über 14 v. H. gestiegen ist. Wir werden später, wenn wir alle Einzelteile einer neuzeitlichen Dampfmaschinenanlage kennen, am Ende des nächsten Abschnitts, eine Energiebilanz über sie aufmachen, und es wird sich daraus klar ergeben, daß die Verlustquellen nach unserem heutigen Wissen und Vermögen nicht verstopft werden können. Auch von der Zukunft ist eine Besserung nicht zu erhoffen, denn nach allgemeinem Glauben sind nur noch geringfügige Vervollkommnungen, aber keine grundsätzlichen Verbesserungen der Dampfmaschine mehr möglich.

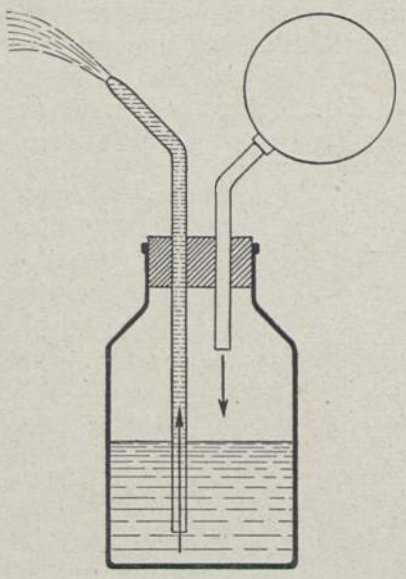
Aus diesem Grund sind ihr in den letzten Jahrzehnten erfolgreiche Wettbewerber in anderen Wärmekraftmaschinen erstanden. Die Gas- und die Ölmaschine erreichen gleichfalls bei weitem nicht den Wirkungsgrad der Wasserkraftmaschine, der, wie wir hörten, bis auf 85 v. H. hinaufgeht, aber sie bringen es doch wenigstens zu einem Nutzeffekt von 35 v. H. Die neueren Wärmemotoren sind insbesondere deshalb bessere Wirtschafter, weil bei ihnen das Kraftmittel nicht in einem gesonderten Gefäß, einem abgetrennten Kessel, erzeugt wird, sondern im Zylinder, also an der Wirkungsstätte selbst entsteht. Die aus dem Brennstoff entwickelte Wärme kommt sogleich und ohne Zurücklegung eines Wegs zur Wirkung, so daß sie weit weniger als bei der Dampfmaschine Gelegenheit hat, einen Teil des ihr innewohnenden Leistungsvermögens nach außen zu strahlen. Die schlimmsten Verschwendungsstätten der Dampfmaschine sind der Kondensator, die großen Flächen der Kesselwandungen und der Schornstein. Die Gas- und die Ölmaschine kennen dieses Beiwerk nicht. Ihr Bau ist aber sehr verwickelt, die Herstellung der vielen recht empfindlichen Einzelteile teuer. Diese Krafterzeuger bedürfen sorgfältiger Aufsicht und sind längst nicht in dem Maß schmiegsam wie die Dampfmaschine. Daher wird die Führerin des Geschlechts der Wärmekraftmaschinen von ihnen nur in bestimmten Bezirken verdrängt.



283. Architronito
Nach der Skizze von Leonardo da Vinci

Vor 175 Jahren schrieb ein Schriftsteller: „Man braucht ein Eisenbergwerk, um eine Dampfmaschine herzustellen, ein Kohlenbergwerk, um sie zu betreiben!" Gegenüber den klotzigen Ungetümen der damaligen Zeit, die ihre Bewegungen mit äußerster Langsamkeit und größter Vorsicht ausführten, sind die heutigen Dampfmaschinen wahre Wunderwerke mit der Zierlichkeit ihres Baus und der Eleganz ihrer Schnellbewegungen. Das Gewicht des verwendeten Eisens, auf die geleistete Nutzpferdestärke bezogen, ist heute sicherlich auf den hundertsten Teil verringert, an

Brennstoff ist nur noch ein Dreißigstel aufzuwenden, und doch bestehen die Riesenposten auf der Verlustseite. Selbst die neueste Gattung der Dampfmaschinen, die an Stelle der hin und her gehenden sogleich drehende Bewegung liefert, die Dampfturbine, hat in dieser Hinsicht keine grundlegende Besserung gebracht. Da im technischen Bezirk mehr und mehr die Wirtschaftlichkeit in den Vordergrund tritt, erscheint es daher als eine der wichtigsten Aufgaben der Ingenieurkunst, eine einfache, freizügige, jeder Forderung sich anpassende Maschine zur Kraftbereitung auf einem ganz neuen Weg zu finden. Vorläufig ist noch nicht im geringsten zu erkennen, welche Richtung zur Erreichung dieses hohen Ziels wird eingeschlagen werden müssen. Es bleibt uns einstweilen nichts anderes übrig, als die Verluste bis zum Austritt des Kraftmittels aus der Maschine zu verringern und die Abwärme im Abdampf oder in den Abgasen möglichst noch zu anderen Zwecken zu verwenden (Heizen, Trocknen, Kochen, Vorwärmen usw.).



284. Wirkungsweise des Heronsballs

Im Elektromotor besitzen wir zwar eine fast ideale Kraftlieferungsmaschine, aber er ist nicht selbständig, sondern bedarf der Zufuhr von außen — und zwar durch eine Wasserkraft-, Dampf-, Gas- oder Ölmaschine. Deshalb ist diese Abteilung des vorliegenden Werks nicht der Platz zur Betrachtung seines Baus und seiner Eigenschaften.

*

Aus der Geschichte der Dampfmaschine ist eine Episode allgemein bekannt und wohl auch in vielen Schulbüchern zu finden. Der Knabe James Watt hilft seiner Mutter bei Küchenarbeiten, und es fällt ihm hierbei auf, daß der Dampf, der aus dem Teekessel steigt, den aufgelegten Deckel lustig klappern läßt. James ist ein unheimlich kluges Kind, er erkennt aus diesem Vorgang die Spannkraft des Dampfs, und sofort steht die Form einer Maschine, die mit diesem Kraftmittel betrieben werden kann, klar vor seinen Augen.

Die Erzählung ist hübsch, sie hat nur den Fehler, daß sie nicht wahr ist. Niemals, trotz aller gegenteiligen Berichte, ist eine wahrhaft große Erfindung blitzartig mit blendender, alles erleuchtender Helle am technischen Himmel aufgetaucht. Lange, lange Zeit muß das Gewölk sich sammeln, bis endlich der Blitz der Erkenntnis aufzuckt. Die Werdezeit der Dampfmaschine erstreckt sich über Jahrhunderte.

Auf dem Weg, der vom Teekessel bis zu dem Krafterzeuger wirklich brauchbarer Form führte, hat Watt eine so bedeutende Strecke durchschritten wie keiner vor ihm und niemand nach ihm. Aber die Spannkraft des Dampfes war längst bekannt, ehe der große Schotte geboren wurde; vor dem Beginn seines Wirkens liefen bereits Dampfmaschinen, und als er starb, war noch die Arbeit von Geschlechtern notwendig, um nur die unvollkommene Vollkommenheit der heutigen Anordnungen zu schaffen.

Die wirkliche Geschichte der Dampfmaschine ist eine Schiffahrt über das Meer des Irrtums. In grauester Ferne vermutete man ein unklares Ziel, aber kein Kompaß wies die rechte Richtung. Viele kluge Steuerleute mußten den Tod in den Wellen finden, bis einer endlich genau erkannte, wo das gelobte Land lag. Und auch er sah, wie Kolumbus, nicht mehr als das Vorland der neuen Welt.

Bis zu seinem Auftreten lief das Schifflein im Zickzackkurs. Es war gar nicht die Kraft des Dampfs, wodurch die ersten Maschinen der Gattung, die wirklich diesen Namen verdienen, getrieben worden sind. Wohl wurde der Dampf in die Arbeitsgefäße eingelassen, aber nur um einer anderen Macht, dem Druck der atmosphärischen Luft, die Wirkungsmöglichkeit zu schaffen. Die Drehbewegung, die heute eine selbstverständliche Leistung der Dampfmaschine ist, war im Anfang gar nicht ins Auge gefaßt. Es galt bereits als ein sehr stolzer Sieg über die widerstrebende Natur, als eine erschreckend langsam sich vollziehende, hin und her gehende Bewegung erreicht war. Das leicht spielende Kurbelgetriebe von heute hat mit den Maschinenformen der Anfangszeit nicht mehr Ähnlichkeit als ein Luxuskraftwagen mit der Schleife aus Baumzweigen, auf welcher der Höhlenbewohner ein erlegtes Wild zu Tal führte.

Selbst ein Mann von der Genialität James Watts vermochte keineswegs die weit unter ihm beginnende Stufenleiter bis zur Vollendung zu durchlaufen. Es gab schnaufende Kletterer vor ihm und eine noch weit größere Zahl scharf angestrengter Steiger nach ihm. Die Menschheit ist es, nicht ein einzelner Mensch, die, nach einem Ausspruch von Reuleaux, die großen Erfindungen macht.

Aristoteles, dessen hoher Geist die Geheimnisse des Himmels und der Erde zu durchdringen versuchte, der erstaunlich viele Wahrheiten erkannte, als Kind einer frühen

285. Die „Dampfmaschine" von de Caus
Aus Salomon de Caus, Die Ursachen der bewegenden Kräfte, Frankfurt a. M., 1615

Zeit aber auch manchem Irrtum verfallen war, versucht in einer seiner Schriften eine Erklärung des Erdbebens zu geben. Er meint — und sagt damit nichts Unrichtiges — die Erschütterung könne ihre Ursache wohl darin haben, daß große Wassermassen im Erdinneren plötzlich erhitzt und in Dampf verwandelt werden. Der Grieche, der im vierten Jahrhundert vor Christo lebte, weiß also bereits, daß der Dampf eine große Ausdehnungskraft besitzt. Man kann aber trotzdem nicht sagen, daß Aristoteles die Eigenschaften des Wasserdampfs richtig gewürdigt habe. Denn er ahnte durchaus nicht, daß durch Erhitzung des Wassers ein Stoff besonderer Art entsteht. Er hielt ihn für heiße Luft. Diese Anschauung hat sich, wie so vieles, das Aristoteles lehrte, jahrhundertelang erhalten. Die ersten mit Dampf betriebenen Vorrichtungen — Spielzeuge, keine Maschinen — nutzten die Kraft des Dampfs, und man glaubte doch, daß die Luft sie treibe.

Die älteste dieser Vorrichtungen kennen wir aus den Schriften des Heron von Alexandria, der im letzten Jahrhundert vor Christo gelebt hat. Er ist nicht, wie man früher glaubte, der Erfinder all der hübschen und bewundernswerten Dinge, die er schildert, ihm kommt wohl nur das Verdienst zu, die zu seiner Zeit bekannten Erfindungen übersichtlich zusammengestellt zu haben.

In der Schrift „Pneumatica" wird das in Bild 281 dargestellte Gerät erwähnt. Auf dem Deckel eines Kessels, in dem Wasser erhitzt werden kann, ist an Haltern eine metallene Hohlkugel drehbar befestigt. Der eine der Halter ist ein Rohr, das mit einer stopfbüchsenartigen Abdichtung in das Innere der Kugel hineinragt. An dieser befinden sich zwei hakenförmig gebogene Röhren, deren Öffnungen nach entgegengesetzten Seiten gerichtet sind. Der im Kessel erzeugte Dampf steigt durch die Halterröhre in die Kugel, erfüllt diese, strömt durch die Öffnungen der Ansätze aus und versetzt durch den hierbei entstehenden Rückstoß die Kugel in Drehung.

Die älteste der „Dampfmaschinen" schließt also unter kühner Überbrückung von fast zwei Jahrtausenden unmittelbar an die neueste an, denn sie muß ohne Zweifel als Turbine angesprochen werden. Eine Arbeitsleistung konnte allerdings von diesem kleinen Apparat nicht abgenommen werden, da die Reaktionskraft des ausströmenden Dampfs gerade ausreichte, um die Kugel selbst zu drehen.

Vitruv, der in seinem 16 bis 13 vor Christo geschriebenen Werk „De architectura" gleichfalls eine Übersicht der bekannten Maschinen gibt, nennt den Apparat Aeolipile, das ist Windkugel, und so bezeichnen wir ihn noch heute. Zu des Römers Zeit verwendete man nicht mehr einen besonderen Kessel, sondern füllte die Drehkugel selbst mit Wasser und erhitzte sie unmittelbar. Ihr Arbeiten wird von Vitruv in recht unklarer Weise so erklärt:

„Der Wind ist eine strömende Luftwelle mit unbestimmt überflutender Bewegung. Er entsteht, wenn Hitze auf Feuchtigkeit trifft und der Andrang der Erwärmung einen gewaltig wehenden Hauch herauspreßt. Daß dies der Fall ist, kann man an den ehernen Aeolipilen erkennen und so durch künstlich erfundene Dinge die göttliche Wahrheit über die verborgenen Gesetze des Himmels erkennen. Man macht nämlich eherne, hohle Gefäße, die eine möglichst enge Öffnung haben. Durch diese werden sie mit Wasser gefüllt, und dann stellt man sie ans Feuer. Bevor sie warm werden, zeigt sich keinerlei Hauch, sobald sie aber anfangen, sich zu erhitzen, bewirken sie am Feuer ein heftiges Blasen, und so kann man aus diesem kleinen Schauspiel Kenntnis und Urteil über die großen, unermeßlichen Naturgesetze erlangen."

286. Titelseite des Buches Le machine von Giovanni Branca, Rom 1629

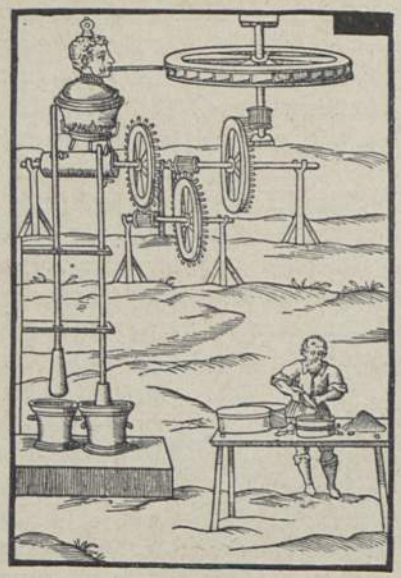
Die Kenntnis und das Urteil, die man in jener Zeit aus der Beobachtung der Aeolipilen über die großen unermeßlichen Naturgesetze erlangte, treffen nicht ganz das Richtige. Denn der „gewaltig wehende Hauch" gilt eben als Luft. Man war also noch in nichts über die Wissenschaft des Heron hinaus gelangt, bei dem zu lesen ist: „Das Wasser, wenn es von dem Feuer umgewandelt wird, geht in Luft über. Die Dämpfe aus erhitzten Tiegeln sind nichts anderes als ausgedehnte Flüssigkeit, die sich in Luft verwandelt hat, denn das Feuer löst alles Dichte auf und wandelt es um."

Während des ganzen Mittelalters erfreute man sich in den Alchimistenstuben und Gelehrten-Laboratorien an dem munteren Laufen der Aeolipilen, deren heftiges Blasen als ein Beweis dafür aufgefaßt wurde, daß jede Umwandlung eines Elements in ein anderes unter erheblicher Kraftaufwendung der Natur vor sich gehe. Infolge der Irrmeinung über die Art des wirkenden Stoffs wurde jahrhundertelang kein Fortschritt erzielt.

Leonardo da Vinci gibt in seinen Schriften neben vielem andern, das die Dampfkraft behandelt, die Darstellung einer Dampfkanone, deren Erfindung er dem Archimedes zuschreibt. Es darf als sicher angenommen werden, daß damit nicht der große Verteidiger von Syrakus gemeint ist, sondern ein wahrscheinlich arabischer Kunstmeister

des vierzehnten oder fünfzehnten Jahrhunderts, der sich nach damaliger Üblichkeit den berühmten Namen beigelegt hatte. Das Gerät selbst, Architronito, d. h. Urdonner, genannt, ist primitivster Art. Leonardos Beschreibung zu seiner auf Bild 283 wiedergegebenen Zeichnung lautet nach Beck:

„Der Architronito ist eine Maschine von feinem Kupfer, welche eiserne Kugeln mit großem Geräusch und vieler Gewalt fortschleudert. Man macht so Gebrauch von dieser Maschine. Ein Drittel des Instruments steht in einer großen Menge Feuer und Kohlen. Wenn das Wasser recht erhitzt ist, wird die Schraube des mit Wasser gefüllten Gefäßes (des Aufsatzes hinter dem erhitzten Teil) niedergeschraubt, und in demselben Augenblick, wo dies geschieht, entweicht das ganze Wasser nach unten, fließt in den erhitzten Teil des Instruments und verwandelt sich sofort in Dampf, der so bedeutend und stark ist, daß es wunderbar ist, die Wut dieses Rauchs zu sehen und das hervorgebrachte Geräusch zu hören."



287. Dampfrad für Stampfmörser

288. Feuerrad für ein Walzwerk

Aus dem Buche Le machine von Giovanni Branca

Die Dampfkanone soll eine Kugel ein Kilometer weit geworfen haben. Aber die von ihr hervorgebrachte Stoßwirkung ist nicht etwas, das auf dem Weg zur regelmäßig arbeitenden Maschine weiterführt.

Leonardo gibt auch eine Vorrichtung an, die nach seiner Meinung geeignet ist, einen Bratspieß, der früher ein sehr viel gebrauchtes Küchengerät war, mittels der Abgase des Herdfeuers zu drehen. Die rasch aufsteigende erhitzte Luft, die ja als Dampf galt, sollte droben die gekrümmten Schaufeln eines Turbinenrads streifen und dieses in Umdrehung versetzen. Es ist freilich nicht anzunehmen, daß der schwer belastete Bratspieß auf Bild 282 in solcher Weise bewegt werden könnte.

Alle diese Apparate sind nur Zierblumen im weiten Garten der Technik. Der Anbau von Nutzpflanzen, die in der Absicht gezüchtet werden, den heißen Hunger nach Kraft zu stillen, beginnt nicht vor dem siebzehnten Jahrhundert. Aber die Kunstfertigkeit der ersten Gärtner, die in dieser Absicht walteten, ist gering. Es gelingt ihnen nicht, die eingesetzten Pflänzchen zum Fruchttragen zu bringen. Der berühmte französische Physiker Arago hat in einer seiner Schriften seinen Landsmann Salomon de Caus mit übereiltem Enthusiasmus als den Erfinder der Dampfmaschine bezeichnet. Die technische Geschichtsschreibung hat dieses Urteil nicht zu dem ihren gemacht. Denn jener Mann hat wohl bemerkenswerte Absichten gehabt, aber nicht die Kraft besessen, sie praktisch durchzuführen.

Salomon de Caus wurde wahrscheinlich im Jahre 1576 zu Dieppe in der Normandie geboren. Er war, was zu unserem eben ausgeführten Bild vorzüglich paßt, Gartenbaukünstler und Architekt, der zuerst als Beamter Ludwigs XIII. von Frankreich gearbeitet hat. Eine Reise durch England führte ihn an den Hof des Prinzen von Wales, dessen Tochter Elisabeth ihn in ihre Dienste nahm. Als die Prinzessin die Gattin des Kurfürsten Friedrich V. von der Pfalz wurde, folgte er ihr an den Hof nach Heidelberg. Es wird angenommen, daß er hier den Elisabethbau des Schlosses entworfen und ausgeführt hat.

1615 ließ de Caus in Frankfurt am Main ein Werk erscheinen mit dem Titel „Die Ursachen der bewegenden Kräfte bei verschiedenen ebenso nützlichen wie interessanten Maschinen". Hierin gibt er auch eine Vorrichtung (Bild 285) an, die dazu dienen soll, Wasser durch Feuerkraft zu heben. Die Beschreibung lautet im Deutsch unserer Tage:

„Nimm eine kupferne Kugel A, die überall wohl verwahrt und verlötet ist. Daran sei ein Zapfen D seitlich in der Wandung, durch den man das Wasser hineinbringt. Von oben gehe eine Röhre BC beinahe bis auf den Boden der Kugel hinab. Fülle diese Kugel mit Wasser, mache den Zapfen wohl zu und stelle sie auf ein Feuer, so wirst du sehen, wie die Hitze das Wasser in die Höhe treibt."

Dies ist die einzige „Dampfmaschine", die de Caus ersonnen hat. Zur ständigen Hebung von Wasser ist die Vorrichtung nicht geeignet, da die Kugel ja nach jeder Entleerung vom Feuer genommen und neu gefüllt werden muß. Aber auch der Grundgedanke rührt nicht von dem Franzosen her, denn vor ihm hat schon Giambattista della Porta aus Neapel „ein Gefäß, das Wasser fortschleudert" von ganz ähnlicher Art beschrieben. Der Italiener lehnt sich hierbei eng an den alten Heron an. Jeder Gymnasiast hört in der Physikstunde von dem Heronsball (Bild 284), einem Glasgefäß, durch dessen Stöpsel eine fast bis zum Boden reichende und eine zweite kurze Röhre gesteckt sind. Bläst man in die letzte hinein oder drückt den aufgesetzten Ball, dann spritzt das Wasser infolge der Luftpressung aus der anderen heraus. In den „Pneumatica" sagt Heron bereits: „Wenn du aber ohne Heranziehung der Luft das Wasser in die Ferne schleudern willst, erhitze den Boden des Gefäßes eine Zeitlang." Dann bildet sich nämlich im oberen Teil Dampf, dessen Druck, wenn nur die lange Röhre durch den Deckel geht, ebenso wirkt wie vorher die eingeblasene Luft.

De Caus hat also die Welt nicht um etwas grundsätzlich Neues bereichert. Sein Anteil an der Förderung der Dampfmaschine ist um so geringer zu veranschlagen, als er noch völlig in den physikalischen Anschauungen des Aristoteles befangen ist. Anschließend an dessen Definition der vier Elemente Feuer, Wasser, Luft und Erde sagt er: „Das Feuer ist ein Element, das leuchtend, heiß, trocken, leicht ist und durch seine Hitze große Gewalt ausübt." Zum Beweis dieser letzten Fähigkeit führt er feuerspeiende Berge sowie Kanonen an und beschreibt darauf die Sonnenmaschine, die wir auf Seite 102 besprochen haben. Die Luft ist nach de Caus „ein Element, das trocken und leicht ist, das zusammengedrückt werden kann und alsdann große Gewalt ausübt". Der Luft allein schiebt er die Wirkung seiner

Der Magdeburger Bürgermeiſter Otto von Guericke beweiſt zu Regensburg (1654) die Stärke des Luftdrucks. Acht Paar Pferde ſind nicht imſtande, die luftleer gepumpten Halbkugeln auseinanderzureißen

Aus Ottonis de Guericke, Experimenta Nova Magdeburgica de vacuo Spatio. Amſterdam 1672

Spritzkugel zu, er weiß noch nicht, daß der Wasserdampf ein physikalischer Körper eigener Art ist.

Arago ist zu seiner Überschätzung der Arbeiten des Normannen hauptsächlich deshalb bewogen worden, weil er auf Grund von Mitteilungen, die sich später als gefälscht herausstellten, annahm, daß de Caus seiner himmelstürmenden Gedanken wegen als Märtyrer gestorben sei. Es wurde nämlich erzählt, daß der Kardinal Richelieu ihn wegen der Tollheit seiner Ideen in dem Irrenhaus Bicêtre bei Paris habe einkerkern lassen, das er nicht mehr verlassen durfte. Die geschichtliche Forschung hat aber nachgewiesen, daß de Caus, nachdem er 1619 nach Frankreich zurückgekehrt war, dort im Jahre 1626 unter keineswegs ungewöhnlichen Umständen gestorben ist.

In Aragos Büchern findet sich auch der folgende Bericht über eine eigenartige Ausnutzung der Dampfkraft in den Wäldern der alten Germanen:

„Die natürlichen wie die künstlichen Kräfte sind fast stets, bevor sie den Menschen von tatsächlichem Nutzen waren, in den Dienst des Aberglaubens gestellt worden. Die Geschichtsbücher berichten, daß an den Ufern der Weser der Gott der alten Teutonen diesen hin und wieder sein Mißfallen durch eine Art von Donnerschlag zum Ausdruck brachte; unmittelbar darauf erschien eine Wolke, die den heiligen Hain erfüllte. Das Erzbild dieses Gottes ‚Püsterich', das Ausgrabungen zutage gefördert haben, zeigt deutlich, in welcher Weise sich jenes Wunder vollzog. Das Götterbild bestand aus Metall. Der Kopf war hohl und enthielt ein mit Wasser gefülltes Gefäß. Holzpfropfen verschlossen den Mund des Gottes und ein oberhalb der Stirn angebrachtes Loch. Glühende, an geeigneter Stelle der Kopfhöhlung gelagerte Kohlen erwärmten allmählich das Wasser. Alsbald trieb der erzeugte Dampf mit lautem Krachen die Pfropfen heraus, ergoß sich in zwei Strahlen nach außen und bildete zwischen dem Götterbild und den erschrockenen Andächtigen einen dichten Nebel." (Nach der Übersetzung von Geitel.)

Ein solcher Püsterich sollte als Treibmittel bei der Vorrichtung dienen, die den nächstfolgenden Merkstein am Rand des Wegs zur Dampfmaschine bildet. Giovanni Branca, der zu der Zeit, als de Caus in Heidelberg wirkte, Architekt der Santa Casa in Loretto war, ließ 1629 zu Rom ein Buch „Le machine" erscheinen, das sehr anschauliche Abbildungen enthält. Der hübsch gezeichnete Titel schon (Bild 286), auf dem Vitruv und Archimedes als Patrone der nachfolgenden Ausführungen dargestellt sind, läßt neue tüchtige Gedanken erwarten. Und in dieser Hoffnung wird der Leser auch nicht enttäuscht.

289. Edward Somerset, Marqueß of Worcester
Nach dem Gemälde im Science Museum, Kensington-London

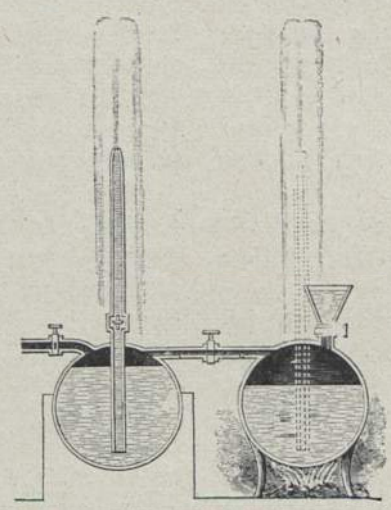
Branca hat das auf Bild 287 dargestellte Dampfrad ersonnen, gegen dessen Schaufeln ein geheizter Püsterich den Strahl seines Mundes bläst. Die Schraube auf dem Haupt verschließt die Eingußöffnung für das Wasser. Branca hat ganz klar vorausgesehen, wie eine Turbine grundsätzlich gebaut werden muß. Statt des schwächlichen Rückstoßes bei Herons Aeolipile will er den weit kräftigeren Aufprall des Dampfstrahls unmittelbar benutzen. Das ist sehr klug und gut. Als de Laval und Parsons fast drei Jahrhunderte später die Dampfturbine wirklich schufen, taten sie im Grund gar nichts anderes.

Leider aber sind die Schaufelform und die Art der Dampfzuführung bei Branca durchaus unzureichend. Der Hauch des Püsterichs wäre keinesfalls imstande, die vielen Übertragungsräder und endlich die Walze zu bewegen, die mittels Hebedaumen die schweren Stampfer für die Mörser wechselnd anheben soll. Die schöne Erfindung mußte daher auf dem Papier bleiben, ohne Wirklichkeit zu werden, als ein Beweis unter vielen für die besonders im technischen Bereich geltende Wahrheit des Schillerschen Worts: „Leicht beieinander wohnen die Gedanken, doch hart im Raume stoßen sich die Sachen."

Ein noch weniger ausreichendes Kraftmittel wollte Branca zum Antreiben eines Metall-Walzwerks verwenden, das doch wahrlich zu seinem Betrieb eine sehr erhebliche Arbeitsaufwendung erfordert. Er setzt ein Schaufelrad in die Esse eines Schmiedefeuers (Bild 288) und hofft, daß die aufsteigende Heißluft es in Bewegung setzen werde. Was schon bei der Bratspieß-Turbine des Leonardo sehr unwahrscheinlich ist, muß hier als Unmöglichkeit bezeichnet werden.

Im Jahre 1630 wird dem Engländer David Ramsey das erste Patent erteilt, das sich auf eine Dampfmaschine bezieht. Der Gedanke ist darin so unklar entwickelt, daß man nicht recht weiß, was der Patentnehmer eigentlich ausführen wollte. 33 Jahre später erscheint die Schrift eines Mannes, der gerade wie de Caus eine abenteuerliche Erscheinung ist, der von den einen als der Erfinder der Dampfmaschine in den Himmel gehoben, von den anderen als Prahler und Schwätzer sehr gering eingeschätzt wird. Wenn das literarische Gerümpel weggeräumt ist, das dieser Mann absichtlich oder unabsichtlich um sein Wirken getürmt hat, bleibt schließlich wieder nichts anderes übrig als die Erkenntnis, daß er den Heronsball, freilich mit einer nicht unwichtigen Vervollkommnung für die praktische Nutzbarkeit, zum soundsovielten Male erfunden hat.

Edward Somerset, Marqueß of Worcester (sprich Wußter, Bild 289), war ein Gegner des großen Cromwell. Als dieser zur Macht gelangt war, ging Worcester 1648, nachdem seine Besitztümer eingezogen worden waren, nach Frankreich. Vier Jahre später kehrte er mit einem politischen Auftrag nach England zurück und wurde dort im Tower gefangen gesetzt. Drei Jahre brachte er hinter Kerkermauern zu, und diese Zeit unfreiwilliger Muße benutzte er, um die Ergebnisse vieler mechanischer Versuche, die er von früher Jugend her angestellt hatte, niederzuschreiben. Er nannte das Buch, das voller Schwulst und insbesondere wegen des Mangels zeichnerischer Erläuterungen überreich an Unklarheiten ist, „Ein Hundertvoll der Namen und Beispiele solcher Erfindungen, von denen ich mich erinnern kann, daß ich sie versucht und vervollkommnet habe" und widmete es dem englischen König sowie dem Parlament.




290. Einrichtung des Dampfspringbrunnens von Worcester

Die 68., die 98. und 99. der Erfindungen betreffen bereits Vorrichtungen zur Wasserhebung mittels Dampfs. Unter Nummer 100 heißt es alsdann (in der Übersetzung von Geitel):

„Durch das merkwürdige Hilfsmittel, das die beiden zuletzt genannten Erfindungen darbieten, ist nun von mir nach jahrelangem Arbeiten ein Wasserwerk ausgeführt worden, mit dessen Hilfe mit der Kraft eines Kindes eine unglaubliche Menge Wassers 100 Fuß hoch gehoben werden kann, und zwar sogar in einem Rohr von zwei Fuß Durchmesser. Und dies geht so natürlich vor sich, daß die Maschine noch nicht einmal in dem benachbarten Raum gehört wird, und so leicht und einfach, daß, wenn die Maschine selbst während eines ganzen Jahrs Tag und Nacht in Tätigkeit wäre, die Reparaturen noch nicht 40 Schillinge kosten und keinen Tag erfordern würden.

„Ich kann daher diese Maschine mit Kühnheit das bewundernswerteste Werk der ganzen Welt nennen. Sie vermag nicht nur mit kleinem Aufwand alle Sorten von Bergwerken zu entwässern, sondern auch selbst hochgelegene Städte mit Wasser zu versorgen. Hierbei läßt sie das Wasser durch die Straßen laufen und übernimmt demnach auch das Amt der Straßenreiniger. Auch liefert sie den Einwohnern für ihre Privatzwecke Wasser in genügender Menge. Sodann versorgt sie Flüsse mit derartigen Wassermassen, daß sie schiffbar sind und bleiben von einer Stadt zu anderen.

„Und so hebt sie die Verhältnisse mit vermehrtem Vorteil, Nutzen, Bewunderung und Stetigkeit. Daher glaube ich denn wohl auch mit Recht, daß durch diese Erfindung meine Arbeiten gekrönt werden, und daß sie mich für alle meine gehabten Aufwendungen entschädigen wird, so daß ich nicht mehr gezwungen bin, meine Gedanken auf weitere neue Erfindungen zu richten.

„Hiermit ist das Hundert voll, und ich will den Leser nicht weiter ermüden, denn ich habe die Absicht, der Nachwelt ein Werk zu schenken, in dem unter allen den behandelten Kapiteln angegeben werden soll, wie die genannten Erfindungen ausgeführt werden können, und zwar unter Beifügung von Kupferstichen.

In bonum publicum.
In Majorem Dei Gloriam."

Am 3. Juni 1663 wurde dem Marqueß of Worcester ein Patent auf eine Wasserhebemaschine erteilt. Schon vorher hatte er in Vauxhall das Modell eines Dampf-Springbrunnens aufgestellt, dessen theoretische Gestaltung Bild 290 zeigt. Die Kugel der rechten Seite wird beheizt und der Dampf in die andere Kugel geleitet, wo er das Wasser durch ein Rohr emportreibt. Hierauf wird das Arbeitsgefäß vom Dampferzeuger abgesperrt, durch das seitlich angesetzte Rohr neu gefüllt, und das Verfahren beginnt von neuem. Damit während der Zeitdauer der Füllung keine Pause eintrat, konnte auch der Dampferzeuger als Heronsball benutzt werden. Es scheint, daß sogar eine richtige Fördermaschine solcher Art im Betrieb gewesen ist. Sie bestand aus einem besonderen Dampfkessel und zwei Heronsbällen de Caussche Art, so daß dauerndes Heben von Wasser ohne Entleerung des Dampferzeugers möglich war. Die Unvollkommenheit auch dieser Einrichtung war jedoch so groß, daß sie zu praktischer Anwendung nicht gelangte.

Die Mitwelt dachte nicht ebenso über die Erfindung des Marqueß wie dieser selbst, unter dessen Niederschriften sich das folgende Dankgebet findet:

„O unendlicher und allmächtiger Gott, Deine Barmherzigkeit hat keine Grenzen. Deine Weisheit ist unermeßlich und unerschöpflich. Ich danke Dir zuerst, daß Du mich erschaffen und mir Heil hast widerfahren lassen. Dann aber sage ich Dir aus dem Innersten meines Herzens demütigen Dank dafür, daß Du mir Einsicht in ein Geheimnis vergönnt hast, das so groß und für alle Menschen so wertvoll ist wie meine Wasserhebemaschine. Bewahre mich nun davor, o Herr, daß meine Kenntnis dieser und vieler seltenen und unvergleichlichen Erfindungen, Einrichtungen und Versuche mich aufgeblasen mache, sondern züchtige mein hochmütiges Herz, indem Du mich meine unwissende schwache und unwürdige Natur erkennen lässest, die von allem Bösen versucht wird!"

Dieser Wunsch nach Züchtigung ist in Erfüllung gegangen. Der Erfinder des „bewundernswertesten Werks der ganzen Welt" starb in Armut, und auch seiner Witwe gelang es trotz lebhafter Bemühungen nicht, die Maschine nützlicher Verwendung zuzuführen. Es ist recht unwahrscheinlich, daß sie wirkliche Arbeit hätte leisten können.

Nach dem Marsch über fast zwei Jahrtausende hinweg sind wir also nicht viel weiter als am Anfang. Immer neue Kämpfer treten an, um den Vormarsch zu erzwingen, sie glauben auch weiter zu kommen, tatsächlich aber hält eine unsichtbare Macht sie stets an demselben Ort. Das Phantom, von dem diese bannende Wirkung ausgeht, ist der Geist des Aristoteles. Es ist eine der seltsamsten Erscheinungen in der Geschichte der Wissenschaften, daß die gedanklichen Großtaten dieses Manns die schlimmsten Hemmnisse des Fortschritts für Jahrhunderte gewesen sind.

Als die Ideen des Aristoteles eben erdacht und neu waren, konnten sie als erfrischende Speise genossen werden. Sie mußten aber schal und verdorben sein, als das Mittelalter und auch noch die neuere Zeit sie immer wieder aus verrosteten Konservenbüchsen hervorholten. Solange es ein Glaubenssatz war, daß es in der Natur nur die vier Aristotelischen Elemente geben könne, solange also ein Unterschied zwischen Wasserdampf und Luft nicht gemacht wurde, konnte eine brauchbare Dampfmaschine nicht entstehen. Es war ferner

Voraussetzung hierfür, daß man endlich von der auf des Aristoteles Meinung zurückgehenden Anschauung loskam, das Wasser steige deshalb in Pumpenrohren empor, weil die Natur einen Abscheu vor dem Leeren besitze. Der Glaube an den Horror vacui mußte überwunden werden, denn vor dem fernen Gipfel, der die echte Dampfmaschine trug, lagerte ein Vorberg, auf dessen Rücken zunächst die mit Luftdruck arbeitende Maschine aufzusuchen war.

Um die Mitte des siebzehnten Jahrhunderts erkannte van Helmont endlich, daß der Wasserdampf andere Eigenschaften besitze als die Luft, und Torricelli stellte die Gesetze des Luftdrucks auf. Zu Galileis Zeiten hatte man nämlich entdeckt, daß der Abscheu der Natur vor dem Leeren offenbar seine Grenze habe. Höher als zehn Meter konnte man das Wasser niemals emporsaugen, wenn man die Luft darüber auch noch so gründlich fortpumpte. Kühne Köpfe wagten daraufhin anzunehmen, daß Aristoteles sich vielleicht geirrt haben könne, denn diese Begrenzung des natürlichen Horror schien denn doch recht unglaubwürdig.

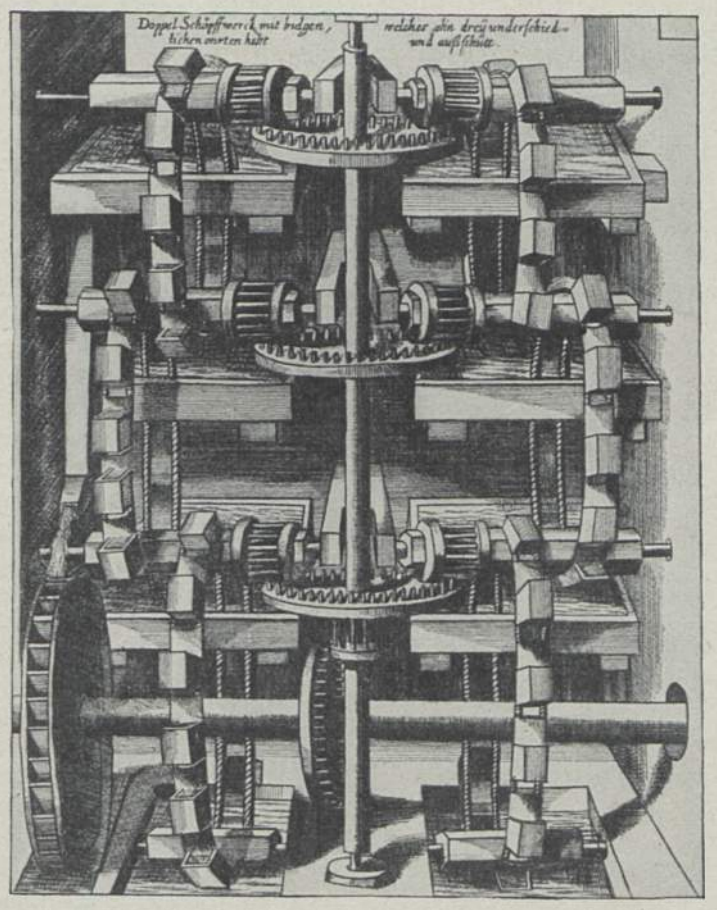
Der Schüler Galileis Torricelli erklärte die Saugwirkung der Pumpe schließlich richtig durch den Druck der Luft auf die freie Oberfläche des Wassers im Brunnen. In Fortführung dieses Gedankens erfand er das Barometer.

Nicht lange nachher wies der Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke durch bedeutsame Versuche die Richtigkeit der neuen Anschauung nach. Bei der berühmten Vorführung vor dem Kaiser Ferdinand auf dem Reichstag zu Regensburg 1654 zeigte er die Stärke des Luftdrucks mit vollster Deutlichkeit, da sechzehn Pferde nicht imstande waren, zwei ausgepumpte Halbkugeln (Tafel XI) auseinander zu reißen.

Nachdem so an die Stelle des starren Glaubens die Forschung getreten war und die schönsten Ergebnisse gezeitigt hatte, war dem Wirken der Männer das Feld bereitet, die der Menschheit endlich das große Geschenk der betriebsfähigen Dampfmaschine darreichen sollten. Der eine von ihnen knüpft immer noch an Heron an und wurde dadurch auf einen Nebenweg geleitet. Er hat aber doch das unsterbliche Verdienst, als erster den Dampf so durch Röhren und Gefäße geleitet zu haben, daß dieser Stoff wahrhaft nutzreiche Arbeit zu leisten vermochte. Der andere bleibt auf der Hauptstrecke, richtet einen Meilenstein auf, der für immer gefestet dasteht, aber ein tragisches Geschick will es, daß erst die Nachfolger den Nutzen aus seiner Gedankenarbeit ziehen.

Unter allen Industrien ist es zuerst der Bergbau gewesen, der sich zu einem Großbetrieb entfaltete. Vor drei Jahrhunderten waren bereits ausgedehnte unterirdische Anlagen geschaffen, um die Erze dem Erdinneren zu entreißen. Nachdem aber die hochliegenden Adern abgebaut waren und tieferes Eindringen notwendig wurde, sah man sich einem unerbittlichen Feind gegenüber. Das Grundwasser drang in die Bauten und hinderte jegliches Vorwärtsdringen. Wenn es nicht möglich war, Abzugstollen anzulegen, mußte man seine Zuflucht zu maschinellen Vorrichtungen nehmen, um das Wasser durch die senkrechten Schächte hinauszuschaffen. Wie unvollkommen solche Einrichtungen damals waren, schildert Conrad Matschoß in seinem grundlegenden Werk „Die Entwicklung der Dampfmaschine", dessen Angaben wir noch an vielen Stellen dieses Abschnitts zu folgen haben werden.

„In Schottland", so sagt Matschoß, „wurden im siebzehnten Jahrhundert vielfach Becherwerke, die von Wasserrädern betrieben wurden, benutzt. Eine Achse mit Kettenrad war quer über den Schacht gelegt; eine endlose Kette, die bis unten zum Stollen reichte, lief über sie weg. Eine Anzahl länglicher Holzkasten war daran befestigt (man nannte die Vorrichtung daher auch Kastenkunst); sie schöpften unten das Wasser ein und gossen es oben in eine Rinne aus. Hatte man für das Wasserrad ausreichendes Betriebswasser, so wurden sämtliche Schöpfkästen an der Kette angebracht; bei geringerer Wasserkraft verringerte man die Zahl. In dieser Weise suchte man sich der verfügbaren Kraftleistung anzupassen.



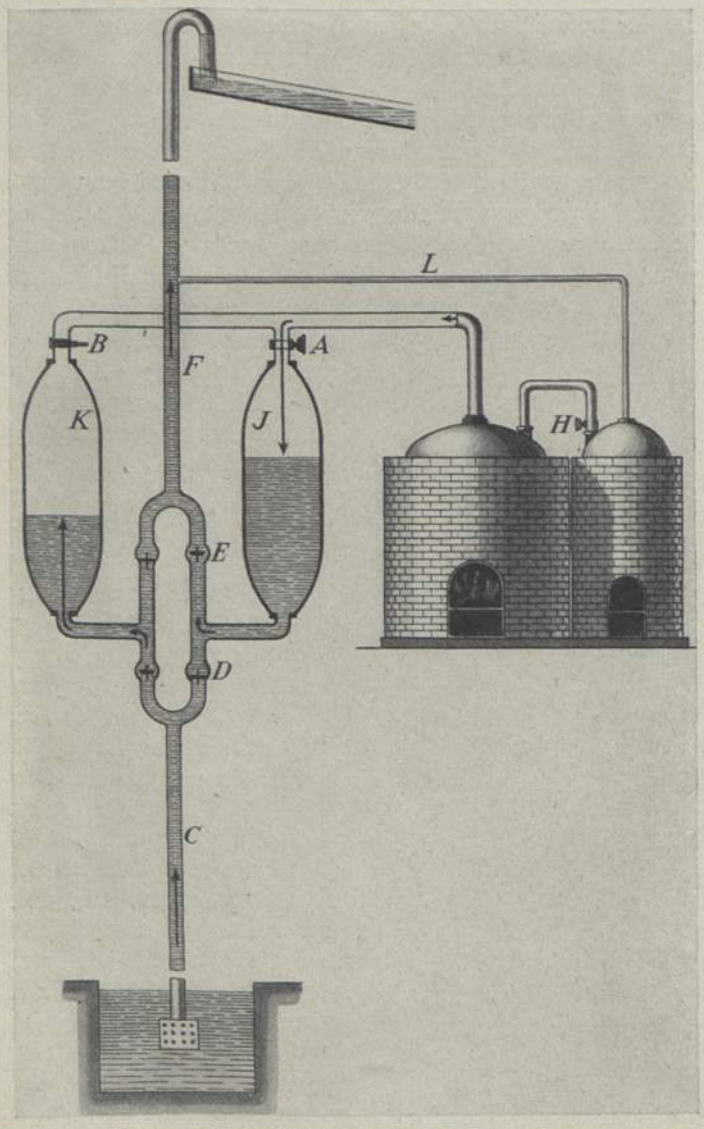

291. „Kastenkunst", durch Wasserrad betriebenes Schöpfwerk in alten Bergwerken
Aus Boeckler, Theatrum machinarum novum, Nürnberg 1703

„Der Wirkungsgrad dieser Vorrichtung war sehr schlecht. Die Ketten schwankten so, daß die Schöpfbehälter höchstens halbvoll nach oben kamen. Das andere Wasser lief an den Ketten und den Schachtwänden entlang wieder in die Tiefe. Außerdem war die Maschine teuer und erforderte viele Reparaturkosten. Die Ketten allein für einen Schacht von 80 Yards (73 Meter) Tiefe kosteten 3200 Mark. Wenn ein einziger Zapfen brach, was oft genug vorgekommen sein mag, stürzten die ganzen Ketten nebst Eimern mit furchtbarem Krach in die Tiefe, alles ging in Trümmer. Um die Wasserräder, die Antriebmaschinen dieser Becherwerke, in gleichmäßiger Weise mit Betriebswasser zu versorgen, war es notwendig, große Teiche anzulegen, die ebenfalls viel Geld kosteten. Stand kein Wasser zur Verfügung, so ließ man etwas kleinere Becherwerke der gleichen Bauart von Pferden treiben. Damit gelang es nur, aus verhältnismäßig geringer Tiefe das Wasser noch herauszuschaffen. Auf die tieferliegenden Schätze mußte, wie es schien, auf ewige Zeiten verzichtet werden. Die Schächte waren damals in Schottland etwa 30 bis 60 und nur wenige 90 bis 110 Meter tief. Bei

den tieferen Schächten half man sich durch mehrere solcher Becherwerke, von denen das eine dem anderen das Wasser zuführte (Bild 291).

„Berühmt war die Turmmaschine in Cornwall, bei der nicht weniger als 10 oberschlächtige Wasserräder von je 20 Fuß (6,09 Metern) Durchmesser übereinander aufgestellt waren, deren Arbeitsleistungen auf den Betrieb zweier Pumpen durch geeignete Zwischenvorrichtung vereinigt wurden.

„Waren Wasserkräfte nicht vorhanden, so mußten Tiere an Stelle der Wasserräder die Pumpen betreiben, und auch




292. Schematischer Schnitt durch die Dampfpumpe von Thomas Savery

Menschenkraft, in zwei Schichten sich ablösend, die Tag und Nacht unausgesetzt die Pumpen zu bewegen hatte oder durch Drehen am Haspel mit Tonnen das Wasser heben mußte, wurde vielfach verwendet. Auch Windmühlen suchte man zuerst in Deutschland, dann auch in England zu verwenden. Aber das Wasser unten im Schacht richtete sich nicht danach, ob über der Erde der Wind wehte oder nicht. Bei länger dauernder Windstille konnten die Bergleute feiern, und das nicht allein, auch die mühsame Frucht arbeitslanger Jahre wurde oft durch die unterirdischen Wasser in kurzer Zeit vernichtet.

„Für eine Grube allein dienten oft 60, 80 und noch mehr ‚Haspelknechte' zur Wasserförderung, und daneben waren noch hunderte, auf einigen Gruben sogar bis 500 Pferde nötig, um des Wassers Herr zu werden. Diese vielen Tiere brauchten natürlich eine entsprechende Bedienungsmannschaft; da gab es Hunderte von Pferdejungen und Pferdeknechten. Für alle diese Menschen mußten Unterkunftsräume, für die Tiere Ställe beschafft werden. Die hohen Futterkosten erhöhten immer unerträglicher die Betriebskosten. Und dabei reichten auch diese Anstrengungen nicht mehr aus. Gruben mußten verlassen werden, blühende Ansiedlungen verödeten, und immer mehr schien der Mensch am Ende seiner Macht angelangt zu sein."

Bei dieser Lage der Dinge ist es begreiflich, daß von den Bergwerkbesitzern nichts inniger ersehnt wurde als die Schaffung einer Maschine, die imstande war, Wasser rasch, bequem und in großen Mengen zu heben. Ihre Not gab den Anstoß zu den Arbeiten Thomas Saverys, eines Ingenieur-Offiziers, der 1650 zu Shilston in der englischen Provinz Devonshire geboren wurde und 1715 starb. Er kannte die schlimme Lage in den Grubenbezirken und ersann, vielleicht angeregt durch Worcesters Arbeiten, vielleicht aber auch ganz selbständig, eine Dampfpumpe. Die Einrichtung sei hier an Hand eines Bilds geschildert, das nach Reuleaux' Angabe entworfen ist und durch schematische Vereinfachung die Konstruktion besonders klar erkennen läßt.

Es sind zwei ummauerte Dampferzeuger (Bild 292) aufgestellt, der Hauptkessel und der Nebenkessel. Der zweite dient nur zur Speisung des ersten. Als Arbeitsräume für den Dampf werden zwei birnenförmige Gefäße aus Kupfer verwendet, die gleichartige Wirkung üben. Soll die Pumpe zu arbeiten beginnen, dann wird der Hahn A geöffnet, so daß aus dem Hauptkessel Dampf in das zunächst leere Gefäß J eintritt. Nach der Füllung wird A wieder geschlossen, und der Dampf schlägt sich in J durch Abkühlung nieder. Da das Wasser sehr viel geringeren Raum einnimmt als vorher der Dampf, so entsteht ein Unterdruck. Infolgedessen preßt der äußere Luftdruck Wasser aus dem Becken im Stollen durch das Rohr C und das nach oben aufschlagende Ventil D in das Gefäß J. Wenn dieses beinahe vollgelaufen ist, wird A wieder geöffnet, und der kräftige Druck des Frischdampfs aus dem Hauptkessel läßt das Wasser nunmehr im Steigrohr F emporsteigen, da das Saugventil D zugedrückt, das Druckventil E dagegen geöffnet ist. Hat sich das Gefäß vom Wasser entleert, so ist es zugleich wieder mit Dampf gefüllt. Der Dampf kondensiert wieder, und das Spiel wiederholt sich.

Damit während der Füllung von J keine Unterbrechung der Wasserförderung eintritt, ist das Schwestergefäß K vorgesehen, das sich durch B füllt, während J arbeitet, und entleert wird, wenn J neues Wasser ansaugt.

Der Nebenkessel wird nur dann kräftig geheizt, wenn der Wasserinhalt des Hauptkessels gering geworden ist. Sobald der Druck im Nebenkessel die Dampfpressung im Hauptkessel überwiegt, wird das Ventil H geöffnet, so daß neues vorgewärmtes Wasser hinüberdringt. Wir haben hier die erste Speisevorrichtung für einen im Betrieb befindlichen Dampfkessel vor uns. Die Füllung des Nebenkessels erfolgt durch ein Rohr L, das an die Druckleitung ansetzt.

Der enge gedankliche Zusammenhang von Saverys Maschine mit dem Heronsball ist ohne weiteres deutlich. Der Erbauer benutzt aber in zweifellos genialer Weise die neuen Erkenntnisse über den Druck der atmosphärischen Luft, indem er diesen zur selbsttätigen Speisung der Betriebsgefäße heranzieht. Freilich war der Verbrauch an Dampf im Verhältnis zur geförderten Wassermenge sehr hoch, da der Dampf auch während der Druckperiode mit

dem kalten Wasser und den gleichfalls sehr kühlen Gefäßwänden in unmittelbarer Berührung war und deshalb auch zu einem großen Teil während dieser Zeit kondensierte.

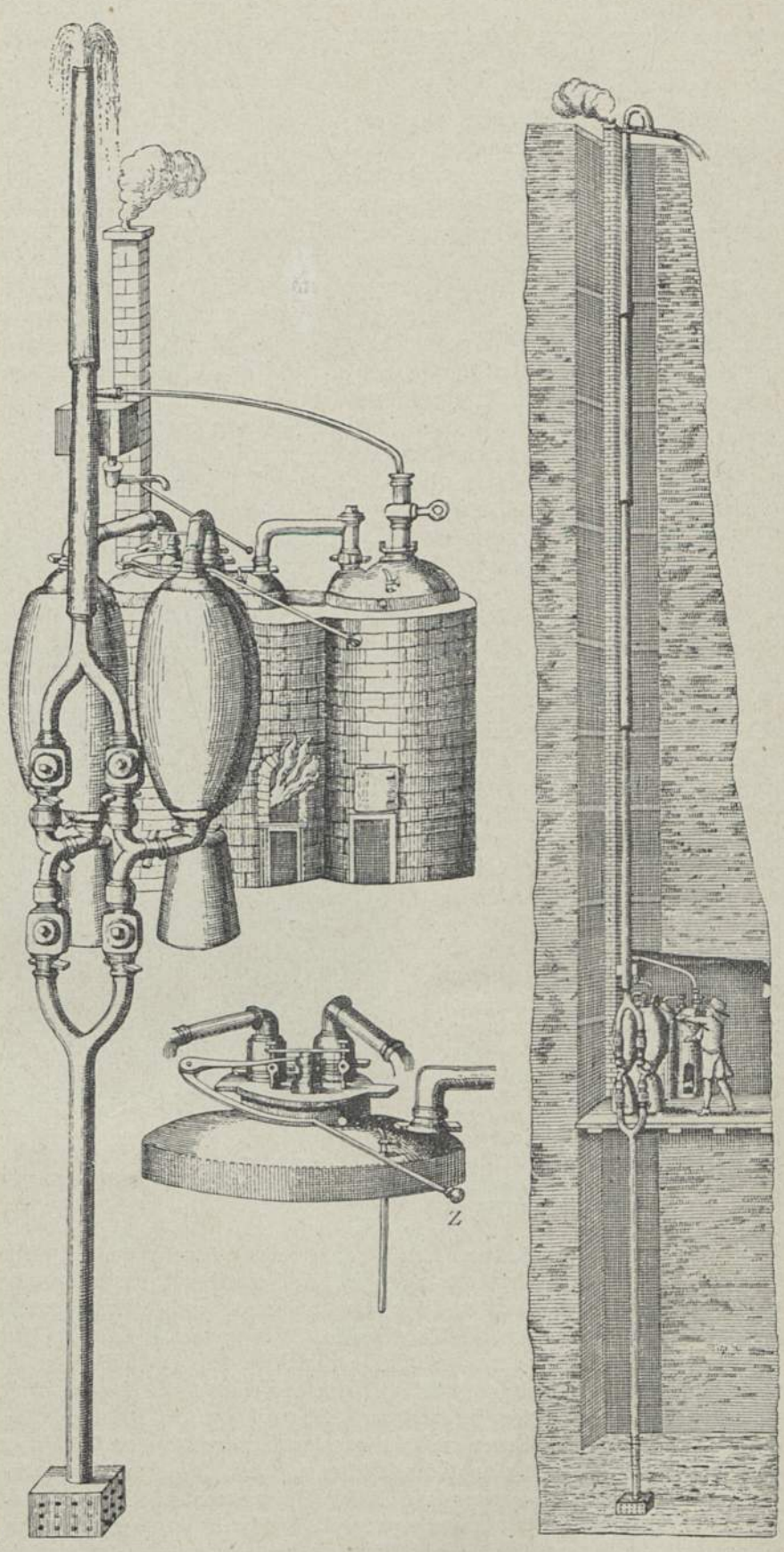
Eine richtige Dampfmaschine im heutigen Sinn ist Saverys Pumpe überhaupt nicht, was auch darin zum Ausdruck kommt, daß die Hauptentwicklung nicht aus ihr entsprungen ist. Nur in den Pulsometern, kleinen Pumpvorrichtungen für besondere Zwecke, lebt die Konstruktion heute noch fort.

Savery erhielt am 25. Juli 1698 ein Patent mit der Kennzeichnung: „Eine neue Erfindung zum Heben von Wasser und zum Hervorbringen von Bewegung für alle Arten von Fabriken durch die Triebkraft des Feuers, welche von großer Wichtigkeit sein wird für die Trockenlegung von Bergwerken, zur Wasserversorgung von Städten und für den Betrieb von Fabriken aller Art, welche sich keiner Wasserkraft oder ständiger Kraft der Winde erfreuen."

Im folgenden Jahr führte der Erfinder ein Modell seiner Maschine der Königlichen Gesellschaft für Kunst und Wissenschaft in London, kurz Royal Society genannt, vor, in deren Verhandlungsberichten hierüber folgendes verzeichnet ist: „Herr Savery unterhielt am 14. Juni 1699 die Gesellschaft, indem er eine Maschine vorzeigte, die Wasser mit Hilfe der Kraft des Feuers hob. Er erhielt den Dank der Gesellschaft für seine Vorführung, die den Erwartungen entsprach und Beifall fand."

Bemerkenswert ist, daß in beiden Schriftstücken der Dampf überhaupt nicht erwähnt wird. Die Wirkung des Feuers wurde als das Hervorstechende angesehen, und die Bezeichnung „Feuermaschine" statt des heute üblichen Worts „Dampfmaschine" ist während eines langen Zeitraums ausschließlich verwendet worden.

Savery, der nicht wie seine Vorläufer ein versonnener Wissenschaftler oder Phantast, sondern ein praktisch denkender Mann war, bemühte sich sehr eifrig, Käufer für seine Maschine zu finden. 1702 ließ er eine Werbeschrift erscheinen, die er „Des Bergmanns Freund" nannte und mit mehreren Abbildungen ausstattete. Einige hiervon sind auf Bild 293 wiedergegeben, und sie lassen erkennen, daß der Aufbau der Maschine technisch sehr gründlich durchgebildet war. Das Teilbild in der Mitte veranschaulicht die Vorrichtung, mit der tatsächlich und abweichend von unserer schematischen Darstellung auf Bild 292 die Umschaltung der Dampfzuführung von dem einen Druckgefäß auf das andere erfolgte. Zu diesem Zweck war auf den Hauptkessel eine verschiebbare, dicht schließende Klappe mit einer Durchbrechung aufgesetzt. Durch Ziehen oder Schieben an dem Griff Z wurde dem Dampf der Weg entweder zu dem einen oder zu dem anderen Gefäß freigegeben. Es




293. Dampfpumpe von Thomas Savery

Links: Gesamtansicht der Pumpe, darunter Vorrichtung zur Umschaltung der Dampfzufuhr

Rechts: Die Dampfpumpe im Schacht

Aus: Th. Savery, The Miners friend or an Engine to raise Water by fire, London, 1702

konnten niemals beide Gefäße gleichzeitig verschlossen werden. Diese Vorkehrung war notwendig, weil dem Kessel das Sicherheitsventil noch fehlte, ein völliger Verschluß also gefährlich gewesen wäre.

Es sollte Saverys Maschine aber trotz alledem nicht gelingen, wirklich des Bergmanns Freund zu werden, der die Gruben von aller Wassersnot befreite. Die Leistungsfähigkeit der Maschine war hierfür zu gering. Sie diente deshalb hauptsächlich nur zur Versorgung von Wasserleitungen auf einzelnen Grundstücken, zum Bewässern hochliegender Acker, für den Betrieb von Wasch- und Bade-Einrichtungen und für Springbrunnen. 1710 wurde eine besonders große Maschine in den York Buildings-Wasserwerken zu London aufgestellt. Sie soll sich dort bewährt haben, im Gegensatz zu einer anderen Maschine höherer Leistung, die für ein Bergwerk in Broadwaters gebaut worden war. Als diese keine genügende Leistung hergeben wollte, ließ der Wärter den Druck im Kessel zu hoch ansteigen, so daß eine Explosion stattfand, die erste in der Geschichte der Dampfkessel. Dieses Ereignis behinderte ganz besonders das Eindringen der Maschine in die Bergwerke, denen die Erlösung erst durch die Arbeiten eines anderen Manns, aber auch durch diese noch nicht unmittelbar, kommen sollte.

Die Denker der damaligen Zeit aber achteten Saverys Leistung sehr hoch. Das wird bewiesen durch ein Gedicht Erasmus Darwins, des Großvaters von Charles Darwin, der gleichfalls ein großer Naturforscher gewesen ist und manchen Gedanken des Enkels bereits vorausgenommen hat. In seinem „Tempel der Natur" heißt es:

„Nicht unbemerkt selbst darf der Dampf entschweben,
Durch Eisenröhren in der Flucht beengt,
Muß Riesenlasten er vom Boden heben;
Der Flücht'ge ist in Kerkerhaft gezwängt.
Er tost und zürnt, macht Erd' und Himmel beben,
Die Pforte wird, der Riegel nicht gesprengt.
Ein Savery weiß seine Kraft zu zähmen,
Zum Dienste muß der Stolze sich bequemen."

294. Dionysius Papin
Nach einem zeitgenössischen Kupferstich

Max Eyth hat seinem Roman „Der Schneider von Ulm" den Untertitel gegeben „Geschichte eines zu früh Geborenen". Sein Held, der Flugjünger Berblinger, mußte scheitern, weil die Technik der Zeit ihm nicht die Mittel zur Ausführung seiner hohen Absichten zu liefern vermochte. Die romantischste Gestalt in der Geschichte der Dampfmaschine wird von demselben tragischen Hauch umweht. Dionysius Papin (Bild 294), der als der wahre Erfinder der Dampfmaschine angesprochen werden muß, kam gleichfalls zu früh auf die Welt. Aber nicht zwei Jahrhunderte wie Berblinger, sondern nur fünfzig Jahre trennten ihn von der Epoche, die seinen Forderungen hätte Genüge leisten können, und die Kürze dieses Abstands läßt sein Schicksal noch ergreifender erscheinen.

Wenn es am Ende des siebzehnten Jahrhunderts Handwerker gegeben hätte, die imstande gewesen wären, große metallene Maschinenteile genau zu bearbeiten, dann wäre Papin wahrscheinlich ein zweiter Prometheus geworden, ein Halbgott, welcher der Menschheit das hohe Geschenk „Kraft" vom Himmel herniedergebracht hätte. Da aber die ausführenden Hände fehlten, mußte der stolze Gedanke während der Lebenszeit des Manns, der ihn erdachte, ein dürrer Baum bleiben, der nicht auszuschlagen vermochte. Papin hat die oft furchtbare Wahrheit kennengelernt, daß eine Erfindung nur dann zeitgemäß und nützlich ist, wenn auch die Mittel für ihre Ausführung zur Verfügung stehen. Da er dies Glück nicht hatte, endete er sein Dasein, das ihn mit den größten Männern der Zeit in Berührung gebracht hatte, in Vergessenheit und Elend. Er hat ein echtes Erfinderschicksal gehabt!

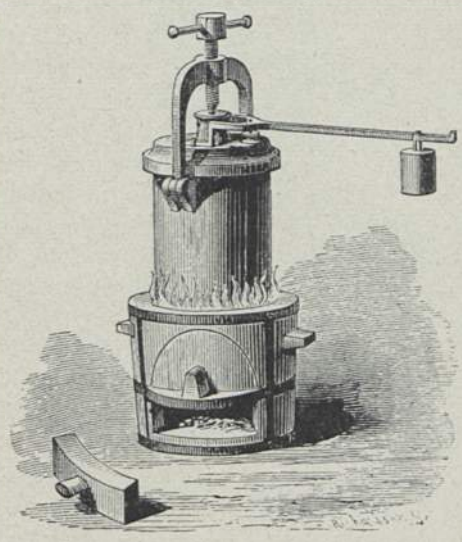
Ein Jahr vor Beendigung des Dreißigjährigen Kriegs, 1647, wurde Dionysius oder, wie ihn die Franzosen nennen, Denis Papin zu Blois in Frankreich geboren. Er studierte Medizin und ist wohl auch kurze Zeit als Arzt tätig gewesen. Von Beginn an aber gehörte seine Neigung der Physik. In Paris lernte er den großen Huygens kennen, den Mann, der zuerst eine Uhr mit einem Pendel versah, die wichtigsten Verbesserungen im Bau der Fernrohre schuf und die Wellentheorie des Lichts aufstellte. Er wurde Assistent bei Huygens und hatte hierdurch Gelegenheit, dessen bedeutsame Untersuchungen über den Luftdruck mitzumachen. Das sollte entscheidend für die Hauptleistung seines Lebens werden.

1675 ging Papin nach England, wo er mit Robert Boyle, einem gleichfalls hervorragenden Physiker, in Verbindung trat. Gemeinschaftlich mit diesem arbeitete er an der Verbesserung der Luftpumpe und baute die erste dieser Maschinen, die mit zwei Zylindern ausgerüstet war. Auf Grund ausgezeichneter physikalischer Arbeiten ernannte die kurz vorher von Boyle begründete, bis heute ruhmvoll wirkende Royal Society ihn zum Mitglied. Als solches veröffentlichte Papin eine Abhandlung über eine zweite wichtige Erfindung, die seinen Namen am weitesten unter die Leute gebracht hat.

Die Wirkung des heute noch in beinahe jeder Küche, wenn auch in vereinfachter Form, verwendeten Papinschen Topfs beruht auf der damals ganz neuen Erkenntnis, daß der Siedepunkt des Wassers von dem auflastenden Luftdruck abhängt. Je höher dieser ist, desto später kocht das Wasser. Darauf gründete Papin ein Verfahren für sparsames und gründliches Kochen.

Sein Topf kann durch einen fest aufschraubbaren Deckel verschlossen werden. Der zunächst von der Feuerung aus der untersten Wasserschicht entwickelte und nach oben steigende Dampf vermag deshalb nicht zu entweichen und steigert den auflastenden Druck, so daß ein Aufkochen nicht stattfindet. Das Wasser wird nun immer weiter erwärmt, ohne daß eine nennenswerte Dampfentwicklung eintritt, weil der Druck im Gefäß immer größer wird. Die zugeführte Wärme kommt deshalb der eingelegten Speise zugute, was im offenen Topf nicht der Fall ist, da während des Verdampfens eine Steigerung der Temperatur über 100 Grad hinaus nicht stattfindet, wie später noch entwickelt werden soll.

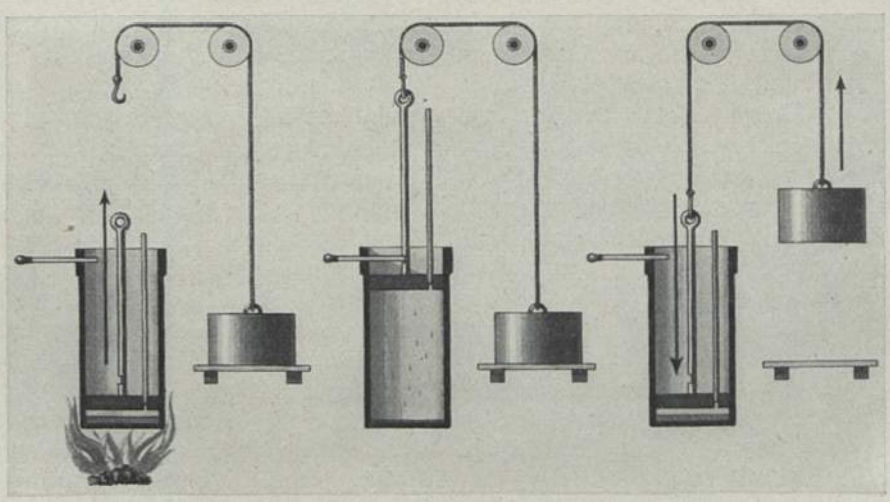
Zur Vermeidung von Unfällen sorgte Papin dafür, daß eine Abzugöffnung im Deckel frei wurde, wenn der Druck im Inneren des Topfs zu hoch anstieg. Die Öffnung war mit einem Stopfen verschlossen, der von einem Hebel mit Gewichtsbelastung niedergedrückt wurde. Durch Verschieben des Gewichts auf dem Hebel konnte der zulässige Höchstdruck eingestellt werden. Die Anordnung ist die erste Anwendung eines Sicherheitsventils, das bei kaum veränderter Bauart ein unentbehrlicher Ausrüstungsteil des Dampfkessels bis zum heutigen Tag geblieben ist (Bild 295).



295. Papinscher Topf

Obgleich Papin zu jener Zeit in London ein höchst angesehener Mann ist, treibt ihn die Wanderlust, die ein Kennzeichen seines Charakters ist, doch wieder in die Ferne. Er geht 1681 nach Venedig, um dort eine Akademie der Wissenschaften nach dem Vorbild der Royal Society zu begründen. Es gelingt ihm jedoch nicht, seine Absichten durchzusetzen, und als er nach England zurückkehrt, findet er sich dort nicht mehr so wohlgelitten wie früher. Er folgt deshalb gern dem Landgrafen Karl von Hessen, der ihm den erledigten Lehrstuhl für Mathematik und Physik an der Universität Marburg anbietet. 1687 trifft Papin in dieser kleinen deutschen Stadt ein, welche die Geburtsstätte seiner wichtigsten Schöpfungen werden sollte.

Gerade in jener Zeit hatte Ludwig XIV. die Physiker und technischen Kunstmeister in lebhafte Tätigkeit gesetzt, weil er eine Vorrichtung zu haben wünschte, die imstande wäre, die Springbrunnen des Parks von Versailles mit Seine-Wasser zu speisen. Ehe die Pumpanlage mit dreizehn Wasserrädern gebaut wurde, die im vorigen Abschnitt auf Seite 117 beschrieben ist, wurden zahlreiche andere Vorschläge gemacht. So unterbreitete Huygens der Akademie der Wissenschaften zu Paris den Gedanken zur Schaffung einer Pulvermaschine, der eng an seine Arbeiten über den Luftdruck anknüpfte. Es sollte durch Abbrennen von Pulver in einem Zylinder mit verschiebbarem Kolben eine Luftverdünnung unter diesem herbeigeführt werden, worauf die atmosphärische Luft den Kolben niederdrücken würde. Hierbei sollte Arbeit gewonnen, zum Beispiel ein Pumpenkolben emporgezogen werden.



296. Einrichtung und Wirkungsweise der ersten „Kolbendampfmaschine" von Papin

Papin, der ja mit Huygens Gedankenvorgängen vertraut war, versuchte in Marburg dessen Pulvermaschine zu verbessern. Dies gelang ihm auch; die Luftverdünnung unter dem Kolben blieb aber so gering, daß keine genügende Leistung zu erzielen war, und die heftigen Explosionen machten die Bedienung der Maschine lebensgefährlich. Papin sann darüber nach, welches andere Mittel wohl angewendet werden könnte, um eine ausreichende Luftleere im Zylinder auf bequeme Art zu erzielen.

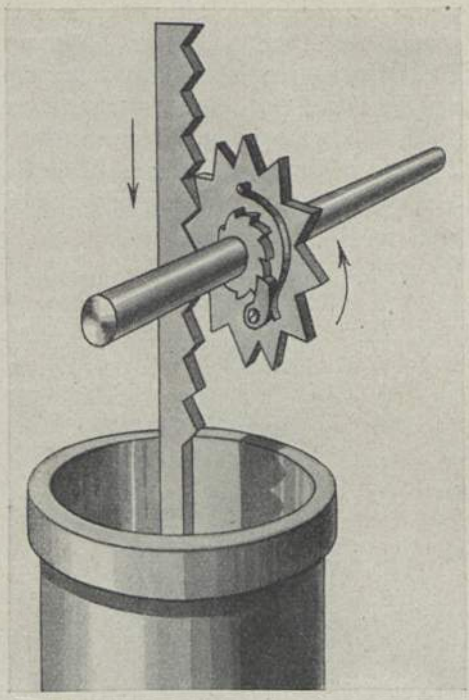
Seine Gedanken waren zunächst also keineswegs auf die Schaffung einer Dampfmaschine gerichtet. Er ist mit Saul zu vergleichen, der auszog, seines Vaters Eselin zu suchen, und ein Königreich fand. Als Papin schließlich auf die Anwendung des Wasserdampfs verfiel, hatte er auch wahrlich nicht die Absicht, dessen Eigenkraft zu nutzen; er brauchte ihn nur als Platzhalter für den atmosphärischen Druck.

1690 spricht er den folgenden Gedanken aus: „Da das Wasser die Eigenschaft hat, nachdem es durch Feuer in Dampf verwandelt worden ist, so elastisch wie Luft zu werden und nachher durch Abkühlen sich wieder so weit zu verdichten, daß es vollkommen aufhört, elastisch zu sein, so habe ich geglaubt, daß man leicht Maschinen machen könnte, in denen das Wasser mittels mäßiger Wärme und geringer Kosten die vollständige Leere hervorbringen würde, die man vergeblich mit dem Schießpulver zu erzielen versucht hat." Der Aufsatz in den „Acta Eruditorum" („Verhandlungen der Gebildeten"), in dem diese Sätze stehen, enthält auch die Beschreibung der ersten Kolben-Dampfmaschine, deren Geburtsjahr also 1690 ist.

Angesichts der Art, in der heute der Dampf zur Arbeitsleistung herangezogen wird, ist es vor der Beschreibung von Papins Schöpfung wohl nötig, noch einmal besonders darauf hinzuweisen, daß der Dampfdruck bei ihr nur eine ganz nebensächliche Rolle spielt. Die atmosphärische Luft macht hier und bei allen folgenden Bauarten bis tief in die Zeit von Watts Schaffen hinein den Krafthub. Bis zu einem gewissen Grad ist es ein Zufall, daß aus der atmosphärischen Feuermaschine schließlich die echte Dampfmaschine hervorging. Denn die Kondensationsfähigkeit des Dampfs und die daraus folgende Tatsache, daß er, abgekühlt, einen sehr viel geringeren Raum einnimmt, als wenn er frisch aus der Nähe der Feuerstätte kommt, wirken praktisch auf ganz andere Weise als die Expansionsfähigkeit des gleichen Stoffs. Die Technik hat Kondensation und Expansion erst sehr spät zu machtvollem Zusammenwirken vereint.

Papin ließ seine erste Maschine (296) auf folgende Art arbeiten.

In einen Metallzylinder ist Wasser einige Zentimeter hoch eingefüllt, worauf der Kolben bis dicht über die Wasserschicht hinabgedrückt wird. Hierbei kann die Luft unter dem Kolben durch eine Öffnung in diesem entweichen, die darauf durch eine eingesteckte schwere Stange verschlossen wird. Wenn der Zylinder nun durch eine untergestellte Feuerung erwärmt wird, verdampft das Wasser, und der Kolben wird bis zu seiner höchsten Lage emporgedrückt. Diese Bewegung ist ein Leerlauf, Arbeit wird hierbei nicht abgenommen. Droben angekommen wird der Kolben durch eine Klinke festgehalten, die in eine Nut der Kolbenstange einschnappt. Darauf entfernt man das Feuer, der Dampf schlägt sich in dem erkaltenden Zylinder nieder, und sobald die Festhaltung entfernt ist, preßt der äußere Luftdruck, der durch die Mittelöffnung des Deckels eindringt, den Kolben hinab. Das ist der Krafthub, durch den ein Gewicht oder ein Pumpengestänge gehoben werden können.



297. Sperradgetriebe

Der Zylinder der Versuchsmaschine war, nach Matschoß, 63 Millimeter weit; 27 Kilogramm konnten in einer Minute mit der Vorrichtung gehoben werden. Der Erfinder berechnete, daß eine Maschine von etwa 610 Millimetern Zylinderdurchmesser und 1200 Millimetern Hubhöhe 3600 Kilogramm in einer Minute 1,2 Meter hoch heben, das heißt also etwa eine Pferdestärke würde leisten können.

Was Papin hier geschaffen hat, ist, mit heutigen Augen angesehen, ein äußerst bescheidenes Gerät. Insbesondere scheint uns die Langsamkeit des Arbeitsvorgangs erschreckend. Jedesmal vor dem Beginn des Krafthubs muß das Feuer entfernt werden, und es heißt dann warten, bis die Niederschlagung des Dampfs eine ausreichende Luftleere unter dem Kolben geschaffen hat. Dennoch haben wir hier die Urzelle der Dampfmaschine vor uns, da bei dieser Vorrichtung zum erstenmal der Dampf in einem Zylinder wirkt, der einen verschiebbaren Kolben besitzt.

Die Hauptleistung von Papin ist die Vereinigung von Dampf und Kolben. Denn schon viele vor ihm hatten Wasserdampf benutzt, und auch der Kolben ist nicht seine Erfindung. Er wird schon bei Huygens' Pulvermaschine angewendet, der Abbé Hautefeuille hatte schon 1678 seine Verwendung empfohlen, und selbst Heron braucht ihn bereits in einer Feuerspritze. Aber den Wasserdampf lernte der Kolben nun erst kennen, und das war der Beginn seiner Machtstellung im Reich der Technik.

Papin zweifelte nicht daran, eine Erfindung von großer Bedeutung gemacht zu haben. Er gibt an, daß sie ermöglichen würde, Wasser aus den Gruben zu heben, Bomben zu werfen und auch gegen den Wind zu rudern. Der Antrieb eines Schiffs durch Maschinenkraft insbesondere war sein Lieblingsgedanke. Er hatte nämlich in London ein Wasserfahrzeug gesehen, das auf Anordnung des Prinzen Robert von der Pfalz mit Schaufelrädern ausgerüstet worden war, und dem es mit Leichtigkeit gelang, die Ruderschiffe des Königs zu überholen. Die Schaufelräder waren dort durch Pferde bewegt worden, die, auf dem Deck laufend, einen Göpel drehten. An dessen Stelle wollte Papin vier seiner Dampfmaschinen setzen, die mittels verzahnter Kolbenstangen in Zahnräder auf der Schaufelradachse eingreifen sollten. Da der Kolben nur beim Niedergang Arbeit zu leisten vermochte, sollten sich die Zahnräder während des Hinaufgangs frei auf der Achse drehen. Er wollte also ein Sperrradgetriebe anwenden, so wie es in Bild 297 angedeutet ist. Die Kolbenbewegungen sollten zu verschiedenen Zeiten stattfinden, damit die Achse einen nahezu ununterbrochenen Antrieb erhielt. Es ist dies die erste Angabe, wie drehende Bewegung durch eine Dampfmaschine unmittelbar erzeugt werden kann.

Der Gedanke hätte sich vielleicht wirklich durchführen lassen, und Papin wäre auch der erste Erbauer eines Dampfschiffs geworden, wenn die Schwierigkeit der Herstellung großer Zylinder die Ausführung nicht verhindert hätte. Er wollte deshalb gern eine Fabrik anlegen, in der geeignete Arbeiter hätten geschult werden können. „Die größte Schwierigkeit", so schreibt er, „besteht darin, eine Werkstatt zu errichten, in der man mit Leichtigkeit Zylinder (Papin nennt sie stets Röhren) herstellen kann, die groß genug und von einem zum anderen Ende gleichmäßig gebohrt sind .... Diese neue Maschine kann wohl dazu ermutigen, eine Fabrik anzulegen, denn sie läßt erkennen, und zwar handgreiflicher als irgend etwas anderes, daß die Kräfte großer Dampfzylinder sich sehr bequem zu Anwendungen verschiedener Art eignen würden."

Es war damals aber, und am allerwenigsten in einem kleinen deutschen Ländchen, gar nicht ernstlich daran zu denken, in so großzügiger Weise einen technischen Gegenstand auszubilden. Bis die erste Fabrik für Dampfmaschinen entstand, mußten noch viele Jahrzehnte vergehen.

Ein einziger größerer Zylinder nur wurde nach Papins Angaben hergestellt, als der Landgraf von Hessen, dem die Erfindung hoffnungsreich schien, den Auftrag gab, eine mit Dampf betriebene Wasserkunst zur Speisung des Kanals zwischen der Fulda und der Diemel zu erbauen. Zur Vollendung der Pumpanlage ist es aber nicht gekommen, obgleich Papin das Modell hierfür fertiggestellt hatte, vermutlich weil eine ausreichende Abdichtung des Kolbens gegen die Zylinderwandungen nicht möglich war.

An der Möglichkeit der weiteren Ausbildung seiner Maschine verzweifelnd, beging Papin nun eine Sünde wider den Heiligen Geist. Durch Leibniz, mit dem er in lebhaftem Briefwechsel stand, erhielt er 1705 nähere Angaben über Saverys Maschine, die 1698 entstanden war, und er bemühte sich nun, diese zu verbessern. Das war ein verhängnisvoller Rückschritt, der jede erfolgreiche Weiterarbeit des Marburger Erfinders für immer behinderte und Ursache ward, daß die gesamte Frühentwicklung der Dampfmaschine fortab in England vor sich ging.

Reuleaux gibt eine schematische Darstellung der zweiten Maschine Papins (Bild 298) an, welche die Arbeitsweise leichter erkennen läßt als die unbeholfenen zeitgenössischen Bilder.

Die wichtigste Verbesserung gegenüber Saverys Konstruktion ist die Abtrennung des Dampfs von dem zu hebenden Wasser in dem Druckgefäß, das hier nicht birnenförmig, sondern zylindrisch gestaltet und mit einem hohlen schwimmfähigen Kolben versehen ist. Dieser hat nicht mehr Arbeit zu leisten, sondern ist an einen Nebenplatz gerückt: er dient nur noch als Wärme-Isolator.

Wenn nach der Füllung des Zylinders durch das Saugrohr, die wie bei Savery vor sich geht, der Dampf aus dem Kessel eingelassen wird, so berührt er die obere Kolbenfläche, nicht mehr das Wasser. Um die sehr starke Kondensation möglichst zu mindern, die den Wirkungsgrad von Saverys Maschine so sehr hinabdrückte, legt Papin noch erhitzte eiserne Bolzen in den Kolben, so daß die Berührungsfläche warm ist. Die Bedienung der Maschine wird hierdurch allerdings stark erschwert. Eine so verwickelte Anlage eignet sich nicht für den regelmäßigen Betrieb. Sie ist denn auch nie wirklich verwendet worden, obgleich Papin auch im Anschluß hieran einen Weg angab, drehende Bewegung zu erzeugen. Dieselbe Methode war bereits von Savery in Aussicht genommen worden, als dieser das „Hervorbringen von Bewegung für alle Arten von Fabriken" versprach.

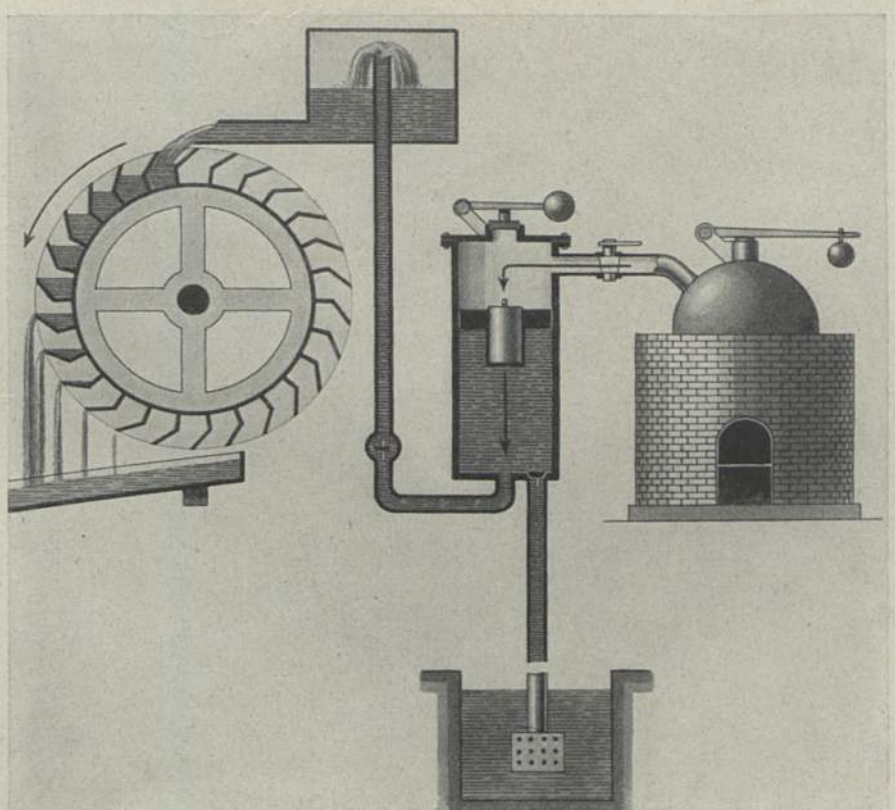
Es war freilich nur ein dürftiger Umweg. Papin wollte nämlich, daß das emporgedrückte Wasser einem hochliegenden Gefäß zugeführt werde, von dem aus ein Wasserrad versorgt werden sollte. Das Gefäß dachte er sich oben verschlossen, so daß es als Windkessel wirken konnte. Das hineingedrückte Wasser sollte die Luft darin zusammenpressen, damit es auch dann noch mit kräftigem Strahl ausströmte, wenn der Spiegel im Gefäß während der Ansaugperiode der Maschine stark gesunken war. Hierdurch hätte eine ziemlich gleichmäßige Beaufschlagung des Rads erzielt werden können. Es wirkt beinahe komisch, die Dampfmaschine hier als Dienerin des plumpen Wasserrads zu sehen, dessen leuchtende Überwinderin sie werden sollte. Die beiden sind, zusammengespannt, ein schlecht passendes Paar: „In lächerlichem Zuge erblickt man Ochs und Flügelpferd am Pfluge."

Papin machte Versuche mit seiner zweiten Maschine, und führte ihr Wirken auch dem Landgrafen vor, wobei es gelungen sein soll, Wasser bis zur Höhe von 70 Fuß emporzuheben. Die Hoffnungsfreudigkeit des Erfinders war zunächst wieder sehr groß, und er schrieb am 23. März 1705 an Leibniz: „Ich kann Sie versichern, daß ich, je mehr ich vorwärtskomme, immer mehr diese Erfindung zu schätzen lerne, die, vom theoretischen Standpunkt aus betrachtet, die Kräfte der Menschen bis ins Unendliche vermehren muß; aber vom praktischen Standpunkt aus glaube ich ohne Übertreibung sagen zu können, daß mit ihrer Hilfe ein Mensch ebensoviel wird leisten können, wie hundert Menschen ohne die Maschine. Ich gebe zu, daß es noch Zeit erfordern wird, um zu diesem Grad der Vollkommenheit zu gelangen. Das einzige, was man bisher getan hat, ist die Aufdeckung der Eigenheiten der Maschine und der Erscheinungen, denen sie unterworfen ist. Aber Seine Hoheit werden sie hinfort zu einem nützlichen Zweck verwenden und hat mir den ehrenvollen Auftrag gegeben, diese Maschine zum Antrieb einer Getreidemühle anzuwenden.

„Sie können mir glauben, mein Herr, daß ich alles, was in meinen Kräften steht, aufbieten werde, damit die Sache zu einem guten und erfolgreichen Ende geführt wird, jedoch hat man hier mit der Schwierigkeit zu kämpfen, tüchtige Arbeiter zu finden. Ich hoffe jedoch, daß die Geduld mit Gottes Hilfe alles glücklich überwinden wird. Und wenn man dann nach der Getreidemühle jene Erfindung auf die Wasserfahrzeuge ausdehnen könnte, so würde ich diese Erfindung für ungleich nützlicher halten als die Auffindung der Längen auf dem Meer, um die man sich schon lange bemüht."

Den Landgrafen nahmen jedoch bald Dinge in Anspruch, die ihm wichtiger erschienen, und er gab Papin keine Möglichkeit weiterzuarbeiten. Dieser beschloß daher, Marburg zu verlassen und nach London zurückzukehren. Ein Schiff, das er mit Schaufelrädern ausgerüstet hatte, um später eine Dampfmaschine einzusetzen, war sein kostbarster Besitz, der Gegenstand, an den alle Zukunftshoffnungen sich klammerten. Papin traf denn auch alle erdenklichen Vorkehrungen, um das Fahrzeug sicher nach England zu überführen. Bei der Durchfahrt zur Weser bei Münden aber ging ihm das Schiff dennoch verloren. Es wurde durch Mitglieder der Schiffergilde, die kein fremdes Fahrzeug hier dulden wollten, ans Land gezogen und zerstört, wie bereits in Band III auf Seite 118 erzählt worden ist. Hierdurch erlitt Papin einen so schweren Schlag, daß er sich niemals davon erholt hat.

Als er in London angekommen war, ersuchte er die Königliche Gesellschaft für Kunst und Wissenschaft, ihm Gelegenheit zu geben, die Wirkungsfähigkeit seiner Maschine mit der von Savery



298. Schematische Darstellung der zweiten Maschine von Papin

zu vergleichen. Sein Wunsch wurde nicht erfüllt, und er hat den Rest seines Lebens in Dunkelheit und Dürftigkeit verbracht. 1714 ist er arm und vergessen gestorben.

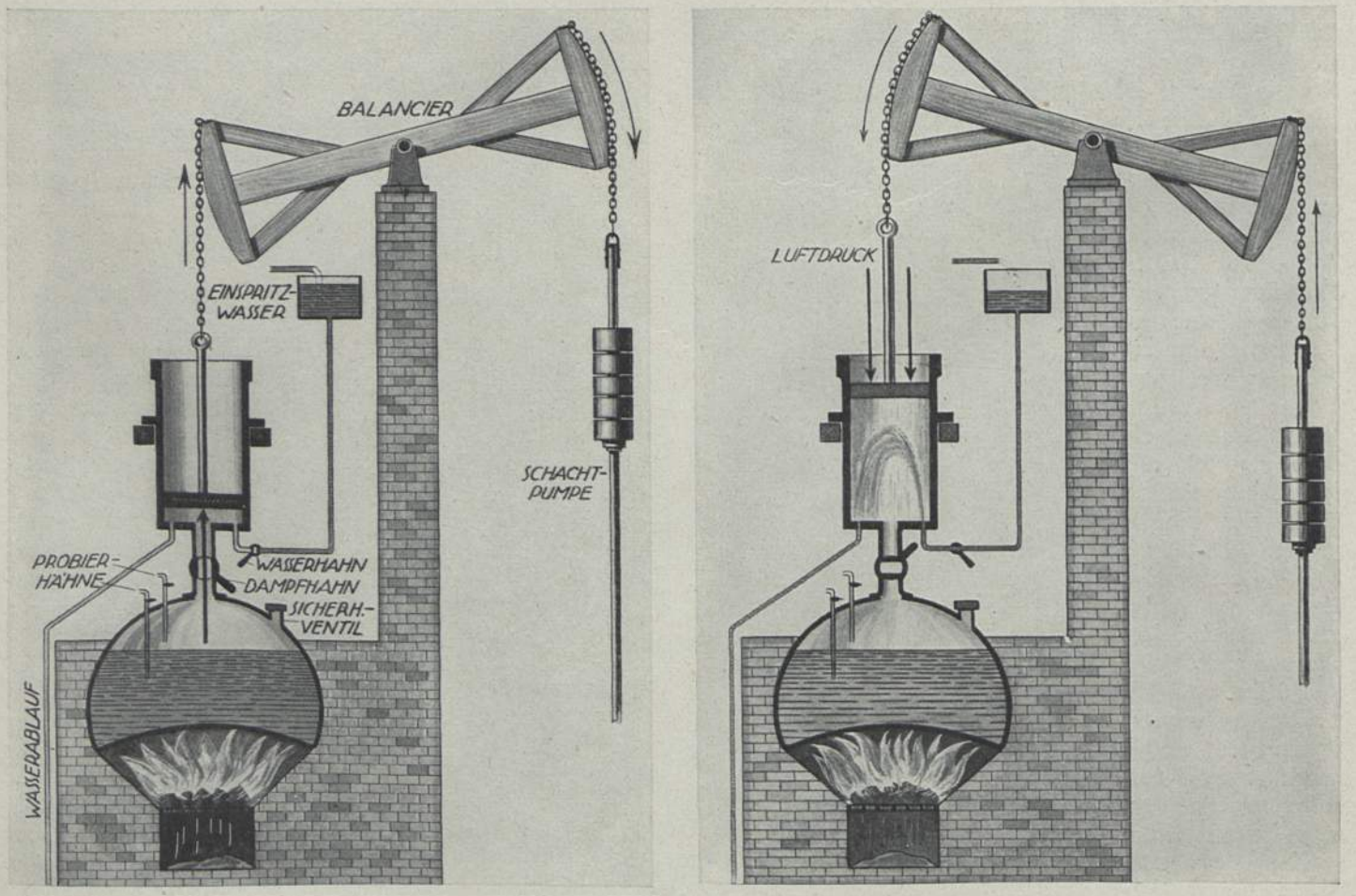
Wo Papin gesät hatte, sollten andere ernten, und zwar bereits zu einer Zeit, als der Erfinder noch unter den Lebenden weilte. Zwei Jahre vor seinem Tod begann eine atmosphärische Dampfmaschine ihre Arbeit, die für Betriebszwecke zwar keineswegs vollkommen, aber doch ausreichend durchgebildet war. Diese Bauform hat ein Jahrhundert lang ausgezeichnete Dienste geleistet. Sie endlich brachte den ertrinkenden Bergwerken wirkliche Linderung ihrer Nöte.

Die Erbauer jener Maschine haben sowohl Saverys wie Papins Arbeiten gekannt und auf dem Grundstein weiter gebaut, den der Franzose eingesenkt hatte. Sie führten ein tüchtiges Gebäude darüber auf, in dem der Geist der werktätigen Technik schon recht bequem wohnen konnte.

Der größte Fehler von Papins älterem Kraftzeuger war, daß bei ihm für drei verschiedene Wirkungen nur Ein Gefäß vorhanden war. Die Dampferzeugung, die Arbeit des Dampfs und seine Kondensation fanden im gleichen Raum statt. Wie umständlich war es, daß die Pfanne mit der Feuerung jedesmal fortgenommen werden mußte, wenn der Krafthub erfolgen sollte! Der nächste Fortschritt mußte die Abtrennung des Kessels vom Arbeitsraum sein, damit auch bei der echten Kolbenmaschine, wie schon bei Saverys Pumpe und ihrer Nachahmung durch Papin, eine dauernde Dampfbereitung stattfinden und die Zahl der Hübe in der Minute gesteigert werden konnte. Später ist dann auch der Kondensator abgetrennt worden, und diese Großtat erst, die den Zylinder zum reinen Arbeitsraum machte, ließ die neuzeitliche Dampfmaschine werden.

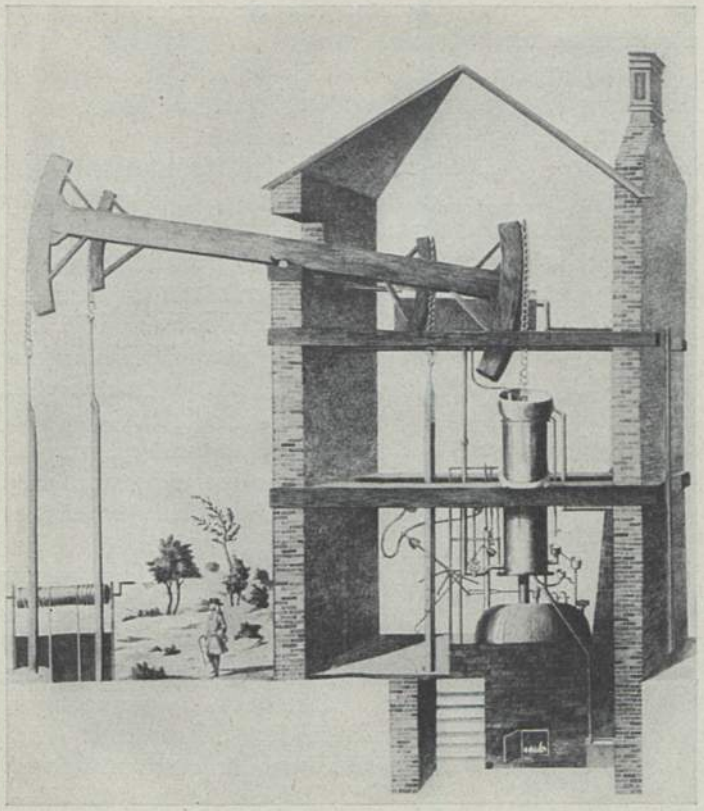
Sie ist nicht vom Ingenieur geschaffen worden, sondern der Beruf des Ingenieurs ist erst durch sie entstanden. In dem jetzigen Augenblick sind es zwei einfache „ungelernte" Leute, die den nächsten großen Lebensabschnitt der Maschine heraufführen.

Thomas Newcomen aus Dartmouth war ein Schmiedemeister und Eisenhändler. Er wird als ein Mann geschildert, der sich mit nur geringen Kenntnissen an die schwierigsten Konstruktionen auf dem Gebiet der Mechanik wagte. Ihm stand, in der Hauptsache freilich wohl nur als Geldmann, John Calley, ein Viehzüchter, zur Seite. Die beiden hatten bei der Einführung der Maschine Saverys mitgearbeitet und aus Abhandlungen auch Papins ältere Versuche kennengelernt. Als sie zunächst in nebelhaften Umrissen die Möglichkeit vor sich sahen, darüber hinaus zu gelangen, trugen sie einem Gelehrten, Dr. Hooke, ihre Gedanken vor. Dieser riet ihnen jedoch sehr energisch ab, in der beabsichtigten Art weiterzuarbeiten, da er es für unmöglich hielt, daß Zylinder und Röhren genügend dicht gemacht werden könnten, um den für den Betrieb erforderlichen Unterdruck in ihrem Inneren entstehen zu lassen. Newcomen und Calley dachten aber hoffnungsfreudiger, und sie begannen 1705 Versuchsmaschinen der von ihnen erdachten Art zu bauen. Erst sieben

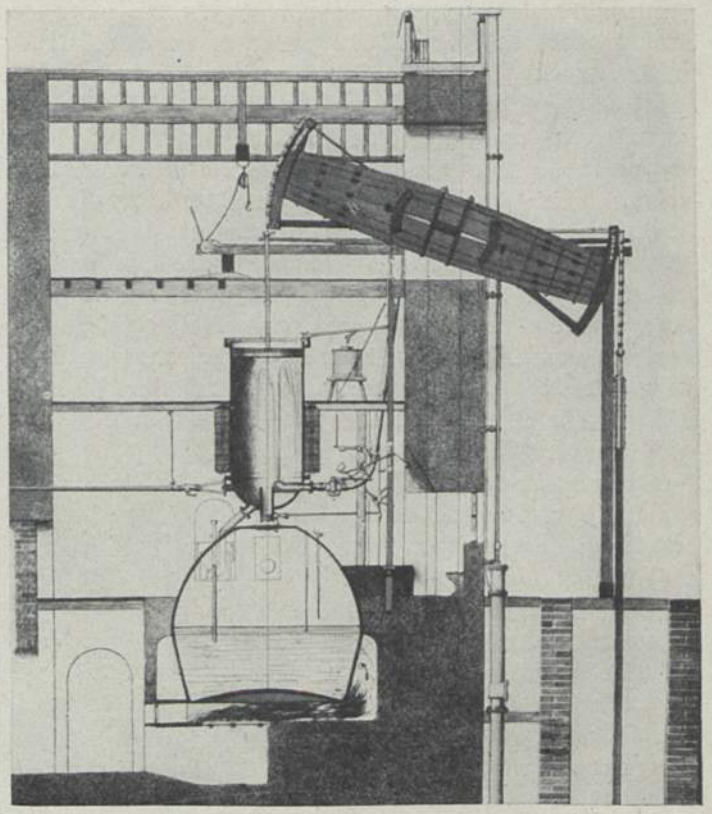



299. Die atmosphärische Maschine von Thomas Newcomen mit Balancier und Handsteuerung

Links: Dampfhahn geöffnet, Wasserhahn geschlossen. Der Dampf drückt den Kolben nach oben. Rechts: Dampfhahn geschlossen, Wasserhahn geöffnet. Der im Zylinder eingeschlossene Dampf kondensiert, der äußere Luftdruck drückt den Kolben nach unten und hebt damit das Pumpengestänge



300. Atmosphärische Maschine von Thomas Newcomen mit Steuerbaum, um 1725
Deutsches Museum, München

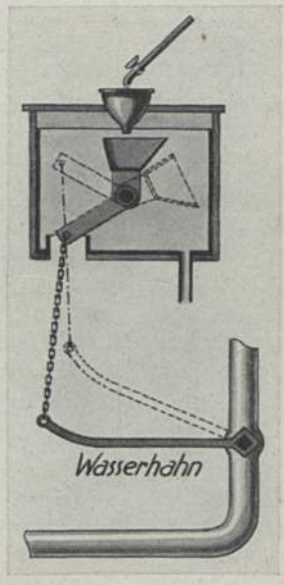


301. Atmosphärische Maschine von John Smeaton aus dem Jahre 1772
Deutsches Museum, München

Jahre später aber waren sie so weit, daß eine durch sie erbaute Wasserhaltungsmaschine in einem Bergwerk aufgestellt werden konnte.

Newcomen hat keinen einzigen neuen Teil ersonnen. Nur durch die geschickte Zusammenordnung bereits bekannter Stücke schuf er die verbesserte Wirkung. Wie Bild 299 zeigt, ist der Dampferzeuger ein rundes Gefäß mit gewölbtem Boden und Deckel. Er wurde mit seinem unteren Teil in das gemauerte Fundament des Maschinenhauses eingesenkt. Unmittelbar über dem Kessel, mit diesem durch ein ganz kurzes Rohrstück verbunden, befindet sich der Zylinder, in dem der Kolben auf und nieder gleiten kann. Der Zylinder ist mittels eines Flanschs im Gebälk des Maschinenhauses aufgehängt.

Die Übertragung der Kolbenbewegung zu dem Pumpengestänge, das in gleicher Weise auf und nieder zu bewegen ist, erfolgt durch einen zweiarmigen Hebel. Diese Schwinge, die in der Technik allgemein Balancier genannt wird, bleibt von jetzt ab ein Kennzeichen aller Dampfmaschinen bis ins neunzehnte Jahrhundert hinein. Sie scheint dem Maschinenbauer von heute das Sinnbild der Schwerfälligkeit, und dieses Urteil ist durchaus richtig, da bei jeder Maschine, die einen Balancier besitzt, ein recht erhebliches totes Gewicht bei Beginn jedes Hubs beschleunigt und am Ende wieder aufgehalten werden muß. Solange es aber unmöglich war, sorgfältig gehobelte oder ausgebohrte Geradführungen herzustellen, solange ein gedrängter Aufbau der Maschine durch Anwendung hochwertigen Materials nicht erzielt werden konnte, diente der Balancier als ein treffliches Hilfsmittel, da er eine rohe und doch nutzvolle Zusammenordnung der einzelnen Teile ermöglichte.




302. Smeatons Katarakt

Er ist heute aus dem Bereich der ortfesten Maschinen längst völlig verschwunden, hat sich aber bis in unsere Tage auf den großen Heckraddampfern erhalten, welche die amerikanischen Binnenseen befahren, weil er auf diesen eigentümlich gebauten Fahrzeugen eine besonders günstige Gestaltung des Antriebs ermöglicht.

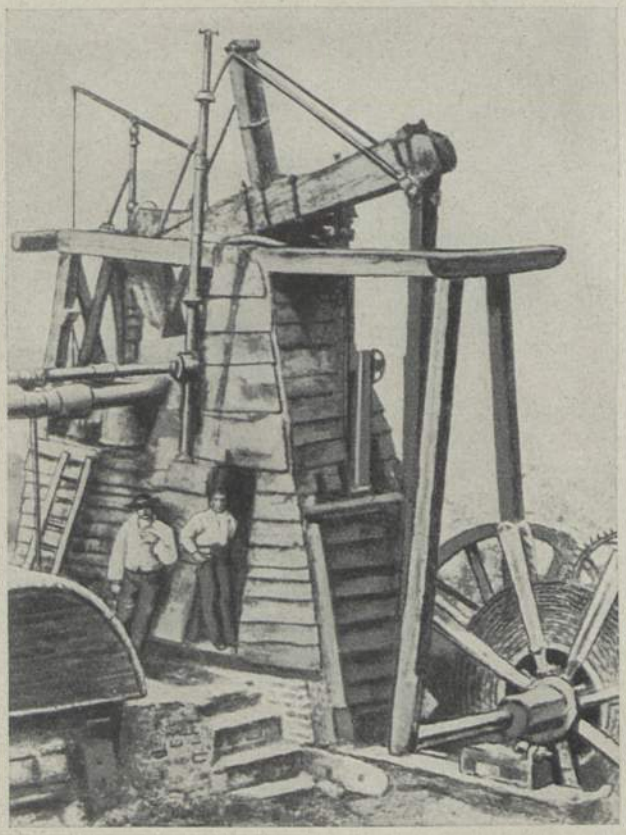
Bei der Newcomen-Maschine ist an das eine Ende des Balanciers der Dampfkolben gehängt, an das andere das Pumpengestänge, das gleichfalls einen Kolben trägt. Die Verbindung geschieht mittels Ketten; sie schmiegen sich bei der Bewegung beiderseits an einen Kreissektor, dessen Krümmungsmittelpunkt der Drehpunkt des Balanciers ist. Hierdurch wird bewirkt, daß der Dampf- wie der Pumpenkolben stets einigermaßen senkrecht gehoben und gesenkt werden. Das Auflager des Übertragungshebels stützt sich auf eine Mauer.

Das Gewicht des Pumpengestänges, das, wenn nötig, durch angehängte Eisenklötze noch vergrößert werden kann, zieht den Kolben in dem oben offenen Zylinder empor. Gleichzeitig wird der Hahn in dem Verbindungsstutzen zum Kessel von Hand geöffnet, so daß der eintretende Dampf die Aufwärtsbewegung unterstützt. Kurz bevor der Kolben seine höchste Lage erreicht hat, wird der Dampfeinlaß geschlossen und ein anderer Hahn geöffnet, der kaltes Wasser zur Herbeiführung einer möglichst raschen Niederschlagung des Dampfs im Zylinder in diesen strömen läßt.

Die Kondensation wurde bei den ältesten Maschinen dadurch bewirkt, daß das Kühlwasser außen um den Zylinder strömte. Eines Tags aber soll Newcomen bemerkt haben, daß seine Maschine plötzlich rascher arbeitete. Ursache war ein Loch, das sich im Kolben gebildet hatte, so daß kaltes Wasser in den Innenraum des Zylinders lief. Hierdurch belehrt, ersetzte der kluge Mann die Oberflächen-Kondensation durch die sehr viel wirksamere Einspritz-Kondensation.

Aus einem hoch liegenden Gefäß, das seine Speisung von der Hauptpumpe erhält, wird das Wasser mittels eines Rohrs durch den Zylinderboden eingeführt. Sobald der Dampf kondensiert ist, erhält der äußere Luftdruck die Übermacht, er drückt den Kolben nieder und hebt damit das Pumpengestänge. Wir sehen also, daß auch jetzt noch der Dampf nur ein Zwischenmittel, nur ein Schaffer von Luftleere, kein selbständiger Arbeiter ist. Der enge Anschluß an Papin ist unverkennbar.

Von größter Wichtigkeit für ein gutes Arbeiten der Maschine war eine sorgfältige Abdichtung des Kolbens gegen die recht unregelmäßig gestalteten Zylinderwandungen. Zu diesem Zweck wurde zunächst ein mit allerlei Stoffen getränktes Tau oben um den Außenrand des Kolbens gelegt und mittels aufgesetzter Gewichte angepreßt. Wiederum führte der Zufall, der in jenen Zeiten des konstruktiven Umhertappens eine nicht geringe Rolle spielte, zu einer Verbesserung. Einmal war zur Abdichtung des Kolbens ein kreisförmiges Stück Leder verwendet worden, dessen Durchmesser die lichte Zylinderweite übertraf. Der überstehende Teil lag an den Wandungen und wurde durch die Reibung verschlissen. Als das Lederstück gerade so groß geworden war wie die Zylinderweite, so daß nur noch der schmale Rand anlag, zeigte es sich, daß die Dichtung nun sehr viel besser war. Fortab wurde nur noch eine gut passende Lederscheibe angewendet.



303. Atmosphärische Fördermaschine zu Coalbrookdale, erbaut um 1790
Deutsches Museum, München

Aber auch sie ließ noch zu viel Luft durch, weshalb Newcomen dafür sorgte, daß stets eine Wasserschicht über dem Kolben stand. Aus dem Gefäß für das Kondenswasser führte ein Rohr, aus dem ständig Wasser tropfte, in den Oberteil des Zylinders. Das in dessen unteren Teil durch die Niederschlagung des Dampfs und die Einspritzung sich sammelnde Wasser floß durch ein ständig offenes Rohr nach außen ab. Ein Abschlußventil war hier nicht notwendig, da der Dampfdruck den Atmosphärendruck nicht überstieg.

Die Bedienung der Maschine war nach den Begriffen der damaligen Zeit sehr bequem. Es brauchten nur abwechselnd der Dampfhahn und der Kühlwasserhahn geöffnet und geschlossen zu werden, um die Vorrichtung in Gang zu erhalten. Allzu große Aufmerksamkeit war hierfür nicht notwendig, denn die Zahl der Hübe betrug im Anfang nicht mehr als 6 bis 8 in der Minute. Der Erfinder hob rühmend hervor, daß ein Knabe den Gang der Maschine regeln könnte.

Ein solcher Steuerknabe soll denn auch nach einer hübschen Erzählung eine grundlegende Verbesserung der Maschine ersonnen haben.

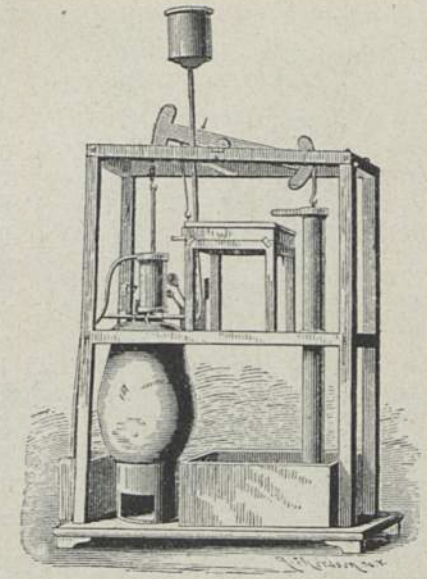
Humphrey Potter, der bis dahin Schafe gehütet hatte, wurde zu seinem Verdruß gezwungen, eine Newcomen-Maschine zu beaufsichtigen. Es mißfiel dem munteren Burschen sehr, daß er den Aufenthalt unter freiem Himmel mit der Einzwängung in ein Maschinenhaus vertauschen sollte. Er mochte sich lieber vor der Tür als drinnen aufhalten. Das ging aber nicht an, weil er in jeder Minute mehrere Male die Hähne stellen mußte. Da fiel dem Jungen eines Tages ein, daß solch eine Maschine doch eigentlich klüger sein müsse als ein Schaf und wohl imstande sein könne, sich selbst zu versorgen. Wenn man die Hähne richtig mit dem auf und nieder schwingenden Balancier verband, würde dieser sie immer im rechten Augenblick umstellen.

Humphrey nahm ein paar Bindfäden, knüpfte sie in wohlüberlegter Weise an und siehe da: die Maschine lief von selbst. Nun konnte er sich im Hofe tummeln und frische Luft an Stelle von Wasserdampf und Kohlenrauch atmen. Als schließlich ein Aufseher das Werk des Jungen entdeckte, da lobte er ihn nicht etwa, weil er eine prächtige neue Erfindung gemacht hatte, sondern gab ihm ein paar Maulschellen wegen seiner Faulheit und jagte ihn mit Schanden davon.

Dieser letzte Teil des sagenhaften Berichts könnte richtig sein. Denn die Menschen bedienen sich wohl gern neuer nützlicher Dinge, sie vermeiden es aber, wenn es irgend geht, Lebenden dafür dankbar zu sein. Im übrigen aber ist es nicht glaubhaft, daß die selbsttätige Steuerung der Dampfmaschine, die eines ihrer wichtigsten Besitztümer geworden, in so einfacher Art entstanden ist. Denn mittels Bindfäden konnten die Hähne wohl geschlossen, nicht aber wieder geöffnet werden, wenn nicht verwickelte Umführungen angewendet wurden, die der kleine Humphrey doch wohl kaum zu erdenken, sicher aber nicht anzulegen vermochte. Fest steht, daß 1718 von Henry Beighton die selbsttätige Steuerung mittels eines vom Balancier herabhängenden Steuerbaums eingeführt wurde. Dieser, eine kräftige Bohle, trug an einer Kante und in einem Schlitz mehrere Anschläge, die beim Auf- und Niedergehen die Hähne leicht in richtiger Weise und zur geeigneten Zeit öffneten und schlossen. Die Arbeitsfähigkeit der Newcomen-Maschine stieg jetzt auf 12 bis 15 Hübe in der Minute.

Auf Bild 300 sehen wir an dem Kessel bereits einige Sicherheitsvorrichtungen angebracht, die den Anfang der heute so überaus mannigfaltigen Kesselarmatur oder -aus-

rüstung bilden. Rechts befindet sich im Deckel eine Öffnung, auf die ein Bleiklotz gelegt ist. Dieser genügte bei dem geringen Kesseldruck als Sicherheitsventil. Die beiden Hähne daneben dienen zur Feststellung des Wasserstands. Beim Öffnen des einen durfte nur Dampf, beim Aufmachen des zweiten mußte Wasser austreten, wenn dessen Stand die richtige Höhe hatte. Probierhähne gleicher Art gibt es noch heute an allen Kesseln; sie werden benutzt, wenn das Wasserstandglas unbrauchbar geworden ist. Die Füllung des Kessels erfolgte mittels eines hoch hinaufgeführten Rohrs. Der Druck der Wassersäule in diesem genügte, den bescheidenen Kesseldruck zu überwinden.



304. Modell der atmosphärischen Maschine von Thomas Newcomen

Der Balancier war zuerst ein einfacher Baumstamm, dann stellte man ihn haltbarer aus besonders starken Balken her, die durch eiserne Bänder zusammengehalten wurden. Es währte lange, bis eiserne Schwingen in Gebrauch kamen.

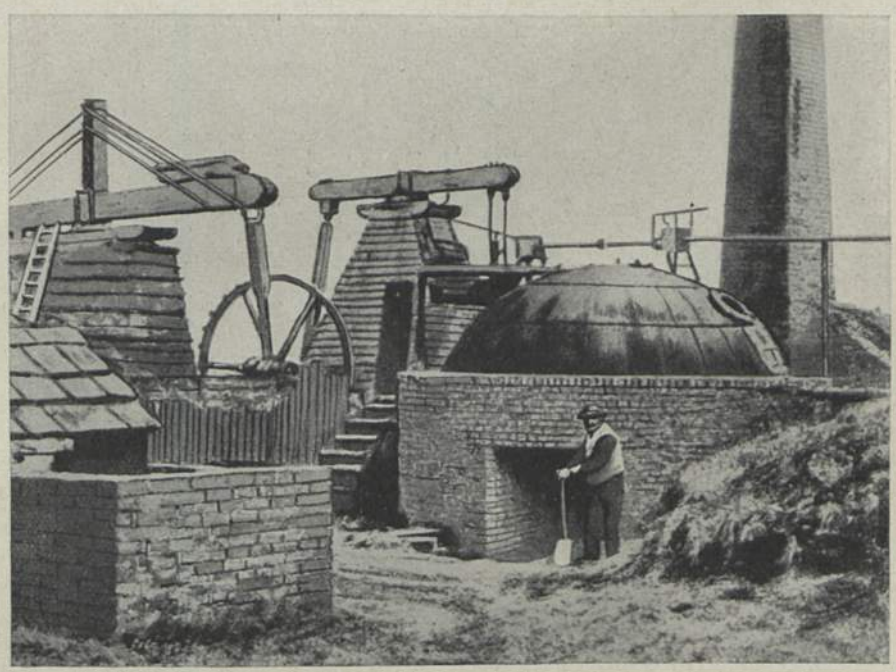
Eine schwierige Aufgabe war es, die Hubhöhe der Maschine zu begrenzen. Im Anfang wurden gar keine Anschläge vorgesehen, der Schwingbalken fuhr bald auf der einen, bald auf der anderen Seite zu tief nach unten, so daß die Verbindungsketten, die zum Kolben oder zum Pumpengestänge führten, in Unordnung gerieten. Das suchte man zunächst in sehr primitiver Weise dadurch zu verhindern, daß die Enden des Balanciers durch Stricke von richtiger Länge mit einer Balkenlage im Dach verbunden wurden. Aber die Taue waren durch die Gewalt der Stöße bald zerrissen. Hierauf wurde die Hubbegrenzung dadurch herbeigeführt, daß Vorsprünge an den Enden des Balanciers gegen federnde Balken schlugen. Die Arbeit der Maschine war alsdann von einem sehr kräftigen Krachen begleitet, das am Ende jedes Hubs das ganze Haus erschütterte.

Die Newcomen-Maschine wurde bald nach ihrem Auftreten von den englischen Bergwerkbesitzern lebhaftest begehrt. Die Hersteller hatten alle Hände voll zu tun, um die Nachfrage zu befriedigen, zumal auch sie einen richtigen Fabrikbetrieb nicht einzurichten vermochten. Mußte doch jedesmal eine den besonderen Verhältnissen angepaßte veränderte Bauart hergestellt werden. Die ersten Maschinen gingen in die Kupfer- und Zinngruben von Cornwall, die am stärksten mit dem Wasser zu kämpfen hatten. Bald aber begannen auch die Steinkohlen-Bergwerke sich der neuen Helfer zu bedienen. 1720 bereits bildete sich eine Gesellschaft von Londoner Kaufleuten, die es zu ihrer Geschäftsaufgabe machten, „Wasser durch Feuer zu heben".

Im gleichen Jahr ist eine besonders leistungsfähige Newcomen-Maschine in dem Londoner Wasserwerk York Buildings aufgestellt worden, das, wie wir wissen, bereits die Savery-Pumpe versucht hatte. Ein Zeitgenosse nennt sie bewundernd „eine erhabene Maschine". Sie machte 12 bis 15 Hübe in der Minute und förderte in der Stunde 3,1 Kubikmeter Wasser aus der Themse etwa 38 Meter hoch. Sie verbrauchte im Jahr für 20 000 Mark Kohle. Als eine besonders treffliche Ausführung galt auch eine 1722 in der Nähe von Coventry in einer Kohlengrube errichtete Feuermaschine. Ihre Betriebskosten sollen im Jahr nur 3000 Mark betragen haben, während die Unterhaltung der 50 Pferde, deren Arbeit sie ersetzte, 18 000 Mark jährlich verschlungen hatte.

„Diese Maschine, die Newcomen selbst aufgestellt haben soll, mag", so schreibt Matschoß, „eine rühmliche Ausnahme gewesen sein unter den vielen Feuermaschinen, deren Ausführung und Betrieb noch sehr mangelhaft war. So waren z. B. die Kessel gewöhnlich bei weitem zu klein im Verhältnis zum Dampfverbrauch. Infolgedessen mußte der Betrieb oft so lange eingestellt werden, bis der Heizer wieder etwas Dampf zur Verfügung hatte. Die Dampfleitung war fast immer zu eng, der Dampf wurde daher stark gedrosselt. Die Erbauer neuer Maschinen kopierten mehr oder weniger verständnislos die ausgeführten Anlagen und waren stolz, wenn ihre Maschine bei jedem Hub nur eine möglichst große Wassermenge zu heben vermochte.

„Dies allein schien ihnen ein Maß für die Stärke der Maschine zu sein. Daß bei der Leistung einer Maschine auch die Geschwindigkeit, mit der die Last gehoben wird, also die Anzahl der Hübe, in Frage kommt, kümmerte sie wenig. Wollte man die Kraft der Maschine vergrößern, so wechselte man einfach den vorhandenen Zylinder gegen einen von größerem Durchmesser aus. Da man aber alle übrigen Teile gewöhnlich unverändert ließ, so waren Unzuträglichkeiten im Betrieb, die mitunter zu

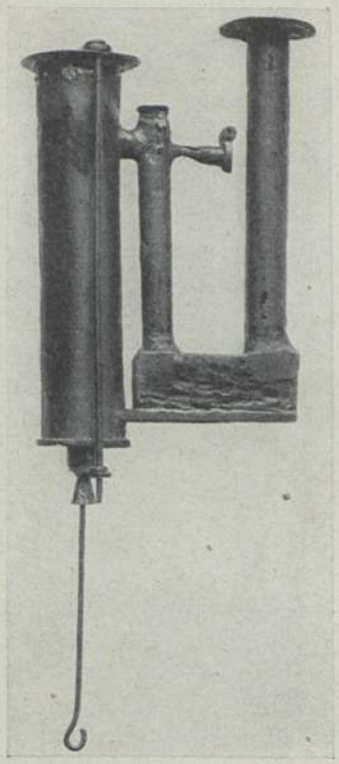


305. Atmosphärische Maschine zu Derby, bis 1886 in Betrieb gewesen
Deutsches Museum, München

dessen vollständiger Einstellung führten, die natürlichen Folgen der ‚Verbesserung'."

Es war daher für die Weiterentwicklung der Maschine sehr wichtig, daß ein sowohl praktisch wie theoretisch ausgezeichnet geschulter Kopf sich um ihre Ausbildung bemühte. John Smeaton, den wir bereits in Band III als den Erbauer des dritten Leuchtturms von Eddystone kennengelernt haben, einer der hervorragendsten Maschinenbauer seiner Zeit, begann sorgfältige Untersuchungen der Feuermaschinen und entdeckte bald die Hauptmängel.

Soweit es bei dem Grundcharakter der Maschine überhaupt möglich war, suchte er vor allem den Dampfverbrauch zu mindern. Denn vier Fünftel des im Kessel erzeugten Dampfs schlugen sich sogleich beim Eintreten an den kalten Wänden des Zylinders nieder, so daß zu dessen Füllung eine sehr erhebliche Dampfmenge notwendig war. Smeaton führte den Kondenswasserstrahl so, daß er nicht die Zylinderwände, sondern den mit Holz belegten Kolbenboden traf. Der Dampfraum konnte auf diese Art wärmer bleiben. Ferner gelang es ihm, Grundlagen für eine Berechnung der Einzelteile zu finden, deren Abmessungen bisher ausschließlich „nach der Faust" bestimmt worden waren. Der Kolben erhielt eine bessere Dichtung, indem an der Gleitfläche eine Nut eingefeilt wurde, in die man eine Hanfpackung mit Talgtränkung legte. Durch alle diese Verbesserungen und durch sorgfältigere Ausführung aller Teile vermochte Smeaton, den Brennstoffverbrauch auf ein Drittel hinabzusetzen (Bild 301).

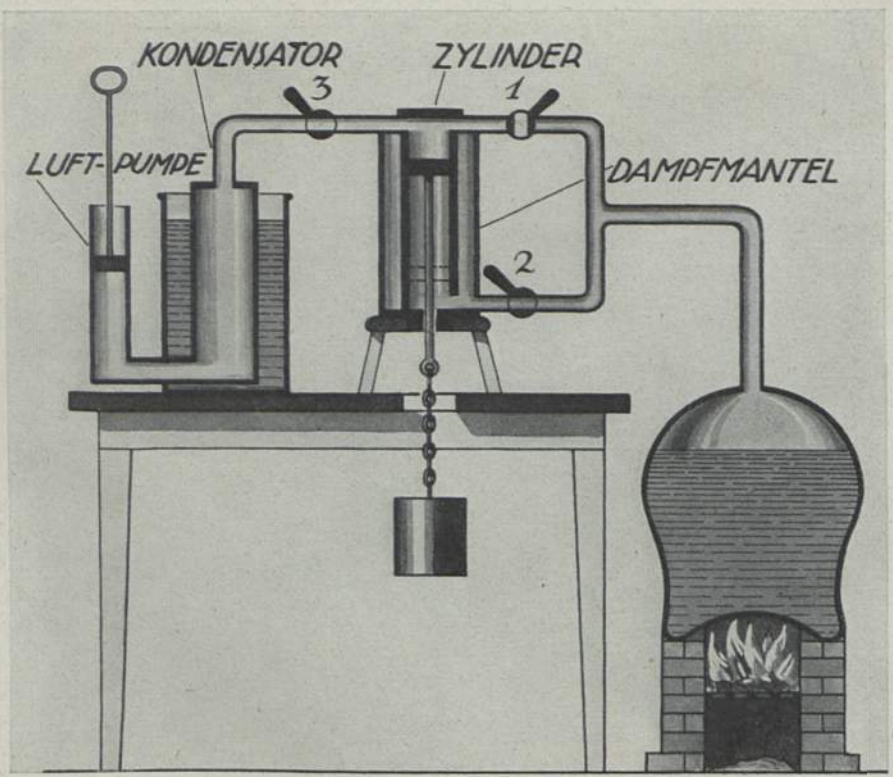


306. Watts Versuchsapparat von 1765
Science Museum Kensington-London

Er erfand auch die erste Vorrichtung, um die Hubzahl der Maschine und damit ihre Leistung den wechselnden Anforderungen anzupassen. Der von ihm erdachte „Katarakt" (Bild 302) war ein Winkelhebel, dessen senkrechter Arm einen Becher trug. Sobald dieser mit Wasser gefüllt war, kippte er um, und der wagerechte Arm öffnete nun mittels einer Kette den Hahn für das Einspritzwasser. Wenn der Zufluß zu dem Kataraktgefäß so eingestellt wurde, daß es lange währte, bis der Becher gefüllt war, dann geschah die Einleitung der Kondensation in größeren Abständen, und die Maschine machte nur eine geringe Zahl von Hüben in der Minute. Wurde das Gefäß schnell gefüllt, dann arbeitete die Maschine rasch. Durch einfache Einstellung eines Wasserhahns war also eine Regelung in weiten Grenzen möglich. Die Bergleute nannten die Vorrichtung, deren überraschende Arbeit sie höchlich ergötzte, „Jack in the box"; wir würden sagen „Hans im Kasten".

Im Jahre 1767 waren in der Nähe von Newcastle bereits 57 Maschinen Smeatonscher Art tätig, die etwa 1200 Pferdestärken leisteten. In einer Schilderung des Bergbetriebs von Cornwall, die 1778 erschien, sagt Price: „Durch Newcomens Maschine wurde es uns möglich, unsere Schächte doppelt so tief wie früher abzuteufen. Aber der Nutzen wird indes durch den ungeheuren Brennstoffverbrauch bedeutend vermindert, denn jede Feuermaschine von einiger Größe verbraucht jährlich Kohle für 3000 Pfund Sterling, eine Summe, die so groß ist, daß die Anwendung beinahe nicht mehr lohnt." Hieraus geht hervor, daß auch Smeatons Verbesserungsarbeit nur Stückwerk war. Einem anderen genialen Mann, der damals schon seine Arbeit begonnen hatte, war es vorbehalten, den entscheidenden Schritt vorwärts zu tun.

Die Maschinen von Newcomen-Smeaton vermochten aber dennoch eine Zeitlang mit den weit besseren Schöpfungen von Watt in Wettbewerb zu treten. Gleichzeitig mit diesen wurden immer noch Maschinen alter Art erbaut. Die letzten sind bereits mit Kurbelgetrieben zur unmittelbaren Erzeugung drehender Bewegung versehen gewesen. Eine solche Ausgestaltung der „Atmosphärischen" hatte man früher für unmöglich gehalten. Die auf Bild 303 dargestellte Maschine wurde 1790 zu Coalbrookdale erbaut. Sie zeigt, so sagt Matschoß, vorzüglich den ungeheuren Unterschied zwischen der Grobschmiede- und Zimmermannsarbeit der Feuermaschinen und der feinmechanischen Durcharbeitung unserer heutigen Präzisions-Dampfmaschinen. 1817 begann die auf Bild 305 wiedergegebene

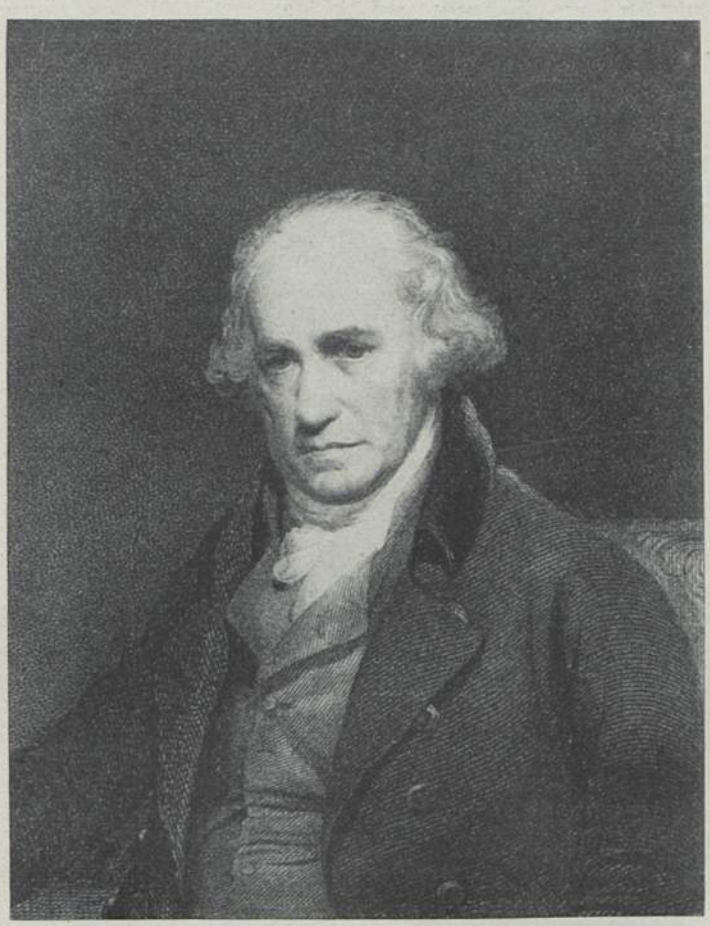



307. Schematischer Schnitt durch den Versuchsapparat von James Watt

Anlage auf der Kohlengrube bei Derby den Betrieb; sie hat bis 1886 gearbeitet. Man sieht besonders deutlich den gewaltigen, im Freien stehenden Kessel mit kugelförmiger Haube. In dem Bergwerk Rutherglen bei Glasgow ist eine ähnliche Maschine noch im zweiten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts gelaufen.

Auf dem Festland wurde die erste Feuermaschine schon 1715 auf Anordnung des Landgrafen Karl von Hessen, der einst Papins Gönner gewesen war, in Kassel aufgestellt, wo sie lange ein Pumpwerk angetrieben hat. 1717 kam, nach Feldhaus, eine Newcomen-Maschine nach Rußland, 1722 nach Wien und 1727 nach Schweden.

Wir haben gesehen, daß das Geschlecht der Dampfmaschinen bereits vor James Watts Auftreten verbreitet war. Dennoch ist er durchaus als der Mann anzusehen, aus dessen Händen die Menschheit das Geschenk dieses ausgezeichneten und grundlegenden Hilfswerkzeugs empfing. Denn Technik und Wirtschaft sind untrennbar, und die Newcomen-Maschinen jeglicher Form fraßen mehr Futter, als sie durch ihre Arbeit verdienten. Wäre es bei ihrem Wirken geblieben, so hätte sich das industrielle Leben auf der Erde nicht entfalten können. Watts Streben ging denn auch zunächst nur dahin, eine Verringerung des Kohleverbrauchs bei Feuermaschinen zu bewirken. Erst allmählich drang sein Schaffen von selbst darüber hinaus. Das Genie sprengt eben stets die Kette enger Begrenzung und gelangt zu Ergebnissen, die eine höhere unbekannte Macht, nicht das enge menschliche Denken ihm zu erreichen befiehlt. Wir betrachten das Leben und Wirken von James Watt (Bild 308) hauptsächlich im Anschluß an eine treffliche Darstellung, die Theodor Beck gegeben hat. Der Geburtsort des großen Manns ist Greenrock in Schottland. Hier kam er am 19. Januar 1736 zur Welt. „Dieser Ort," schreibt Thurston, „damals ein ärmliches Fischerdorf, jetzt eine durch Handel und Gewerbe belebte Stadt, läßt gegenwärtig in jedem Jahr eine stattliche Reihe von Dampfschiffen vom Stapel, deren Maschinen wahrscheinlich mehr Kraft abgeben, als sämtliche Maschinen, die bei Watts Geburt überhaupt vorhanden waren."



James Watt

308. Der Erbauer der ersten Dampfmaschine
Nach dem Stich von C. E. Wagstaff. Staatl. Museen, Berlin

Der Großvater, Thomas Watt aus Crawfordsdyke bei Greenock, war ein tüchtiger Lehrer der Mathematik und der Schiffahrtkunde. Der Vater, der gleichfalls den Vornamen James führte, betrieb seit 1730 zu Greenock das Gewerbe eines Zimmermanns und Schiffbauers. In seiner Werkstatt wurden aber auch manche andere Dinge, wie Möbel und Särge, hergestellt. Er war Bauunternehmer, Mit-eigentümer verschiedener Schiffe und beteiligte sich gelegentlich an kaufmännischen Spekulationen. Das Vertrauen seiner Mitbürger berief ihn an die Spitze der Gemeindeverwaltung.

Er hatte fünf Kinder, von denen drei in frühester Jugend starben, das jüngste vor Erreichung des Mannesalters auf einer Reise nach Amerika umkam. Nur James, der zweitjüngste, blieb am Leben, obgleich er sehr zart war und nur durch sorgfältigste Pflege gedieh. Er vermochte an den Spielen kräftiger Knaben nicht teilzunehmen und wurde daher zunächst zu Hause von den verständigen Eltern unterrichtet. Die Mutter lehrte ihn lesen, und der Vater gab ihm schon frühzeitig passende Beschäftigung in der Werkstatt, wodurch sich der Knabe eine Handgeschicklichkeit erwarb, die ihm später sehr nützlich gewesen ist. Das Kind litt viel an Kopfschmerzen, durch die es oft wochenlang an das Zimmer gefesselt wurde.

Frühzeitig schon zeigte sich eine Vorliebe für die Mathematik. Es wird erzählt, daß ein Freund des Hauses, als er bei einem Besuch den Knaben mit einem Stück Kreide Zeichnungen machen sah, zu dem Vater sagte: „Sie sollten das Kind in die Schule schicken und nicht zugeben, daß es seine Zeit zu Hause vergeudet!" Der Vater aber erwiderte stolz: „Sehen Sie erst einmal zu, womit mein Kind sich beschäftigt, ehe sie es schelten." Als man hinzutrat, gewahrte man, daß der sechsjährige James mit der Lösung einer geometrischen Aufgabe beschäftigt war.

Die berühmte Anekdote von dem Teekessel, dessen Deckel durch den ausströmenden Dampf bewegt wurde und dem jungen James den Gedanken zur Erfindung seiner Maschine eingegeben haben soll, schrumpft bei genauerer Durchforschung seiner Lebensgeschichte zu folgendem, recht einfachen Begebnis zusammen. Eines Tages tadelte eine Tante das Kind wegen seiner Faulheit. „James," soll sie gesagt haben, „ich habe noch niemals einen so faulen Jungen gesehen, wie du bist! Nimm ein Buch und beschäftige dich nützlich! Seit einer Stunde hast du kein Wort gesprochen, sondern immer nur den Deckel vom Teekessel genommen und ihn wieder darauf gesetzt, bald eine Tasse und bald einen Löffel über den Dampf gehalten und die Tropfen gezählt, in die er sich verwandelt."

„In den Augen eines Arago", so führt Beck aus, „und der meisten späteren Biographen Watts wird hier der kleine James vor dem Teekessel schon zu dem großen Ingenieur, der sich auf die Erfindung vorbereitet, die ihn unsterblich machen sollte. Wahrscheinlich war aber das Urteil der Tante richtiger. Nichts kommt häufiger vor,

als daß Kinder sich mit ähnlichen Erscheinungen beschäftigen, wie die hier erwähnte. Wenn sie zum Beispiel Seifenblasen machen und ihr Aufsteigen in die Luft beobachten, bis sie platzen, ist deshalb noch nicht anzunehmen, daß sie dabei an das Aufsuchen der dieser Erscheinung zugrunde liegenden physikalischen Gesetze denken."

Die Eltern hielten es schließlich doch für richtig, den Jungen in die Schule zu schicken. Hier konnte er aber gar nicht zurechtkommen und vermochte nicht, sich mit den Kameraden, welche die üblichen geräuschvollen Spiele trieben, zu verständigen. Das Auswendiglernen fiel ihm schwer, er wurde für einen wenig begabten Schüler gehalten. In jener Zeit aber trat bereits eine Fähigkeit hervor, die mit seinem harten Lebenswerk in keiner Beziehung, ja sogar in einem gewissen Gegensatz dazu steht.

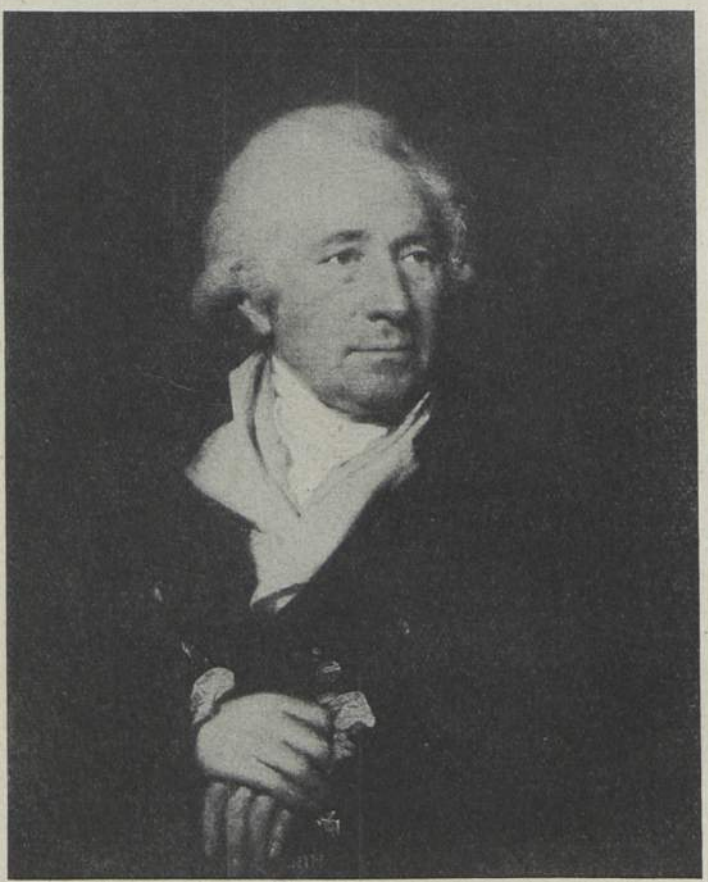
Als der junge Watt im vierzehnten Lebensjahr nach Glasgow geschickt wurde, um dort seine Gesundheit ein wenig zu kräftigen, schrieb die Verwandte, bei der er wohnte, nach Greenrock: „Ich kann die Aufregung nicht länger ertragen, in die er mich hält, und bin durch Mangel an Schlaf ganz erschöpft. Jeden Abend, ehe wir zur Ruhe gehen, fängt er eine Unterhaltung mit mir an und erzählt irgendeine packende Geschichte. Mag sie nun scherz- oder ernsthaft sein, immer weiß er unser Interesse so zu fesseln, daß die ganze Familie ihm mit angehaltenem Atem zuhört und Stunde auf Stunde unbeachtet verstreichen läßt."

Die Gabe, spannend zu erzählen, hat Watt bis ins Greisenalter bewahrt. Selbst Walter Scott, mit dem er später bekannt wurde, hat ihn deshalb bewundert.

Als dann der mathematische Unterricht begann, änderte sich die Anschauung der Lehrer über den Knaben gründlich. Er wurde bald der Erste in seiner Klasse. Zu Hause beschäftigte er sich so geschickt mit Arbeiten in der Werkstatt, daß die Arbeiter zu sagen pflegten: „Der kleine James hat ein Vermögen in seinen Fingerspitzen." Am liebsten besserte er nautische Instrumente, wie Quadranten und Schiffskompasse, aus und legte keinen dieser Gegenstände aus der Hand, bevor er sein Wesen genau begriffen hatte. Dieses Sichversenken in die Dinge, womit zugleich der Wunsch verbunden war, Verbesserungen daran auszudenken, ist für Watt kennzeichnend und war die Kraft, die ihn auf seinen Lebensweg drängte.

Der Knabe war auch ein leidenschaftlicher Freund der Bücher. Alles Gedruckte, das ihm in die Hand kam, las er durch, treffliche Werke, wie die „Elemente der Physik" von s'Gravesande, die er mit fünfzehn Jahren bereits durchgearbeitet hatte, ebenso wie unbedeutende Bücher. Als ein Bekannter ihm riet, er möchte mit mehr Auswahl lesen, antwortete er: „Ich habe noch nie ein Buch gelesen, ohne Belehrung oder Vergnügen daraus zu schöpfen." So kann nur ein Mensch sprechen, dessen Geist zu eigenem Schaffen befähigt ist.

Nach Beendigung der Schulzeit war es nicht zweifelhaft, welches Gewerbe der junge Mann erlernen sollte. Seine Vorliebe für die Beschäftigung mit Präzisions-Instrumenten ließ ihn zum Feinmechaniker geeignet erscheinen. In dem benachbarten Glasgow gab es aber niemand, der diese Kunst richtig betrieb. Kurze Zeit war Watt dort in der Lehre bei einem Mann, der sich Optiker nannte, aber in der Hauptsache Zeichenwerkzeuge, Fischangeln, Brillen und Geigen verfertigte, aber auch Klaviere stimmte. Ein Professor der Universität, Dr. Dick, empfahl daher dem Lerneifrigen, nach London zu gehen. Der Vater war damit einverstanden, obgleich es ihm schwer fiel, die größeren Kosten aufzubringen.



Matthew Boulton

309. Watts Kompagnon

Nach dem Gemälde in der Corporation Art Gallery, Birmingham

Es gab damals noch keine regelmäßige Verbindung mit der Hauptstadt, und so mußte der junge Watt dorthin reiten. Zwölf Tage brauchte er zu dem Weg von Glasgow nach London, der heute von der Eisenbahn in wenigen Stunden zurückgelegt wird — durch die Kraft der Lokomotive, die nur auf Grund der Arbeiten Watts geschaffen werden konnte.

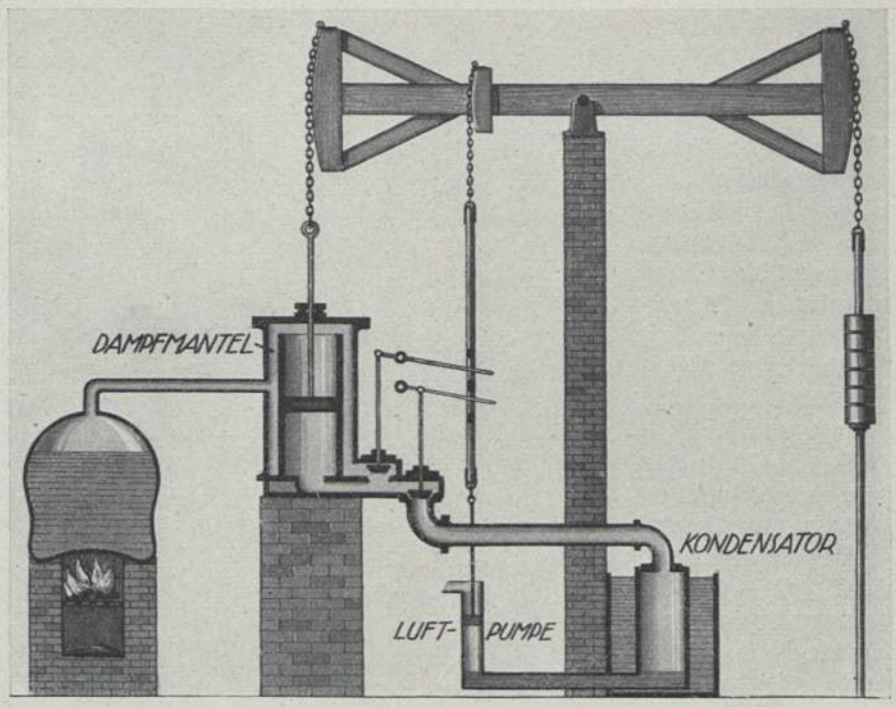
Bei dem Meister Morgan in London lernte Watt bald, die schwierigsten Aufgaben zu bewältigen. Nach einem Monat schon war er imstande, einen Quadranten besser zu machen als irgendein anderer Lehrling. Um dem Vater Ausgaben zu ersparen, lebte er sehr einfach und verbrauchte nur acht Schillinge in der Woche. Auch suchte er durch Privatarbeiten, die er nur in der Nacht erledigen konnte, etwas hinzu zu verdienen. Aber er hatte seinem schwächlichen Körper zu viel zugemutet. Seine Hände zitterten am Abend wie die eines alten Mannes, rheumatische Schmerzen und ein heftiger Husten stellten sich ein. Zur Wiederherstellung seiner Gesundheit mußte er nach Hause zurückkehren, wo sein Befinden sich rasch besserte.

Mit 21 Jahren, also 1757, wollte Watt alsdann bereits versuchen, seinen Lebensunterhalt selbständig zu verdienen. Er beschloß, sich in Glasgow als Mechaniker niederzulassen. Aber da entstand ein unerwartetes Hindernis. Die Zunft der Schmiede, in deren Bereich seine Tätigkeit fiel, erhob Widerspruch gegen die Eröffnung einer Werkstätte, weil Watt weder der Sohn eines Glasgower Bürgers war noch in der Stadt ausgelernt hatte. Obgleich es niemanden dort

gab, der Fein-Instrumente anzufertigen vermochte, siegte doch das enge Zunftinteresse, das hinter Redensarten von Sitte und Ordnung den Eigennutz versteckte.

Aus den hierdurch entstehenden Schwierigkeiten wurde Watt durch Professor Dick gerettet, der ihn mit Arbeiten für die Laboratorien der Universität beauftragte. Die Anstalt, über deren Gebiet die Zünfte keine Macht hatten, stellte ihm auch bald einen Raum zur Verfügung, in dem er eine Werkstätte einrichten konnte. Er durfte sogar in einem an der Straße liegenden Raum einen Verkaufsladen betreiben.

Watt begann eifrig zu arbeiten, aber es war ihm doch nicht möglich, so viel zu verdienen, wie er brauchte, obgleich er wenig Bedürfnisse hatte. Der Vater mußte öfter kleine Geldsummen zur Unterstützung schicken. Viele Jahrzehnte hatte der künftige Meister noch in ärmlichen Verhältnissen zuzubringen. In ständigem Ringen mit der Not mußte er den weitaus größten Teil seines Lebenswerks vollbringen.




310. Schematischer Schnitt durch die erste von Watt auf Bestellung für John Wilkinson in Busham erbaute Dampfmaschine

„Zunächst verwandte Watt", so schreibt Beck über diesen Lebensabschnitt, „einen Teil seiner freien Zeit auf physikalische und chemische Experimente, aber da sie ihm nichts eintrugen, war er genötigt, nach einem Artikel zu suchen, wofür er Abnehmer finden konnte. Obgleich er kein musikalisches Gehör hatte und fast keine Note kannte, folgte er dem Beispiel seines ersten Lehrmeisters und machte Geigen, Flöten und Gitarren. Sein Freund, Professor Dr. Black, bestellte, um ihm einen Verdienst zuzuwenden, eine Drehorgel bei ihm. Sofort studierte er die Harmonielehre von Dr. Smith in Cambridge, machte dann ein Modell und baute danach eine Orgel, die sehr gut befunden wurde. Dies ermutigte ihn, nun auch die Bestellung einer Tastenorgel für die Freimaurerloge zu übernehmen. Watt war, wie er selbst zu sagen pflegte, immer mit den Arbeiten anderer sowohl wie mit seinen eigenen unzufrieden und sann auf Verbesserungen. So brachte er auch mehrere an dieser Orgel an, und als sie fertig war, erregte sie die Bewunderung der Musiker.

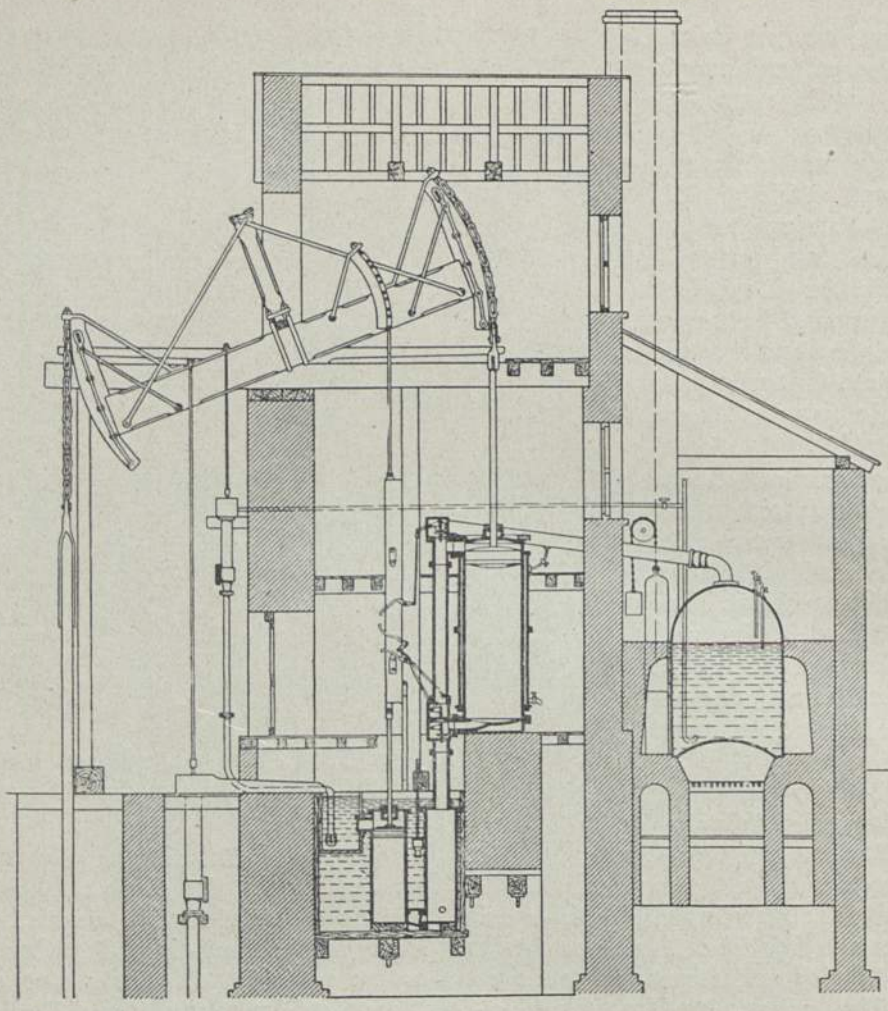
„Was ihm bei solchen Arbeiten von freier Zeit übrig blieb, verbrachte er mit Lesen. An Büchern fehlte es ihm nicht, da er die Universitätsbibliothek benutzen durfte, und sowohl Professoren wie Studierende ihm gern ihre Bücher liehen. Alle wurden durch die geistreichen Instrumente und Modelle in seiner Werkstätte und seinem Laden sowie durch seine leicht dahinfließende, bescheidene und originelle Unterhaltung angezogen, und obgleich er noch sehr jung war, baten doch die Professoren bei allen mechanischen Fragen um seinen Rat. Die Schärfe seiner Beobachtung, die Gründlichkeit seiner Kenntnisse und die Bereitwilligkeit, womit er sie anderen mitteilte, erwarben ihm die allgemeine Zuneigung."

Im Jahre 1759 wurde Watt mit John Robinson bekannt, der damals in Glasgow studierte und später als Professor der Physik in Edinburgh einen bedeutenden Ruf erlangte. Dieser Student ist es gewesen, der zum erstenmal die Gedanken des großen Verbesserers der Dampfmaschine auf diesen Gegenstand lenkte. Er regte Watt an, zu versuchen, ob nicht mittels einer Kraftmaschine ein Wagen betrieben werden könnte. Der junge Mechaniker machte auch einen Versuch, aber wegen der Unvollkommenheit des Antriebwerkzeugs mußte es ihm versagt bleiben, der erste Erbauer eines Kraftwagens zu werden.

Dennoch sollte die Anregung ihre Früchte tragen. In jener Zeit wurde auf der Govan-Kohlengrube bei Glasgow eine

311. Maschine des Kanalpumpwerks zu Birmingham
Von 1776 bis 1892 dauernd in Betrieb gewesen

Newcomen-Dampfmaschine, die zweite in Schottland, aufgestellt. Watt hörte hiervon. Er hatte noch nie eine solche Vorrichtung gesehen und fand auch keine Gelegenheit, die Grube zu besuchen. Es war ihm aber bekannt, daß die Universität Glasgow das Modell einer Newcomen-Maschine (Bild 304) besitze; man hatte es zur Ausbesserung nach London geschickt, von wo es bisher nicht zurückgekommen war. Auf Watts Anregung wurde es nun angefordert. In der bescheidenen Gestalt eines einfachen, kleinen Modells trat die Dampfmaschine zum erstenmal vor die Augen ihres Verbesserers. Der Zylinder hatte nur eine Länge von 15 Zentimetern und 5 Zentimeter lichte Weite. Der Dampferzeuger war kaum so groß wie ein gewöhnlicher Teekessel. Die Universität Glasgow bewahrt diese Maschine noch heute als ein heiliges Besitztum auf.



312. Schematischer Schnitt durch Watts einfachwirkende Balanciermaschine, die sogenannte Cornwall-Maschine von 1788

Aus Matschoß, Die Entwicklung der Dampfmaschine. Verlag Julius Springer, Berlin

Über Watts damaliges Leben und seine Kenntnisse in diesem wichtigen Augenblick geben Aufzeichnungen Robinsons treffliche Auskunft.

„Ich war eitel genug, zu glauben," so schreibt dieser Gelehrte, „daß ich es in dem Studium der Mathematik und Mechanik weit gebracht hatte, und war schmerzlich berührt, zu sehen, daß Watt viel mehr wußte als ich. Aber seine Freude an solchen Dingen ließ ihn ein Geplauder darüber mit jedem genießen, und mit angeborener Gefälligkeit ertrug er meine Neugierde und ermutigte mich, einen intimeren Verkehr mit ihm anzuknüpfen. Ich verbrachte viele müßige Stunden bei ihm und war ihm gewiß oft lästig .... Ich habe viel von der Welt gesehen und muß bekennen, daß mir niemals eine zweite Person vorgekommen ist, deren Überlegenheit alle anerkannten, und der sie doch so aufrichtig zugetan waren. Denn seine Überlegenheit war unter der liebenswürdigen Aufrichtigkeit und der bereitwilligsten Anerkennung der Verdienste anderer verborgen. Er war stets bereit, dem Scharfsinn eines Freunds Dinge zuzuschreiben, die nur Ausarbeitungen seiner eigenen Andeutungen waren. Ich bin berechtigt, dies zu sagen, weil ich es oft an mir selbst erfahren habe."

Als Watt das Modell in Betrieb gesetzt hatte, sah er alsbald, daß der Kessel nicht imstande war, eine ausreichende Dampfmenge zu liefern. Das erschien ihm seltsam, da der Dampferzeuger einen mehrfach größeren Rauminhalt hatte als der Zylinder. Er erklärte sich den hohen Dampfverbrauch zunächst durch die unzweckmäßigen Abmessungen der Einzelteile und die starke Abkühlung, die der zugeführte Dampf durch die Wärmeausstrahlung der bronzenen Zylinderwandung erfuhr. Deshalb baute er ein neues verbessertes Modell derselben Art, machte den Zylinder aus Holz, das in Öl getränkt und im Ofen gut getrocknet war, und glaubte so Abhilfe geschaffen zu haben. Hierin sah er sich jedoch getäuscht und begann nun nach seiner Art die physikalischen Vorgänge, die sich hier abspielten, genau zu durchforschen. Eine lange Reihe von Untersuchungen erst brachte ihn zu der richtigen Erkenntnis. Watt sah ein, daß eine weit vollkommenere Ausnutzung des Dampfs als bisher stattfinden würde, wenn der Zylinder stets so heiß gehalten werden könnte wie der eintretende Dampf es war, und wenn gleichzeitig die Kondensation so weit wie möglich getrieben, das heißt der niedergeschlagene Dampf bis zur Temperatur der umgebenden Außenluft abgekühlt würde.

Damit hatte Watt den Hauptfehler der Newcomenschen Maschine entdeckt, der in doppelter Hinsicht schädlich wirkte. Weil die Zuführung des Frischdampfs und die Kondensation in demselben Gefäß stattfanden, kam dies weder über eine mittlere Temperatur hinauf, noch unter eine solche hinunter. Der zugeführte Frischdampf kondensierte schon während des Eintritts so stark, daß der weitaus größte Teil für die Füllung des Zylinderraums verloren ging. Die Luftleere durch Niederschlagung konnte keine genügende Höhe erreichen, weil das Einspritzwasser durch die für seine Wirkung zu große Wärme des Zylinderinneren erhitzt wurde. Die Folge war ein sehr hoher Brennstoffverbrauch, weil unmäßig große Dampfmengen für die Zylinderfüllung bereitet werden mußten und der einzelne Krafthub, der durch den Überdruck der atmosphärischen Luft gegen die nicht ausreichende Luftleere im Zylinderinneren vor sich ging, zu schwach ausfiel.

Von der Warte der Jetztzeit aus gesehen, erscheint diese Entdeckung Watts, aus der die Erfindung emporwuchs, nicht sehr tief. Tatsächlich aber gehörten echte Forschergabe, das folgerichtige Aneinanderreihen vieler Gedanken

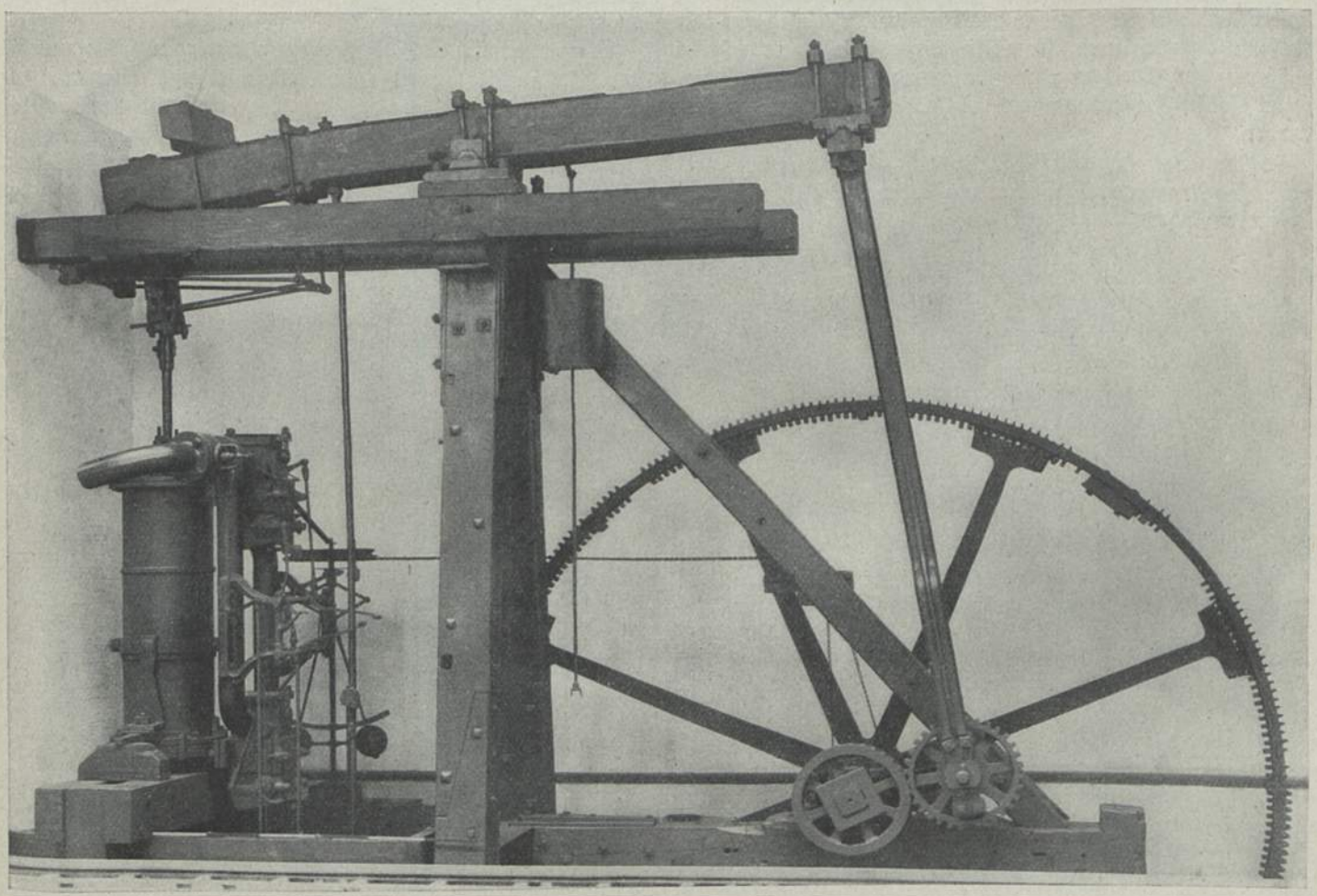
und die Kraft zu einer kühnen Endfolgerung dazu, um in jener Zeit so weit zu gelangen.

Watt hat selbst gesagt: „Wenn man die Erfindung näher betrachtet, nimmt sie sich nicht sonderlich großartig aus. Bei dem Zustand, in dem ich die Dampfmaschine vorfand, gehörte keine so große geistige Anstrengung zu der Beobachtung, daß die Menge des zu ihrem Betrieb erforderlichen Brennstoffs ihrer ausgedehnten Verwendbarkeit immer im Weg stehen werde. Mein nächster Schritt war ebenso leicht: der Ursache dieses bedeutenden Brennstoffverbrauchs nachzuforschen. Auch diese lag nahe, es war nämlich die Verschwendung von Brennstoff, die erforderlich war, um das Ganze, Zylinder, Kolben und die angrenzenden Teile, fortwährend von der Kälte des Wassers auf den Hitzegrad des Dampfs zu bringen, und zwar nicht seltener als 15 bis 20 mal in der Minute." Diesem von der Bescheidenheit diktierten Urteil hat die Nachwelt sich nicht angeschlossen. Sie schätzt Watts Erfindung als eine Großtat ein, insbesondere deshalb, weil sie nicht zufällig im Vorübergehen gemacht worden ist, sondern das Ergebnis systematischer Forschung war.

Doch von der Erkenntnis der Fehler im Alten bis zur Schaffung eines besseren Neuen war noch ein schwieriger Weg zurückzulegen. Vorläufig wußte Watt nur, was er abzuändern hatte, aber nicht, wie er es machen sollte. Lächelnd könnte heute der Konstrukteur einer tausendpferdigen Dreifach-Expansionsmaschine sagen: Nun, darauf zu kommen, war doch wirklich sehr leicht! Im Kopf des einfachen Mechanikers James Watt, der sich nur aus Büchern mit den geringen einschlägigen Erkenntnissen jener Zeit hatte bekannt machen können, sah das Problem aber sehr viel schwieriger aus. Wäre es leicht zu lösen gewesen, so hätte ein Mann wie Smeaton es längst überwunden. Lange tappte Watt im Dunkeln, „von vielen Irrlichtern auf Abwege geleitet", wie er selbst gesagt hat. Endlich wurde er mit dem rechten Gedanken gesegnet. Es war im Jahre 1765.

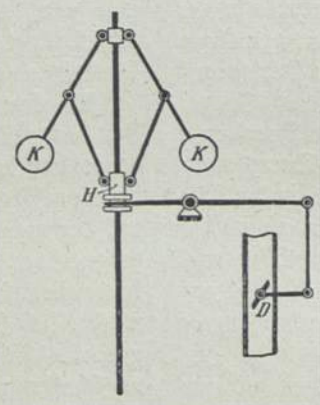
Die Plötzlichkeit der Erleuchtung, die häufig eintritt, aber nur, wenn das Gehirn vorher durch tiefe Gedankenarbeit für die Aufnahme des Lichts bereit gemacht ist, hat Watt in einem seiner Briefe geschildert:

„An einem schönen Sonntagnachmittag ging ich spazieren. Ich dachte über meine Maschine nach, und mir kam der Gedanke, daß der Dampf als elastischer Körper in einen luftleeren Raum rasch einströmen würde. Wenn daher zwischen dem Dampfzylinder und einem luftleer gemachten Gefäß eine Verbindung hergestellt würde, so würde er rasch hineinströmen und darin kondensiert werden können, ohne daß der Zylinder abgekühlt würde. Ich sah dann ein, daß man den kondensierten Dampf und das Einspritzwasser, ebenso wie bei der Newcomen-Maschine, wegschaffen müsse, und es kamen mir zwei Wege in den Sinn. Erstlich könne das Wasser durch eine Röhre abfließen, wenn der Ausfluß in einer Tiefe von 35 bis 36 Fuß (10,5 bis 10,6 Meter) erfolgte, und etwa vorhandene Luft könne dann durch eine kleine Pumpe entfernt werden. Der zweite Weg erforderte, eine Pumpe anzubringen, groß genug, um das Wasser mit der Luft zusammen herauszuschaffen. Ich war noch nicht viel weiter gegangen, als die Sache in meinem Geist feststand."



313. Wattsche Betriebsmaschine mit Planetengetriebe und Parallelogramm, in Soho von 1788 bis 1858 in Betrieb gewesen
Nach dem Original im Science Museum, Kensington-London

Damit war der zweite große und entscheidende Schritt über Papins Gedankenkreis hinaus getan. Bei dem Franzosen waren, wie wir wissen, Kessel, Zylinder und Kondensator vereinigt. Newcomen hatte, als erster bei einer Kolbenmaschine, den Dampferzeuger abgetrennt, Watt sonderte nun auch den Raum für die Niederschlagung des Wassers. Als ein zweistufiges Gefälle stehen fortab — theoretisch — Kessel, Zylinder und Kondensator untereinander, nicht mehr nebeneinander wie bei Papin. Hier ist der Kern von Watts Schaffen, alles übrige war nur Weiterbildung, die freilich „ein Hundertvoll" neuer Erfindungen beanspruchte.




314. Schwungkugelregler mit Drosselklappe

Aus Matschoß, Geschichte der Dampfmaschine. Verlag Julius Springer, Berlin

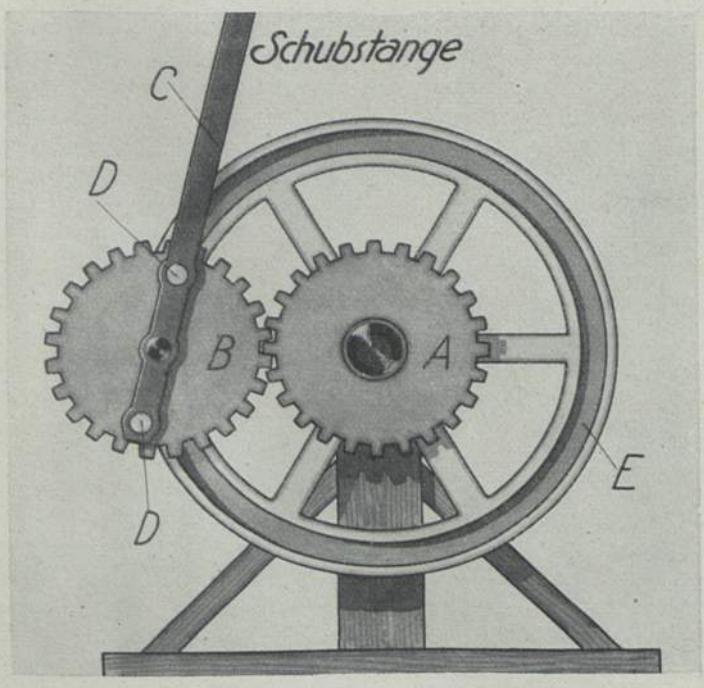
Die nächste Aufgabe war, ein Maschinenmodell zu schaffen, bei dem die Niederschlagung des Dampfs in einem besonderen, neben dem Zylinder aufgestellten und mit diesem durch ein Rohr verbundenen Gefäß stattfand. Es erschien einfacher, die erforderliche Kühlhaltung dieses Gefäßes statt durch Einspritzen von kaltem Wasser mittels Bespülung der Außenwände, also durch Oberflächenkondensation, zu bewirken. Auf eine Anordnung, bei der das aus dem niedergeschlagenen Dampf in diesem Gefäß sich bildende Wasser einfach in ein tief gelegtes Becken abfließen konnte, verzichtete Watt und faßte sogleich die Anbringung einer Pumpe hierfür ins Auge. Um den Arbeitszylinder, der nun nicht mehr vom Kühlwasser berührt wurde, möglichst auf der Temperatur des eintretenden Dampfs zu halten, erschien es ihm notwendig, das Gefäß von der Außenluft zu isolieren. Er sollte daher von einem zweiten größeren Zylinder umgeben sein, und in dem Zwischenraum sollte Frischdampf als ein Schutzmantel eingelassen werden.

Weiter aber sagte sich Watt, daß auch die Luft, die bei der Newcomen-Maschine von oben her tief in den Zylinder eindrang, wenn sie arbeitend den Kolben niederdrückte, starke Abkühlung bringen mußte. Er wollte sie daher gleichfalls fernhalten, und das konnte dadurch geschehen, daß fortab nicht die Atmosphäre, sondern der Kesseldampf als Druckmittel verwendet wurde.

Am Morgen des Montags, der jenem ereignisschweren Sonntag folgte, ging Watt bereits an die Ausführung des entsprechend gestalteten Modells, der ersten Dampfmaschine neuerer Art. Die Vorrichtung erhielt die auf Bild 307 schematisch wiedergegebene Gestalt.

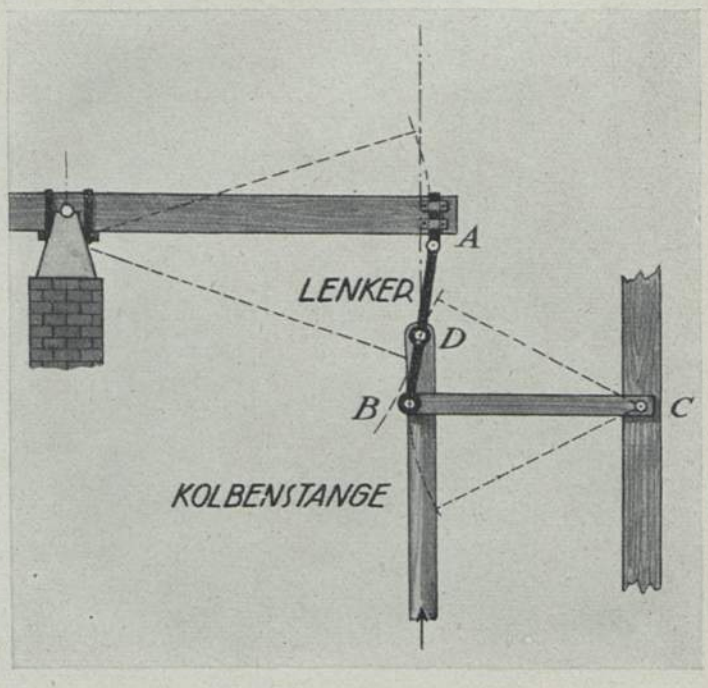
Aus einer Messingspritze, wie die Chirurgen sie gebrauchen, mit einem Durchmesser von 3,6 Zentimetern und 25,4 Zentimetern Höhe bildete Watt den Arbeitszylinder. Ein Rohr mit größerer lichter Weite wurde darumgesetzt, um den Dampfmantel aufzunehmen. Die Kolbenstange war nach unten durch eine Stopfbüchse hinausgeführt und mit einem Gewicht belastet, das beim Arbeitshub gehoben werden sollte. Das vom Dampfkessel herkommende Rohr wurde verzweigt und sowohl oben wie unten an den Zylinder herangeführt. Der Oberteil des Zylinders, der durch einen Deckel verschlossen war, wurde mit dem Kondensator verbunden, einem schmalen Rohr, das in einen Bottich mit Kühlwasser gesetzt war. Ein drittes Rohr von 2,5 Zentimetern Durchmesser war daneben angebracht und mit einem beweglichen Kolben versehen, um als Pumpe zu dienen. Die Maschine konnte mittels dreier Hähne bedient werden.

Wenn das Modell in Gang gesetzt werden sollte, wobei der Kolben sich infolge des Gewichtszugs stets in der unteren, punktiert angedeuteten Lage befand, wurden die Hähne 1 und 2 geöffnet, worauf die Zylinderräume sowohl über wie unter dem Kolben sich mit Dampf füllten. Hierauf wurde Hahn 1 geschlossen, Hahn 3 geöffnet, der Dampf im oberen Zylinderteil stürzte hierauf in den




315. Planetengetriebe

Von James Watt als Ersatz für das Kurbelgetriebe erfunden




316. Watts Parallelogramm

Geradführende Verbindung von Balancier und Kolbenstange

Kondensator und wurde hier niedergeschlagen. Es bildete sich im oberen Zylinderteil infolge der sehr starken Zusammenziehung des Dampfs rasch ein ziemlich hohes Vakuum. Jetzt konnte der unter dem Kolben befindliche Dampf, obgleich seine Spannung den Atmosphärendruck nicht überstieg, den Kolben hochpressen und das Belastungsgewicht mit emporheben.

Wenn nun Hahn 3 geschlossen und Hahn 1 wieder geöffnet wurde, herrschte in beiden Zylinderteilen der gleiche Druck, und infolge dieses Ausgleichs der Pressungen auf die obere und die untere Kolbenseite zog das Belastungsgewicht den Kolben nieder. Das Spiel begann dann von neuem.

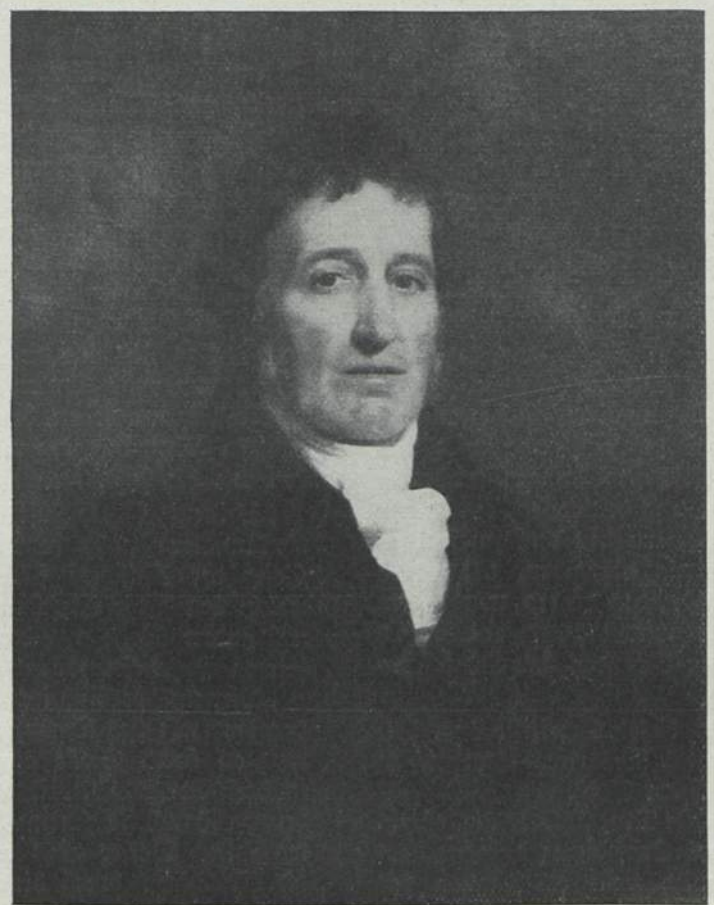
Die Maschine hatte nun aufgehört, eine atmosphärische zu sein; sie wurde ausschließlich mittels Dampf, aber noch in primitiver Art, betrieben.

Sobald der Kondensator durch Niederschlagwasser zu einem beträchtlichen Teil gefüllt war, wurde dieses durch Bewegen des Pumpenkolbens von Hand hinausgeschafft. Die Kolbenstange war in ihrer ganzen Länge durchbohrt, damit das Wasser, das sich auch im oberen Zylinderteil niederschlug, abtropfen konnte. Dampf drang in nur ganz unbeträchtlichen Mengen hier hindurch, da ja der Kesseldruck gegen den Atmosphärendruck nicht ankämpfen konnte.

Dieser Versuchsapparat wird heute in der Watt-Sammlung des Kensington-Museums in London aufbewahrt. Bild 306 zeigt eine photographische Aufnahme davon, auf der Arbeitszylinder, Kondensatorrohr und der Pumpenzylinder gut zu erkennen sind. Das Verbindungsrohr zwischen Kondensator und Arbeitszylinder ist aber heute anders angelötet als bei Watts Versuchen. Der Kondensator kann ursprünglich nicht, wie jetzt, mit dem Dampfmantel verbunden gewesen sein, weil sonst Frischdampf aus dem Kessel unmittelbar in den Kühlraum gedrungen wäre, sondern mußte weiter oben mit dem Arbeitsraum unmittelbar in Verbindung stehen. Weshalb diese Änderung vorgenommen wurde, ist nicht bekannt. Matschoß meint, daß vielleicht Watt selbst aus Furcht, das Versuchsmodell könne in unrechte Hände fallen und so sein Geheimnis vor der Patentnahme verraten, die Umgestaltung ausgeführt hat.

Der kleine Apparat mit der Chirurgenspritze als Arbeitszylinder wirkte so gut, daß der Kolben das Belastungsgewicht von 8,16 Kilogramm zu heben vermochte. Denn die über dem Kolben entstehende Luftleere war sehr viel besser als bei der Newcomen-Maschine. Der gesondert angebrachte Kondensator bewirkte, entsprechend den Erwartungen, eine sehr kräftige Zusammenziehung des Dampfs. Da der Zylinder immer warm blieb, wurde verhältnismäßig wenig Dampf verbraucht. Watt baute deshalb bald ein größeres Modell, das gleichfalls Gutes leistete.

Modelle sind aber noch keine arbeitsfähigen Maschinen. Um mit seiner Vorrichtung Wasser in großen Mengen bei geringem Brennstoffverbrauch pumpen zu können, was doch das Ziel war, mußte Watt probieren und immer wieder probieren. Es war notwendig, eine selbsttätige Steuerung einzuführen und die Kondensatorpumpe so anzuschalten, daß sie von der laufenden Maschine mitbewegt wurde. In der damaligen Zeit machte es auch Schwierigkeiten, den oberen Zylinderteil und die Stopfbüchse für die Kolbenstange dicht zu halten, wohlgemerkt nicht gegen den Dampfdruck, sondern gegen das Eindringen von Luft.



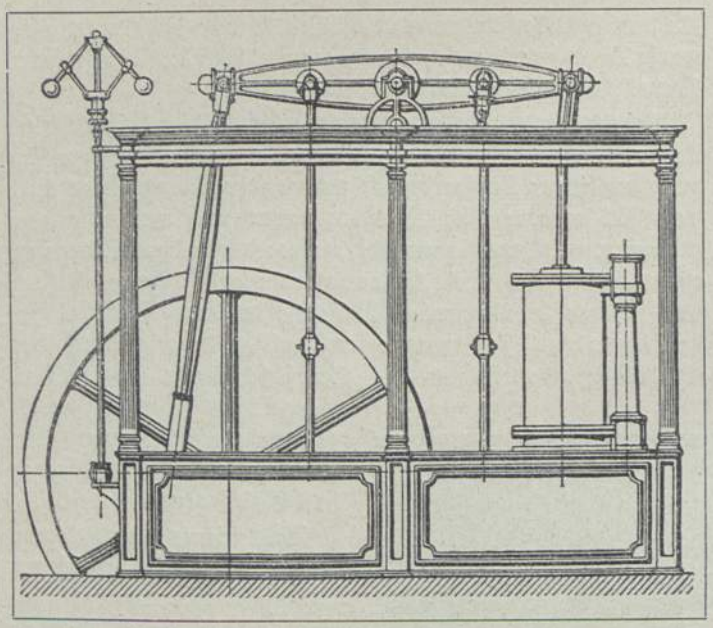
317. William Murdock
Nach dem Gemälde in der Corporation Art Gallery, Birmingham

Watt mietete das abgelegene Gebäude einer verlassenen Töpferei, wo er vor der Ausforschung durch Unberufene sicher war, und arbeitete hier mit einem Gehilfen, John Gardiner, viele Wochen lang ununterbrochen fort. Dabei hatte er gar keine Zeit, sein Geschäft wahrzunehmen, und geriet immer mehr in Schulden. Er mußte schließlich seine mechanische Werkstatt aufgeben und das Nötigste zum Lebensunterhalt als Geometer durch Ausführung von Vermessungen verdienen. Die Arbeit an der Maschine aber wollte und konnte er nicht mehr aufgeben. „Alle meine Gedanken sind nur auf die Maschine gerichtet, ich kann an nichts anderes mehr denken", so schrieb er damals an einen Freund.

Als der unglückliche Erfinder nicht mehr aus noch ein wußte, wurde er mit Dr. Roebuck, dem Besitzer der großen Eisenwerke von Carron, bekannt. In einer Kohlengrube, die diesem gehörte, drohte das andrängende Wasser immer mehr, den Betrieb stillzulegen. Eine Newcomen-Maschine, die aufgestellt worden war, hatte sich als machtlos erwiesen. Sobald Dr. Roebuck von Watts Arbeiten für eine Verbesserung der Dampfmaschine hörte, trat er daher mit ihm in Verbindung und ermutigte ihn, in seinen Bemühungen fortzufahren.

Watt setzte nun mit den ihm zur Verfügung gestellten Geldmitteln seine Versuche fort. Da ihm aber kein Ergebnis genügen wollte, kam er damit nicht zu Ende. Die Einzelteile, die er von den ausführenden Handwerkern erhielt, waren meist auch allzu ungenau und schlecht. Niemand in Glasgow und Umgegend vermochte damals einen Zylinder mit gleichmäßiger Weite anzufertigen.

Schließlich war eine größere Maschine mit etwa 19 Zentimetern Zylinder-Durchmesser hergestellt, die einiger-



318. Bauart der ersten Dampfmaschinen der mechanischen Werkstätte Hartkort & Co. zu Wetter a. d. Ruhr, 1820
Aus Matschoß, Ein Jahrhundert deutscher Maschinenbau. Verlag Julius Springer, Berlin

maßen zu Watts Zufriedenheit arbeitete. Er teilte dies Dr. Roebuck brieflich mit den Worten mit: „Ich gratuliere Ihnen von Herzen zu diesem schönen Erfolg und hoffe, daß er eine Erfüllung der Verbindlichkeiten bringen wird, die ich gegen Sie habe." Es wurde nun beschlossen, ein Patent zu nehmen, und Watt begab sich, um vor dem zuständigen Beamten die notwendige Erklärung abzugeben, 1768 nach London. Am 29. April des folgenden Jahrs wurde ihm das Patent unter der Register-Nummer 913 erteilt. Es ist eine der wichtigsten technischen Urkunden und hat folgenden Wortlaut (nach Geitel):

„Allen denjenigen, welchen dieses Schriftstück zu Gesicht gelangt, sende ich, James Watt aus Glasgow in Schottland, Kaufmann, meinen Gruß.

„Sintemal Seine allerhöchste Majestät, König Georg der Dritte, durch seinen Patentbrief unter beigedrucktem Großsiegel von Großbritannien vom 5. Januar des neunten Regierungsjahrs Seiner Majestät mir, dem genannten James Watt, seine besondere Erlaubnis, Vollmacht, Privilegium und Befugnis gab, daß ich, der genannte James Watt, meine Vollstrecker, Verwalter und Bevollmächtigten während einer bestimmten Reihe von Jahren meine ‚Neu erfundene Methode der Verminderung des Verbrauchs von Dampf und Brennstoff in Feuermaschinen' zu benutzen, auszuüben und zu verkaufen befugt sind, und zwar überall in demjenigen Teil des Königreichs Groß-Britannien, welcher England genannt wird, in der Herrschaft Wales, in der Stadt Berwick am Tweed und ferner in Seiner Majestät Kolonien und Ansiedlungen, und ich, der erwähnte James Watt, in dem erwähnten Patentbrief verpflichtet werde, unter Unterschrift und Siegel eine eingehende Beschreibung des Wesens meiner Erfindung zu geben, die in Seiner Majestät Hoher Hofkanzlei eingetragen werden soll, innerhalb vier Monaten nach dem Datum des erwähnten Patentbriefs:

„So wisset nun, daß in Erfüllung der genannten Verpflichtung und Festsetzung ich, der erwähnte James Watt, erkläre, daß das Folgende eine eingehende Beschreibung meiner in Rede stehenden Erfindung und der Art und Weise ist, in der diese zur Ausführung gelangte.

„Mein Verfahren der Verminderung des Verbrauchs an Dampf und, hierdurch bedingt, des Brennstoffs in Feuermaschinen setzt sich aus folgenden Grundsätzen zusammen:

„Erstens, das Gefäß, in dem die Kräfte des Dampfs zum Antrieb der Maschine Anwendung finden sollen, das bei gewöhnlichen Feuermaschinen Dampfzylinder genannt wird, und das ich Dampfgefäß nenne, muß während der ganzen Zeit, in der die Maschine arbeitet, so heiß erhalten werden, wie der Dampf bei seinem Eintritt ist, und zwar erstens dadurch, daß man das Gefäß mit einem Mantel aus Holz oder einem anderen die Wärme schlecht leitenden Stoff umgibt, daß man es zweitens mit Dampf oder anderweitigen erhitzten Körpern umgibt, und daß man drittens darauf achtet, daß weder Wasser noch ein anderer Körper von niedrigerer Wärme als der Dampf in das Gefäß eintritt oder es berührt.

„Zweitens muß der Dampf bei solchen Maschinen, die ganz oder teilweise mit Kondensation arbeiten, in Gefäßen zur Kondensation gebracht werden, die von den Dampfgefäßen oder -zylindern getrennt sind und nur von Zeit zu Zeit mit diesen in Verbindung stehen. Diese Gefäße nenne ich Kondensatoren, und sie sollen, während die Maschinen arbeiten, durch Anwendung von Wasser oder anderen kalten Körpern mindestens so kühl erhalten werden wie die Luft, welche die Maschine umgibt.

„Drittens, sobald Luft oder andere durch die Kälte des Kondensators nicht kondensierte elastische Dämpfe den Gang der Maschine stören, sind sie mittels Pumpen, welche durch die Maschine selbst betrieben werden, oder auf andere Weise aus den Dampfgefäßen oder Kondensatoren zu entfernen.

„Viertens beabsichtige ich in vielen Fällen die Expansionskraft des Dampfs zum Antrieb der Kolben oder was an deren Stelle angewendet wird, zu gebrauchen, in derselben Weise, wie der Druck der Atmosphäre jetzt bei gewöhnlichen Feuermaschinen benutzt wird. In Fällen, wo kaltes Wasser nicht in Fülle vorhanden ist, können die Maschinen durch diese Dampfkraft allein betrieben werden, indem man den Dampf, nachdem er seine Arbeit getan hat, in die freie Luft austreten läßt.

„Fünftens, wo Bewegungen um eine Achse verlangt werden, stelle ich die Dampfgefäße in Form von hohlen Ringen oder kreisförmigen Kanälen her, mit besonderen Ein- und Auslässen für den Dampf, und gebe ihnen wagerechte Achsen, wie sie die Räder der Wassermühlen haben. In ihnen ist eine Anzahl von Ventilen angebracht, die einem Körper nur in Einer Richtung durch den Kanal umzulaufen gestatten. In diesen Dampfgefäßen sind Gewichte angebracht, welche die Kanäle zum Teil ausfüllen und durch die noch anzugebenden Mittel in diesen bewegt werden. Wenn der Dampf in diese Maschinen zwischen jene Gewichte und die Ventile eingelassen wird, so drückt er gegen diese gleichmäßig, so zwar, daß er das Gewicht nach der einen Seite des Rades hebt und infolge der gegen die Ventile wirkenden Reaktion das Rad in Drehung versetzt, wobei die Ventile sich in derjenigen Richtung öffnen, in welcher die Gewichte Druck empfangen, aber nicht in der entgegengesetzten. Während das Dampfgefäß sich dreht, wird es mit Dampf

vom Kessel aus gespeist, und derjenige Dampf, der seine Arbeit geleistet hat, kann entweder durch Kondensation niedergeschlagen oder in die freie Luft entlassen werden.

„Sechstens will ich in einigen Fällen einen gewissen Grad von Kälte anwenden, der den Dampf allerdings nicht in Wasser zu verwandeln, wohl aber beträchtlich zu verdichten vermag, so daß die Maschinen abwechselnd mit Expansion und Kontraktion des Dampfs arbeiten.

„Endlich wende ich zur dampf- und luftdichten Dichtung des Kolbens oder anderer Maschinenteile an Stelle von Wasser Öle, harzige Körper, Tierfett, Quecksilber und andere Metalle in flüssigem Zustand an.

„Zur Bezeugung dessen habe ich am heutigen Tag, am fünfundzwanzigsten April im Jahre unseres Herrn Ein Tausend Sieben Hundert und Neunundsechzig meinen Namenszug und mein Siegel hierunter gesetzt.

James Watt. (L. S.)

„Gesiegelt und ausgehändigt in Gegenwart von

Coll. Wilkie.
Geo. Jardine.
John. Roebuck.

„Es sei noch bemerkt, daß besagter James Watt erklärt, daß sich nichts von dem unter Viertens Enthaltenen auf Maschinen bezieht, bei denen das zu hebende Wasser in das Dampfgefäß selbst eintritt oder in ein Gefäß, das mit jenem in offener Verbindung steht.

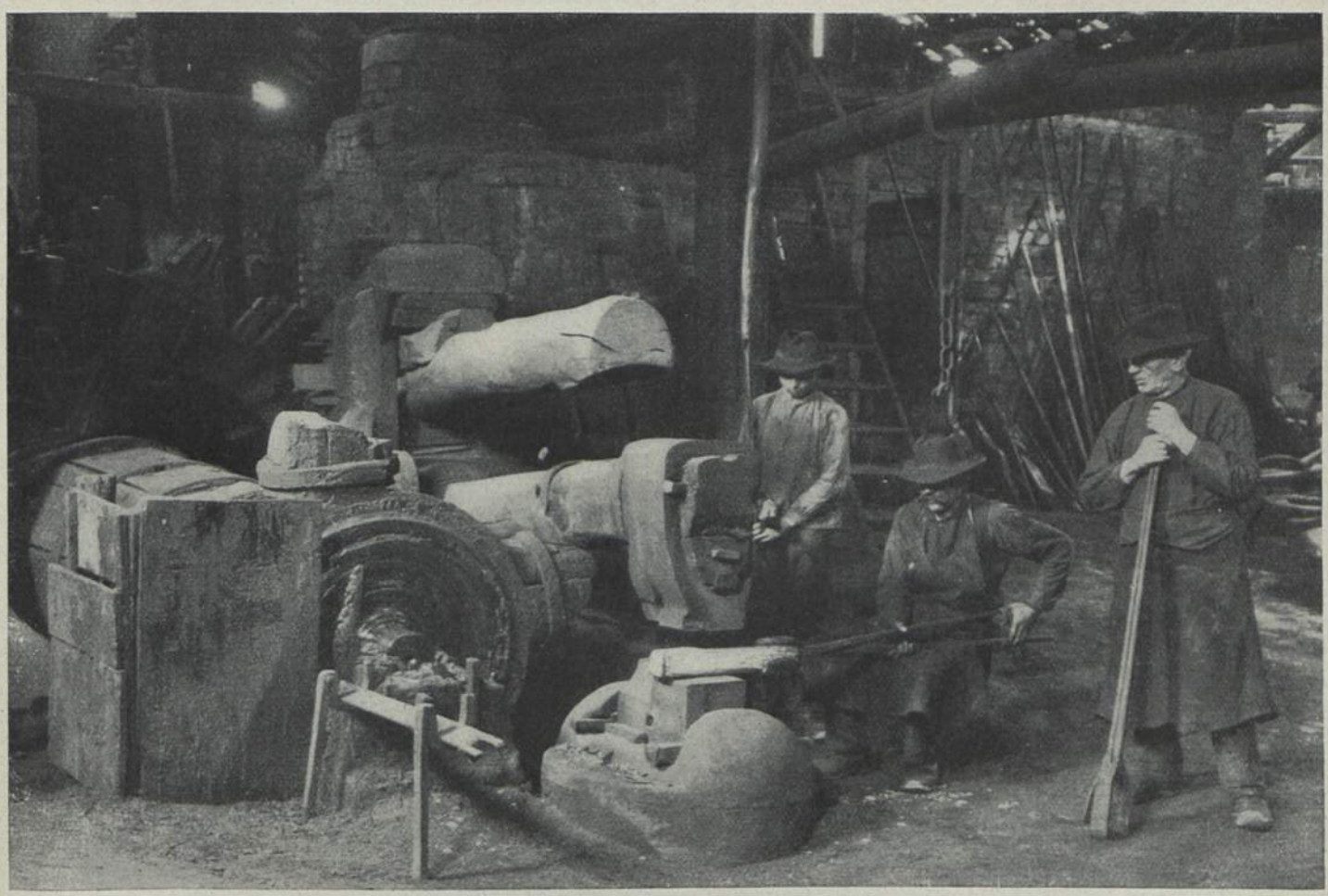
James Watt.

Zeugen: Coll. Wilkie.
Geo. Jardine.

„Und es sei bekannt gegeben, daß der vorgenannte James Watt am fünfundzwanzigsten Tage des Aprils im Jahre unseres Herrn 1769, sich in der Kanzlei unseres Königlichen Herrn einfand und die vorstehende Beschreibung nebst allem dem in dieser Enthaltenen und Beschriebenen in der oben niedergeschriebenen Weise anerkannte. Und so wird die vorstehende Beschreibung gemäß der Verordnung aus dem sechsten Jahre der Regierung des verstorbenen Königs und der Königin William und Mary von England usw. gestempelt.

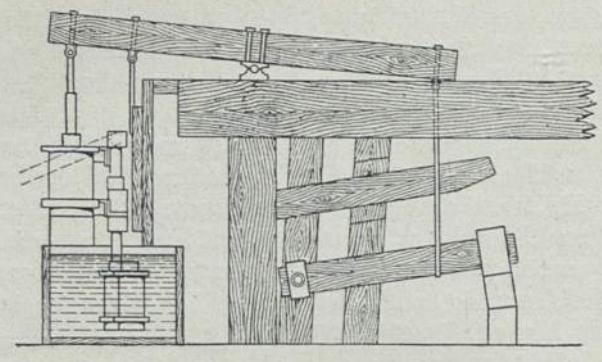
„Eingetragen am neunundzwanzigsten April im Jahre unseres Herrn Ein Tausend Sieben Hundert und Neunundsechzig."

Bescheidentlich wird im Eingang der Patenturkunde gesagt, daß sie nur eine „neu erfundene Methode der Verminderung des Verbrauchs von Dampf und Brennstoff in Feuermaschinen" betreffe. In Wirklichkeit ist alles darin enthalten, was Watt bis dahin ersonnen und ausgeprobt hatte und einiges, was er erst später anzuwenden beabsichtigte. So wird unter Viertens bereits von den Expansionsmaschinen gesprochen, die Watt noch längst nicht zu bauen vermochte, und der Schutzanspruch bezieht sich auch auf Auspuffmaschinen, solche also, bei denen der Dampf aus dem Zylinder nicht in einen Kondensator, sondern in die freie Luft geht. Der Abschnitt Fünftens handelt gar von Dampfturbinen, deren Ausführung Watt wohl geplant, aber niemals ernstlich angegriffen hat. Die mechanischen Möglichkeiten hierfür waren auch zu seinen Lebzeiten nicht gegeben.



319. Alter Stielhammer für Wasserantrieb

Die weit ausgreifende Fassung des Patents hat sich später als sehr günstig für den Erfinder erwiesen und ihm bis zum Ende des Jahrhunderts eine Monopolstellung gesichert. Nur durch diesen Schutz wurde es möglich, daß Watt schließlich doch noch klingenden Lohn für seine gewaltige Arbeitsleistung ernten konnte.



320. Dampfhammer mit Balancier von James Watt
Aus Matschoß, Die Entwicklung der Dampfmaschine, Bd. I. Verlag Julius Springer, Berlin

Vorläufig war aber an eine geschäftliche Ausnutzung der Erfindung noch nicht im entferntesten zu denken, obgleich jetzt die praktische Ausführung begann. Watt ging nach Kinneil, dem Wohnort Dr. Roebucks, um dort auf einer Kohlengrube eine Maschine seiner Art zu errichten. Um während dieser Zeit wenigstens die nötigsten Aufwendungen bestreiten zu können, mußte er gleichzeitig Vermessungsarbeiten für einen Kanal von Monkland nach Glasgow ausführen. Da Watt deshalb häufig von Kinneil abwesend war und seine Leute auch sehr ungeschickt arbeiteten, erwies sich die endlich fertiggestellte Maschine als unbrauchbar. Der Erbauer mußte sie als eine tölpelhafte Arbeit bezeichnen und schrieb damals an einen Freund: „Sie können sich nicht denken, wie peinlich ich durch diese Enttäuschung berührt bin. Es ist ein verdammtes Ding für einen Menschen, wenn sein ganzes Sein an einem Faden hängt. Wenn ich die Verluste bezahlen könnte, würde ich einen Mißerfolg nicht so sehr fürchten, aber ich kann den Gedanken nicht ertragen, daß andere durch meine Bestrebungen Verluste erleiden sollen, und ich habe die schöne Gabe, alles schwarz zu sehen .... Es gibt nichts Törichteres im Leben als das Erfinden."

Nachdem er sich zwölf Jahre mit der Dampfmaschine beschäftigt hatte, war Watt noch nicht zu dem geringsten praktischen Erfolg gelangt. An seinem Geburtstag, dem 19. Januar 1770, schrieb er: „Heute trete ich in mein 35. Lebensjahr ein, und ich habe meiner Ansicht nach der Welt noch nicht für 35 Pfennig genützt."

Die Tragik erreichte ihren Gipfelpunkt, als Dr. Roebuck jetzt in Geldschwierigkeiten geriet. Er hatte sich in gewagte Spekulationen eingelassen, zum Teil rührten die Verluste aber auch aus Überschwemmungen der Gruben durch eindringendes Grundwasser her. Watt, der das Hilfsmittel dagegen schaffen wollte, mußte tatenlos zusehen, da seine Arbeiten noch nicht genügend weit fortgeschritten waren.

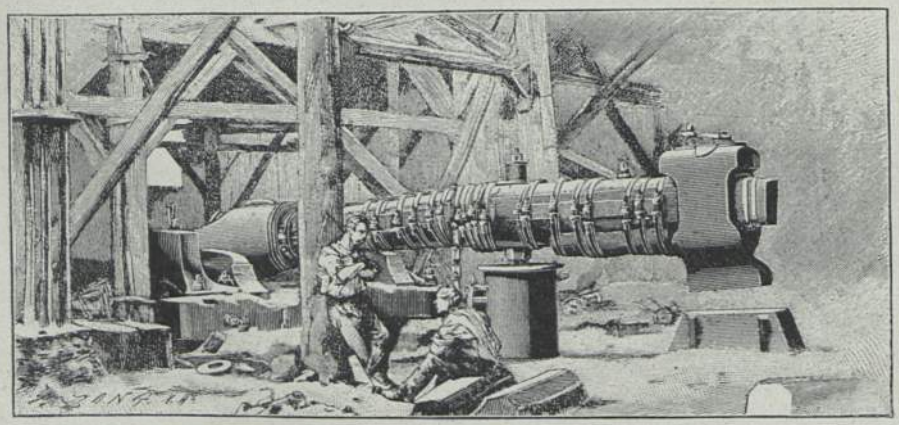
In dieser Zeit aber, als des Erfinders Lebensschifflein bereits endgültig zu scheitern drohte, griff ein Mann in die Speichen des Steuerrads, der das Fahrzeug schließlich in den Hafen der Erfüllung lenken sollte.

Bei der Rückkehr von einer Fahrt nach London hatte Watt eine Fabrik bei Birmingham besucht, wo er in Vertretung des abwesenden Besitzers von einem Dr. Small umhergeführt worden war. Die Einrichtungen des Hauses offenbarten Watt, daß der Inhaber ein ausgezeichneter Organisator sein müsse, und er überzeugte sich auch davon, daß die Arbeiter in Birmingham weit geschickter waren als die Leute in Glasgow. Er muß damals auch wohl mit Dr. Small über die Ausnutzung der Dampfkraft auf seine Art gesprochen haben, denn dieser forderte ihn einige Zeit später brieflich auf, noch einmal herüberzukommen, weil der Besitzer der Fabrik geneigt wäre, die Herstellung von Dampfmaschinen aufzunehmen.

Der Inhaber des Unternehmens war Matthew Boulton (Bild 309), der 1728 als der Sohn eines Metallwarenhändlers in Birmingham geboren wurde. Dort bestand seit alter Zeit eine sehr lebhafte Eisen- und Metallindustrie, und die Arbeiter besaßen in besonderem Maß die Fähigkeit, Feinarbeiten auszuführen. Boulton, der einen sehr lebhaften industriellen Ehrgeiz besaß, wollte das ausnutzen und begründete nach dem Tod seines Vaters, der ihm ein beträchtliches Vermögen hinterließ, auf dem Boden des nahen Landguts Soho eine Metallwarenfabrik, in der er Knöpfe, Schnallen, Uhrketten, plattierte Gold- und Silberwaren, Filigranarbeiten und ähnliches herstellen ließ. Die Fabrik wurde bald durch ausgezeichnete Arbeit und die künstlerische Durchbildung ihrer Erzeugnisse berühmt.

Als das Geschäft immer weiter anwuchs, zeigte es sich, daß die vorhandenen Wasserkräfte für den Antrieb der Maschinen nicht ausreichten. 1766 trat Boulton daher mit Benjamin Franklin, der seine Fabrik besucht hatte und sich nun in London aufhielt, in einen brieflichen Gedankenaustausch darüber, ob es nicht möglich wäre, Dampfmaschinen zu verwenden. Die beiden Männer entwarfen zusammen ein Modell, das Boulton auch ausführte und an Franklin schickte. Sie kamen jedoch in der Angelegenheit nicht vorwärts, aber der mißlungene Versuch ward Ursache, daß der Fabrikherr von Soho sich bemühte, Watt an sich zu fesseln.

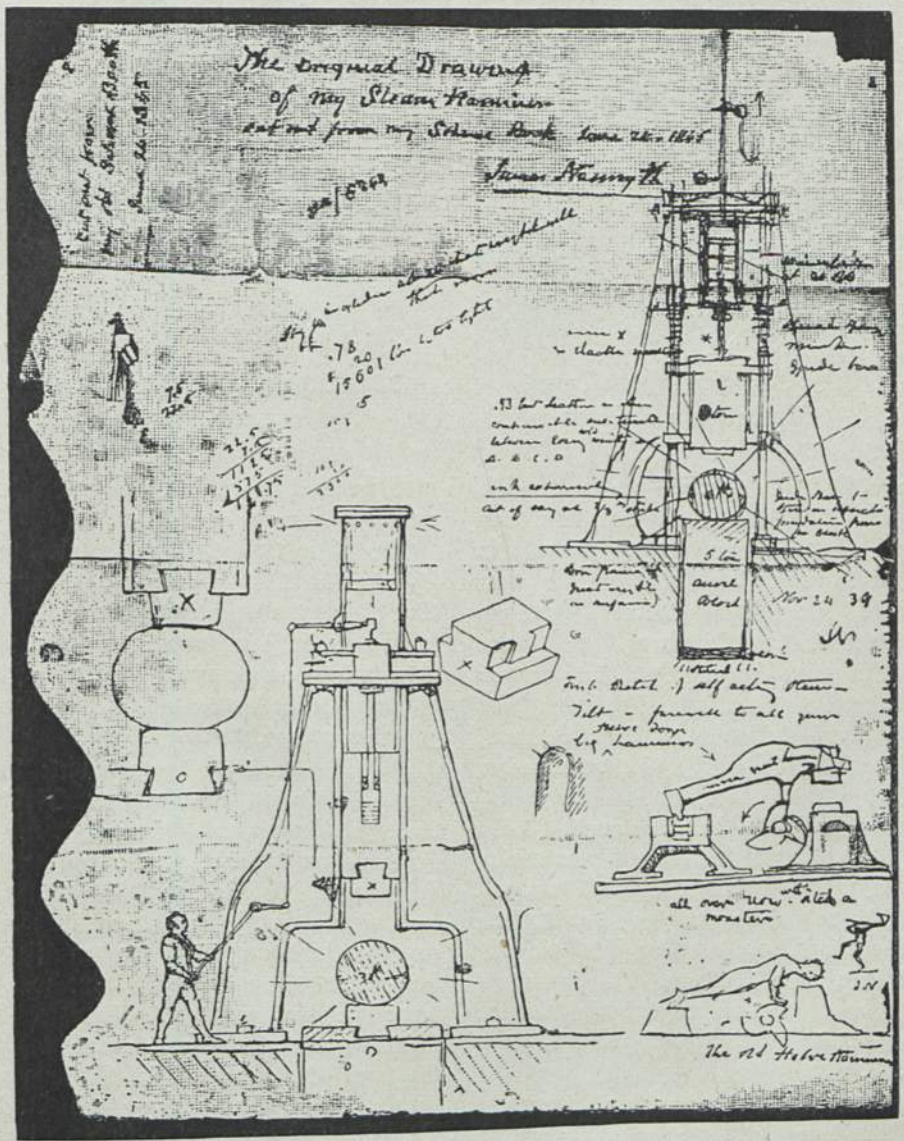
Dieser besuchte das Unternehmen zum zweitenmal, und die beiden Männer fanden sofort Gefallen aneinander. Als kurze Zeit darauf Dr. Robinson nach Soho kam, sagte Boulton zu ihm, er werde mit der Arbeit an der Dampfmaschine nach den eigenen Plänen nicht fortfahren, bevor der Erfolg oder Mißerfolg von Watts Bemühungen auf dem gleichen Gebiet nicht feststünden. „Denn", fügte er hinzu, „wenn ich meine beabsichtigte



321. Stielhammer mit untergesetztem Dampfzylinder
Aus „Der Mensch und die Erde". Deutsches Verlagshaus Bong & Co., Berlin

Maschine weiter ausführen wollte, müßte ich das benutzen, was ich aus der Unterhaltung mit Herrn Watt gelernt habe, und das würde ohne dessen Erlaubnis nicht recht sein." Die Ehrenhaftigkeit der Gesinnung, die Boulton immer ausgezeichnet hat, tritt hier deutlich zutage.

Um Watt nach Soho zu ziehen, erklärte sich Boulton bereit, dessen Verbindlichkeiten gegen Roebuck im Betrag von 1000 Pfund Sterling zu übernehmen und weitere Mittel zur Fortsetzung der Versuche zur Verfügung zu stellen. Dafür sollte ihm Roebucks Anteil an Watts Dampfmaschinenpatent gehören. Die Gläubiger des Bergwerkbesitzers hatten nichts dagegen einzuwenden, weil sie dem Patent keinen Wert zuschrieben, und Watt sagte selbst, daß, wenn es in Roebucks Besitz bliebe, nur eine schlechte Forderung durch eine andere schlechte gedeckt werde. Auch Boulton äußerte sich gegen Watt, daß er keine sehr großen Hoffnungen auf den Erfolg der Maschine setze, da er aber in der Probierkunst geübt sei, wolle er die Konstruktion auf ihren Goldgehalt prüfen. Er sagte weiter: „Die Erfindung ist jetzt ein Schatten, eine bloße Idee, und es wird Zeit und Geld kosten, etwas daraus zu machen."




322. Erster Entwurf eines Dampfhammers von James Nasmyth
Nach Engineer 69, 1890

Sobald Boulton und Dr. Roebuck sich verständigt hatten, packte Watt die Maschine in Kinneil zusammen und schickte sie nach Soho. Er selbst konnte nicht gleichzeitig dorthin gehen, da er vorerst die übernommenen Vermessungsarbeiten am Caledonian-Kanal beendigen mußte. Bei unaufhörlichem Regen, der ihn „durchnäßte, wie Wasser es nur tun kann", führte der Erfinder diese Tätigkeit zu Ende. Gerade in dieser Zeit verlor er seine Frau, die ihn in allen Nöten gestützt hatte, und mußte mitansehen, daß Dr. Roebuck dem Andrängen seiner Gläubiger erlag. Sein Besitztum wurde verkauft. Es war wohl die traurigste Zeit in Watts Leben, in dem es an dunklen Stunden wahrlich nicht gemangelt hat.

Im Frühjahr des Jahrs 1774 konnte er endlich nach Soho übersiedeln. Die von Kinneil gekommenen Maschinenteile wurden nun von Boultons geschickten Leuten unter Watts Anleitung neu hergerichtet und so rasch wie möglich zusammengesetzt. Die Maschine arbeitete infolge der gesteigerten Genauigkeit der Einzelteile weit besser als vorher, so daß neue Hoffnung auf den praktischen Erfolg geschöpft werden konnte.

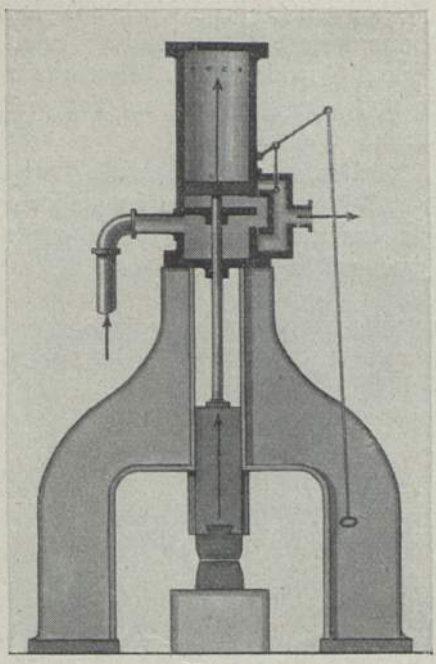
Boulton, ein kühn entschlossener Mann, wollte sogleich den Dampfmaschinenbau im großen angreifen, Gebäude hierfür errichten, Hilfsmaschinen aufstellen und Sonderwerkzeuge anschaffen. Von dem Patentschutz, den Watt auf 14 Jahre erhalten hatte, waren jedoch in jener Zeit bereits 6 Jahre verflossen, und der Fabrikherr von Soho zögerte deshalb, die nötigen großen Summen für einen Gegenstand aufzuwenden, der vielleicht erst dann eine brauchbare Handelsware sein würde, wenn alle ihn bereits nachahmen könnten. Er drang darum in Watt, eine Verlängerung der Schutzdauer zu erwirken.

Dieser begab sich wieder nach London, wo er ein Gesuch beim Parlament einreichte. Es begegnete heftigster Gegnerschaft. Die Grubenbesitzer erklärten, die Erfindung sei, wenn ihre Durchführung gelänge, von so grundlegendem Wert für sie, daß die Herstellung der Maschinen nicht beschränkt werden dürfe. Ohne Rücksicht auf den Mann, dem der Fortschritt zu verdanken war, sträubten sie sich gegen die Erteilung eines Alleinrechts an diesen. Watt aber legte dem Parlament gegenüber die Schwierigkeiten dar, mit denen er zu kämpfen gehabt hatte, er wies darauf hin, daß er für seine langjährigen harten Bemühungen zum Besten der Allgemeinheit keine Entlohnung erhalten würde, wenn ihm nicht durch Fortdauer des Patents die nötige Zeit vergönnt werde, seine Erfindung zu vollenden. Die Ausführungen machten einen so starken Eindruck, daß ihm die Schutzfrist bis zum Jahre 1800 verlängert wurde.

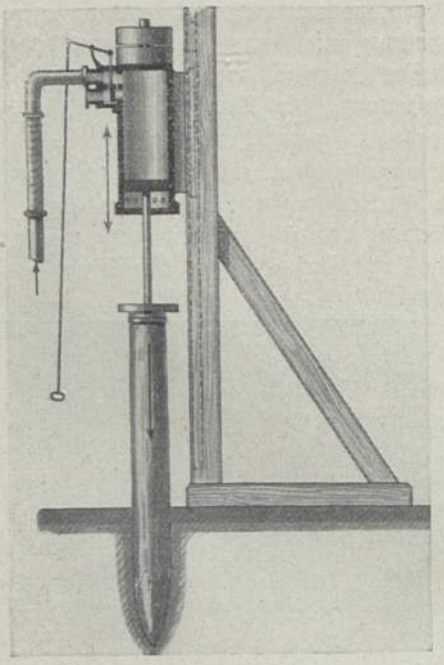
Nun konnte zu Soho die Arbeit mit großen Mitteln beginnen. Das ganze industrielle England wartete auf ihren Erfolg.

Einem hervorragenden Eisengießer, John Wilkinson in Bersham, glückte es jetzt, einen umfangreichen Zylinder zu

gießen und nach einer neuen Methode glatt auszubohren. Als dieses Arbeitsgefäß an Stelle des alten in die Maschine von Kinneil gesetzt wurde, und nachdem an dieser noch mehrere andere Verbesserungen vorgenommen waren, lief sie überraschend gut. Es wurde daher eine zweite nach ihrem Vorbild hergestellt, die Wilkinson zum Antrieb der Blasbälge in seiner Gießerei erhalten sollte.



323. Schnitt durch den Dampfhammer von Nasmyth



324. Schnitt durch eine Dampframme

Die dampfführenden Teile dieser ersten auf Bestellung erbauten Dampfmaschine hatten die in Bild 310 wiedergegebene Gestalt.

Der Kesseldampf wurde durch ein Rohr dem um den Zylinder gelegten Mantel zugeführt und drang zugleich in den Oberteil des Zylinders ein, der ständig mit dem Kessel in Verbindung blieb. Vom Dampfmantel führte ein kurzes Rohr in den Unterteil des Zylinders, und dieser konnte mittels eines Ventils vom Kessel abgetrennt werden. Daneben befand sich ein zweites Ventil, das, gehoben, den Raum unter dem Kolben mit dem Kondensator verband, wenn es niedergedrückt war, die beiden Gefäße voneinander trennte.

Wurde das Dampfventil geöffnet, dann gelangte Frischdampf auch unter den Kolben. Auf dessen beide Seiten wirkte nun der gleiche Druck, und das Übergewicht des Pumpengestänges am anderen Ende des Balanciers zog den Kolben nach oben. Darauf wurde das Dampfventil geschlossen, das Kondensationsventil geöffnet. Im Unterteil des Zylinders bildete sich das Vakuum aus, der darüber liegende Dampf preßte den Kolben nieder, bei dessen tiefster Lage die Ventilstellung wiederum wechselte.

Die Vorrichtung war eine einfach wirkende Niederdruck-Dampfmaschine. Die Bewegung der Ventile erfolgte noch immer durch Anschläge an einem Steuerbaum, der vom Balancier auf und nieder bewegt wurde. Er betätigte zugleich die Kondensator-Pumpe.

Abgesehen von der Verringerung des Brennstoffverbrauchs, der gegenüber der Newcomen-Maschine durch die Abtrennung des Kondensatorraums vom Zylinderraum eintrat, hatte die Maschine noch den Vorteil, daß ihre Leistungsfähigkeit den Ansprüchen gut angepaßt werden konnte. Bei der älteren Maschinengattung war dies nur durch besondere Kniffe, wie die Anwendung der Katarakt-Steuerung (Seite 174), in sehr beschränktem Umfang möglich. Denn der Luftdruck, der dort den Arbeitshub zu leisten hatte, konnte ja in seiner Stärke nicht beeinflußt werden. Hier brauchte man, wenn eine größere Arbeitsleistung verlangt wurde, nur den Kessel etwas schärfer zu feuern und damit den Dampfdruck zu steigern.

Als der Zeitpunkt herannahte, an dem die Maschine bei Wilkinson aufgestellt werden sollte, war Watt voller Angst, da sehr viel von ihrer Bewährung abhing. Er ging selbst nach Bersham, um die Aufstellung zu überwachen. Boulton schrieb ihm, er möge nichts übereilen, die Maschine nicht eher in Gang setzen, als bis jedes denkbare Hindernis beseitigt wäre, dann aber in Gottes Namen frisch darauf losgehen. Groß war die Freude, als die Maschine dann infolge der großen Sorgfalt, die man ihrem Bau hatte angedeihen lassen, vortrefflich lief. Sie erregte allgemeine Bewunderung.

Im Jahre 1776 lieferte die Fabrik von Soho auch eine Maschine (Bild 311) für das Kanalpumpwerk zu Birmingham. Sie ist bis 1892 in dauerndem Betrieb gewesen und wurde selbst noch im Jahre 1898, 122 Jahre nach ihrer Fertigstellung, gelegentlich benutzt, gewiß ein Zeichen für die dauerhafte Durchbildung, welche die Leute von Soho damals ihren Erzeugnissen zu geben vermochten.

Aus Cornwall liefen jetzt viele Bestellungen ein. Trotz der Hilfe, welche die Newcomen-Maschinen den Besitzern der dortigen Kupfer- und Zinngruben mit ihrem hohen Wasserstand gebracht hatten, waren die meisten doch noch immer in schwerer Bedrängnis. Sie konnten die gewaltigen Kohlenmengen, welche die alten Maschinen verschlangen, nicht mehr aufbringen und mußten sie stillsetzen. Die sparsamer arbeitende Watt-Maschine war ihnen daher das rettende Gestirn in der Wasserwüste. Die Fabrik von Soho lieferte zahlreiche Pumpwerke nach der Südwestecke von England. Es bildete sich die Gattung der Cornwall-Maschinen heraus, die jahrzehntelang das Vorbild für alle übrigen Dampfmaschinen gewesen sind.

Bild 312 zeigt das Hauptsächlichste ihrer Einrichtung. Der Kessel steht außerhalb des Maschinenhauses, ebenso auf der anderen Seite, neben der Förderpumpe, die Kaltwasserpumpe, die dem Kondensatorbecken die Kühlflüssigkeit zuführt. Neben dem vom Balancier abgeleiteten Antrieb für diese Pumpe finden wir ziemlich weit oben eine zweite kleinere Vorrichtung gleicher Art angebracht. Sie dient zur Speisung des Kessels vom Kühlwasserbecken her. Hauptpumpengestänge und Kolben sind nach wie vor mittels Ketten an die gebogenen Enden des Balanciers gehängt.

Zu den beiden vorher erwähnten Steuerventilen ist ein drittes getreten. Es befindet sich am Ende des Dampfzuführungsrohrs, das vom Kessel herkommt. Seine Aufgabe ist die Anpassung der Maschine an wechselnde Leistungen. Denn der Antriebhebel konnte so eingestellt werden, daß das Ventil entweder das Dampfzuführungsrohr ganz frei

gab oder es bei jedem Hub nur wenig öffnete, wodurch dann der Dampf gedrosselt, die Leistung der Maschine bei entsprechend herabgesetztem Dampfverbrauch gemindert wurde.

Die Zuführung des Frischdampfs in den Oberteil des Zylinders erfolgt nicht mehr durch den Dampfmantel hindurch, sondern unmittelbar. Der Dampfmantel wird durch eine schmale Nebenleitung, dem Rohrbogen rechts vom Zylinder, versorgt. Alle drei Ventile werden durch den Steuerbaum bewegt, der vom Balancier herabhängt. Er treibt zugleich mittels einer Verlängerungsstange den Kolben der Heißwasserpumpe für den Kondensator.

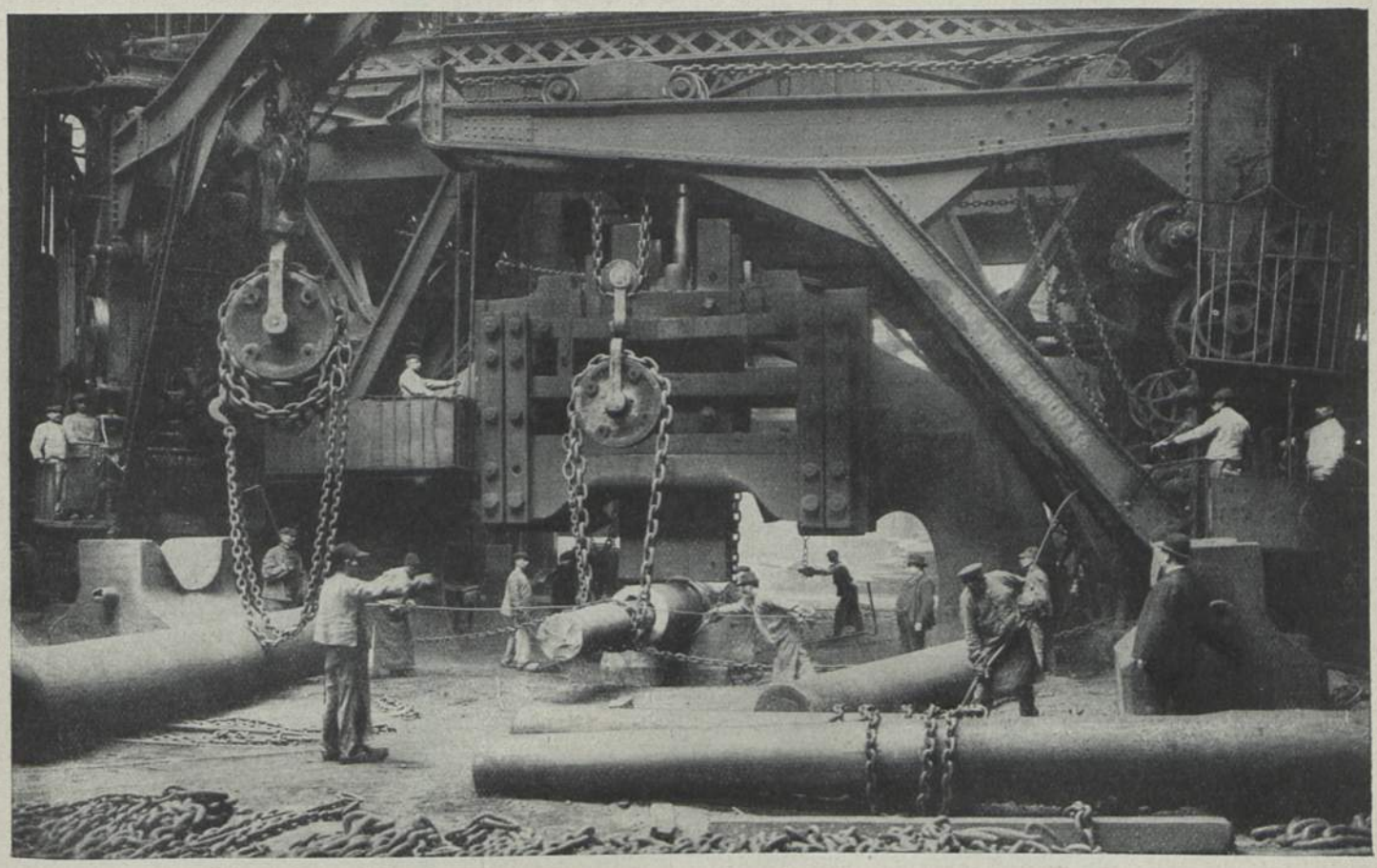
Für diese Vorrichtung wurde immer mehr die bis heute erhaltene Benennung Luftpumpe üblich. Denn sie hat nicht bloß das Niederschlagwasser aus dem Kondensator zu entfernen, sondern auch die Luft, die in diesem enthalten ist, und ihre Hauptaufgabe ist ja letzten Endes die Schaffung möglichster Luftleere unter dem Kolben.

Watt war sehr oft in Cornwall, um die Aufstellung der Maschinen zu überwachen. Häufig genug kam es noch vor, daß die eine oder die andere nicht sogleich ordentlich in Gang kommen wollte. Dann gab es manchen Streit mit den aufgeregten Bestellern, die in der üblichen Weise das „neue Ding" sogleich verdammten. Auch viele Vorurteile waren zu überwinden. Einmal schrieb Watt an Boulton: „Ich habe die Maschine ein- oder zweimal so eingestellt, daß sie ganz geräuschlos arbeitete. Aber der Besitzer der Maschine kann nicht schlafen, wenn sie nicht tobt, und deshalb habe ich sie dem Maschinenwärter überlassen. Der Lärm erweckt bei den Unwissenden die Vorstellung von Kraft." Sie waren es von der atmosphärischen Maschine her eben so gewöhnt.

Watt, der die Zeichnungen für jede Maschine selbst anfertigen mußte, fand jedesmal bei seiner Rückkehr nach Soho einen fast unüberwindlichen Berg neuer Arbeit vor. „Ein wenig mehr von dieser Hast und diesen Ärgernissen wird mich zugrunde richten", sagte er. Es war daher gut, daß ihm ein Gehilfe erstand, dem er getrost einen Teil seiner Aufsichtstätigkeit in Cornwall übertragen konnte.

William Murdock (Bild 317), der zunächst Arbeiter in Soho war, wurde bald ein ausgezeichneter Werkmeister und ist schließlich der Leiter des gesamten Fabrikbetriebs gewesen. „Er war", so schreibt Matschoß über ihn, „ein stiller, verschlossener, einsamer Mann von herkulischem Körperbau, der sich die Gunst der Cornwaller Grubenbesitzer dadurch erwarb, daß es ihm nicht darauf ankam, Tage und Nächte ununterbrochen fortzuarbeiten, wenn es galt, den Betrieb des ganzen Bergwerks aufrechtzuerhalten. Jahrzehntelang war er der Vorkämpfer der Sohoer Fabrik in den Grubenbezirken Cornwalls. Ihm war es zu verdanken, daß die Einführung der neuen Kraftmaschine so schnell und mit so geringen Störungen vor sich ging. Wenn andere mit der Ingangsetzung der Maschine nicht fertig wurden, und sogar Watt und Boulton schließlich fast den Mut verloren, da mußte Murdock hin. Er war stets die letzte Hoffnung, wenn es galt, die praktischen Schwierigkeiten zu überwinden.

„In Murdock war der klare, gesunde Menschenverstand verkörpert, der ihn in hervorragendstem Maß auch befähigte, aus den Beobachtungen heraus wichtige praktische Neuerungen zu ersinnen. Zahlreiche bedeutsame Erfindungen rühren von ihm her. Er hat durch Einführung des Schiebers die Dampfmaschinensteuerung wesentlich vereinfacht. Vor allem hat er eine Anzahl wesentlicher Verbesserungen in der Bearbeitung der wichtigsten Dampfmaschinenteile angegeben.



325. Der berühmte Hammer „Fritz" der Kruppschen Werke in Essen

326. Peter Christian Wilhelm Beuth
Lithographie von Fr. Jentzen nach einer Zeichnung von Franz Krüger

Berühmt wurde er durch die Einführung der Gasbeleuchtung, die von ihm zuerst in größerem Umfang zur Erhellung von Fabriken ausgeführt wurde."

Daß Murdock auch einer der ersten Erbauer eines Dampfwagens gewesen ist, wurde bereits in Abschnitt 11 in Band II auf Seite 72 berichtet.

Die Leute in Cornwall nannten ihn den „eisernen Murdock". Denn wenn er zu einer Grube kam, wo die Dampfmaschine nicht recht arbeiten wollte und die Arbeiter ihn mit Hohn und Spott überschütteten, weil die Stollen ersoffen und sie ihre Tätigkeit im Bergwerk einstellen mußten, dann forderte er den stärksten von ihnen zum Boxkampf heraus und warf ihn bald zu Boden. Murdock hat Watt und Boulton überlebt. Er ist 1839 im Alter von 85 Jahren gestorben und erhielt ein Ehrengrab neben den beiden großen Männern.

Das Dampfmaschinengeschäft der Fabrik in Soho war jetzt recht rege, aber es wurde kein Gewinn daraus erzielt. Boulton strebte gleich Watt in sachlichem Eifer stets danach, jede neue Maschine besser zu machen als die vorhergehende, und so gelang es ihnen nicht, etwas daran zu verdienen. Mit dem Ruhm der Werkstätte wuchsen die Verluste.

Boulton hatte schließlich sein ganzes großes Vermögen in die Fabrikation gesteckt und geriet in Geldschwierigkeiten. Watt war verzweifelt darüber, daß er nun noch einen zweiten Helfer in den Abgrund reißen sollte. Nur ein bedeutender Kredit, den Boulton von einem Londoner Bankhaus gegen Verpfändung vorläufig nur erhoffter Einkünfte aus dem Patentrecht erhielt, konnte ihn über Wasser halten. Watt drang daher darauf, daß künftig Maschinen nur geliefert werden sollten, wenn der Erwerber sich zur Bezahlung bestimmter Gebrauchsgebühren verpflichtete. „Sie müssen mich entschuldigen," schrieb er an Boulton, „wenn ich Ihnen sage, daß ich keine Feder mehr ansetzen werde, um die nötigen Zeichnungen für neue Anordnungen zu schaffen, ohne daß dies geschehen ist. Lassen Sie die Gebrauchsbedingungen mäßig sein, womöglich im voraus in Geld ausgedrückt, so werden wir wenigstens genug erhalten, um uns vor dem Schuldgefängnis zu bewahren, vor dem ich in beständiger Furcht lebe."

Jeder, der eine Maschine erhielt, mußte fortab einen Vertrag unterzeichnen, in dem er sich verpflichtete, an die Patentinhaber als Entgelt für die Benutzung der Erfindung ein Drittel der Summe zu zahlen, die er durch Verminderung des Brennstoffverbrauchs gegenüber der Newcomen-Maschine ersparte. Damit festgestellt werden konnte, welche Arbeit die Maschine mit einer bestimmten Brennstoffmenge geleistet hatte, erfand Watt einen Hubzähler.

Der Gedanke, eine derartige Gebrauchsbedingung aufzuerlegen, hat sich insbesondere in späterer Zeit als sehr nützlich erwiesen. Die zunächst eingehenden Summen, die von einer einzigen Maschine bis zu 2400 Pfund Sterling jährlich betrugen, reichten jedoch zur Deckung der vielen Schulden nicht aus. Das Metallwarengeschäft Boultons mußte das Dampfmaschinengeschäft erhalten. 800 000 Mark, eine für die damalige Zeit außerordentlich große Summe, war in dieses gesteckt worden, ohne daß sie etwas abwarf. Kein anderer als ein Mann von der Charakterstärke Boultons hätte so lange ausgehalten. Für ihn war es aber selbstverständlich, daß er Watt nicht verließ, dessen Größe er voll erkannt hatte.

In dieser Zeit verlobte sich Watt zum zweitenmal, und zwar mit der Tochter eines Färbers in Glasgow. Der Vater der Braut verlangte den Geschäftsvertrag zwischen seinem künftigen Schwiegersohn und Boulton zu sehen, ehe er seine Einwilligung gab. Es zeigte sich aber, daß zwischen den beiden Männern gar keine schriftliche Abmachung bestand. Das wurde nun nachgeholt, Watt trat als Teilhaber in das Geschäft ein, und die Firma hieß fortab Boulton & Watt. Sie ist auf der ganzen Erde bekannt und hochgeachtet worden, da sie lange Zeit die einzige Großherstellerin von Dampfmaschinen war.

Im Anfang der achtziger Jahre schuf Watt drei weitere Verbesserungen der Dampfmaschine, deren jede eine Erfindung von unübersehbarer Tragweite ist. Diese Vervollkommnungen in ihrem Zusammenwirken machten die Dampfmaschine endgültig zu der überall anerkannten Herrscherin.

Als Smeaton im Jahre 1781 um ein Gutachten über den besten Antrieb für Windmühlen ersucht wurde, erklärte er, die Feuermaschine wäre besonders zum Wasserheben geeignet, für den Antrieb von Mühlen sei sie nur unter Zwischenschaltung eines Wasserrads zu verwenden. Der Kaufmann Boulton aber sah weiter als dieser Ingenieur. Im gleichen Jahr wandten sich die Besitzer eines großen Kupferwalzwerks an Boulton mit der Bitte um Hilfe. Ihr Wasserrad sei eingefroren, der Betrieb unterbrochen, die Arbeiter müßten feiern, und die Kundschaft warte vergeblich auf die bestellten Bleche. Im Sommer gäbe Wassermangel oft Grund zu ähnlichen Klagen. Boulton empfahl den Leuten, eine Dampfmaschine zu verwenden, „die gehe Tag und Nacht, Sommer und Winter!"

Er regte, um die neuen Anforderungen erfüllen zu können, Watt an, eine Dampfmaschine mit drehender Bewegung zu schaffen, und dieser ging auch eifrig ans Werk. Er baute ein Modell, bei dem der Balancier mittels einer Pleuel-

oder Schubstange eine Kurbel in Umdrehung versetzte. Entgegen früher gehegten Befürchtungen zeigte es sich, daß die Bewegung glatt vor sich ging, obgleich die Hubhöhe der Maschine noch immer nicht genau begrenzt war. Als aber zur Ausführung im großen geschritten werden sollte, zeigte sich eine unvorhergesehene Schwierigkeit.

Der Knopfmacher James Pickard aus Birmingham hatte sich nämlich am 23. August 1780 das Kurbelgetriebe patentieren lassen. Watt war niemals auf den Gedanken gekommen, daß man ein Schutzrecht hierauf erhalten könnte, denn der Kurbeltrieb war ja ein uraltes Ding. „Der wahre Erfinder dieses Mechanismus", so sagte er, „war der Mann, leider wurde er nicht göttlich gesprochen, der zuerst eine Drehbank zum Treten einrichtete. Ihn auf die Dampfmaschine anzuwenden, bedeutete nicht mehr, als ein Brotmesser zum Käseschneiden zu benutzen."

Das Patent war aber nun einmal erteilt — heute wäre etwas Derartiges ganz unmöglich — und Watt hielt es aus geschäftlichen Gründen nicht für ratsam, dagegen Sturm zu laufen. Er fürchtete, daß dann auch sein eigenes Schutzrecht, das große Dampfmaschinenpatent, mit gleicher Kraft angegriffen werden könnte. Andrerseits war er aber auch nicht gewillt, für jede seiner künftigen Dampfmaschinen mit Drehbewegung eine Gebühr an Pickard zu zahlen, und so sah er sich gezwungen, den Kurbelbetrieb durch etwas anderes zu ersetzen.

Er erfand hierfür nicht weniger als fünf verschiedene Vorrichtungen, auf die er am 25. Oktober 1781 ein Patent erhielt. Als dessen Gegenstand wird angegeben „Neue Verfahren, um die hin und her gehende Bewegung von Dampf- oder Feuermaschinen zur Erzeugung ständiger Drehbewegung um eine Achse oder um einen Mittelpunkt zu benutzen und hiermit Räder, Mühlen oder andere Maschinen anzutreiben". Bemerkenswert ist, daß Watt in dieser Urkunde bereits den Ausdruck „Dampfmaschine" neben der Bezeichnung „Feuermaschine" gebraucht. Diese letzte stirbt nun allmählich aus.

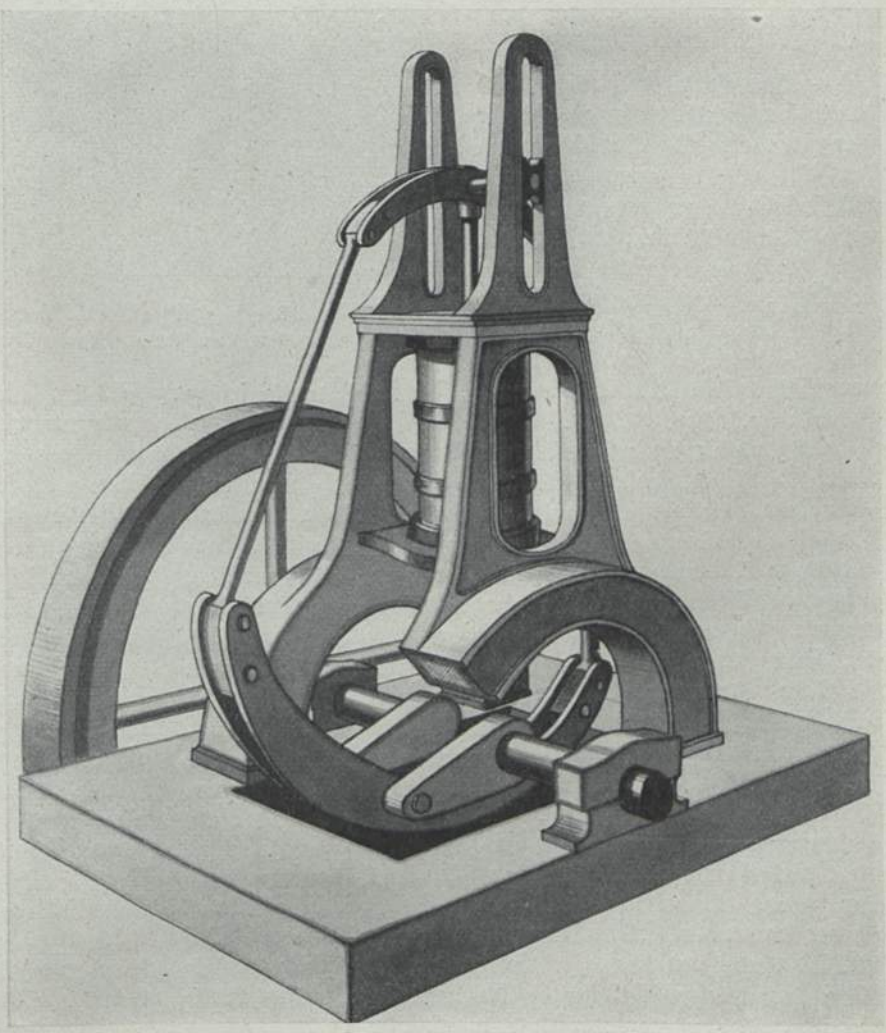
Von den Erfindungen zum Ersatz der Kurbel hat nur das Planetengetriebe Bedeutung erlangt. Bis zum Erlöschen von Pickards Schutzrecht ist es an allen Wattschen Dampfmaschinen (Bild 313) mit Drehbewegung zu finden. Alsdann wurde sogleich die Kurbel angewendet, die das einfachste Gerät für diese Zwecke ist.

Das Planetengetriebe (Bild 315) bestand aus zwei Zahnrädern A und B, deren eines A auf der Welle der anzutreibenden Maschine saß und sich in gewöhnlicher Weise um seine eigene Achse drehen konnte. Das andere war am Ende der vom Balancier herkommenden Schubstange C befestigt und an der Drehung um die eigene Achse durch zwei Bolzen D verhindert, die es mit dem Schubstangen-Ende verbanden. Wenn der Balancier auf und nieder ging, wurde dieses Rad von einem Sperring E geführt und umkreiste das andere Zahnrad wie ein Planet die Sonne. Zugleich wurde das Zahnrad auf der Welle zur Drehung gezwungen.

Wie bei der Kurbel ergeben sich auch bei diesem Mechanismus zwei tote Punkte. In den Augenblicken, wenn die Achse des Planetrads senkrecht über oder unter der Achse des anderen steht, kann es keine Vortriebkraft ausüben. Um die Maschine über diese toten Punkte hinwegzubringen, setzte Watt auf die angetriebene Welle ein Schwungrad. Dieses und seine Fähigkeit, gleichmäßigen Gang zu bewirken, war, wie die Kurbel, längst bekannt.

Die erste Dampfmaschine mit Drehbewegung wurde Ende 1782 in einer Kornmühle zu Ketley in Betrieb genommen. In London war es zuerst die Brauerei von Goodwyn & Co., die einen Antrieb solcher Art erhielt. Boulton aber sann darüber nach, wie er die neue Konstruktion, auf die er sehr stolz war, durch eine besonders glanzvolle Anlage möglichst rasch bekannt machen könne.

„Er beschloß daher", so erzählt Matschoß, „in London, dem Mittelpunkt allen Verkehrs, eine große Musteranlage zu schaffen, die, mit allen Verbesserungen versehen und auf das sorgfältigste ausgeführt, die Bewunderung der ganzen Welt erzwingen sollte. 1783 faßte er den Plan, eine große Aktiengesellschaft für Dampfmühlen ins Leben zu rufen. Die Männer, die sich bereit fanden, gemeinsam mit ihm und Watt Kapital in der neuen Unternehmung anzulegen, waren vorwiegend Londoner Getreidehändler, die bisher ihr Korn themseaufwärts bis zu den Wassermühlen hatten schaffen müssen. Das Mehl mußte dann zum Verkauf wieder nach London zurückbefördert werden. Diese hohen Transportkosten waren zu ersparen, wenn man die Verarbeitung



327. Bügelmaschine von Egells

an den Ort des Ein- und Verkaufs, d. h. nach London legen konnte. Dazu bot die Dampfmaschine die Möglichkeit.

1784 wurde bei der Regierung die Eintragung als Gesellschaft beantragt. Da erhob sich ein Sturm der Entrüstung unter allen Müllern und Mehlhändlern. Was sollte aus ihren Wasser- und Windmühlen werden! Wie viele tausend Menschen würden da ihre Arbeit verlieren! Wie sollte man noch etwas verdienen können, wenn durch eine so erhöhte Produktion der Brotpreis wesentlich herabgedrückt würde! Boulton ärgerte sich, daß die Müller sich als die Herren aufspielten, nach denen sich Dampfmaschinenfabrikant und Publikum ausschließlich zu richten hätten. Weil die Dampfmühlen den Wassermühlen Konkurrenz machen könnten, sollten keine Dampfmühlen gebaut werden dürfen. Das wäre so, meinte Boulton, als wenn man verbieten wollte, schiffbare Kanäle anzulegen, weil dadurch die Fuhrleute geschäftliche Einbuße erleiden könnten. Dann sollte man doch wenigstens konsequent sein und alle die Maschinen verbieten, die den Menschen Arbeit abnehmen. Die Wassermühlen kämen dann auch an die Reihe, denn es könnten entschieden mehr Leute beschäftigt werden, wenn wieder jeder selbst sein Korn eigenhändig mahlte. Alle Einwendungen halfen nichts. Die Eintragung wurde abgelehnt. Nur in der Form eines gewöhnlichen Kompagniegeschäftes ließ sich das Unternehmen begründen. (Dieser Vorgang erinnert sehr lebhaft an den Widerstand gegen die erste Eisenbahnlinie, worüber in Band II auf Seite 155 berichtet wurde. „Als Pythagoras seinen bekannten Lehrsatz entdeckte, brachte er den Göttern eine Hekatombe dar; seitdem zittern die Ochsen, so oft eine neue Wahrheit an das Licht kommt", schreibt Börne in seinen Aphorismen.)

328. Friedrich August Borsig
Nach dem Gemälde von Franz Krüger

„1786 wurde die erste Londoner Dampfmühle, die Albion Mill, in Betrieb gesetzt. Anfangs zeigten sich mancherlei Übelstände, die selbst Boulton aus der Ruhe brachten. Watt sollte sofort nach London kommen, um die Maschinen wieder in Ordnung zu bringen. Der aber hatte selbst zu dringende Arbeit und konnte nur brieflich seine Ratschläge erteilen. Er ermahnte vor allem zur Geduld. ‚Nur nicht die Ruhe verlieren! Wenn die Leute murrten, solle man sie daran erinnern, daß bei allen neuen, komplizierten und schwierigen Sachen menschliche Voraussicht nicht weit genug reiche, daß Zeit und Geld nun einmal aufgewandt werden müssen, um die Dinge vollkommener zu machen, ihre Fehler herauszufinden. Anders lasse sich das nicht heilen.'

„Murdock mußte schließlich aus Cornwall kommen, und ihm gelang es, die Maschinen so in Gang zu bringen, daß sie von da an eitel Staunen und Bewunderung erregten. Die Mühle wurde von Besuchern nicht leer. Die beste Gesellschaft Londons gab sich in der Maschinenstube häufig Stelldichein. Alle waren überrascht durch den ruhigen Gang der mächtigen Maschinen, von denen jede etwa 50 Pferdestärken leistete. Watt ärgerte sich über den Jahrmarktstrubel in der Mahlmühle. Die Besucher hielten die Arbeiter nur von der Arbeit ab. Sein Ärger ging in Zorn über, als er hörte, daß die Geschäftsleiter zur Feier der Eröffnung ein großes Maskenfest in den Räumen der Mühle veranstalten wollten. Das sei ein toller Blödsinn. ‚Was haben denn alle die Herzöge, Herren und Damen, in einer Mahlmühle zu tun? Da wir von allen Seiten mit Neid angesehen werden, sollte man tunlichst alles vermeiden, was Aufsehen erregt. Verzichten wir auf die Anerkennung des großen Haufens. Begnügen wir uns damit, die Sache zu machen.' Der energische Einspruch Watts half, man schloß die gastlichen Tore der ersten Mahlmühle Londons für alle neugierigen Besucher.

„Die Leistung der Albion-Mühle war nach damaligen Begriffen eine sehr hohe. 16 000 Scheffel Weizen wurden wöchentlich zu feinem Mehl verarbeitet; das reichte, wie Boulton ausgerechnet hatte, für 150 000 Menschen!

„Der geschäftliche Erfolg war zunächst sehr gering, steigerte sich aber von Jahr zu Jahr. Da wurde 1791 die Mühle von einer Rotte planmäßig in Brand gesteckt. In wenigen Stunden war die Dampfmühle ein Trümmerhaufen. Die Bevölkerung gab durch feierliche Gesänge auf der Straße ihre Genugtuung über diesen Zusammenbruch des Unternehmens kund. So endigte diese bemerkenswerte Episode in der Einführung der Dampfmaschine mit einem scheinbaren Sieg der Gegner."

Die Fortentwicklung wurde aber hierdurch nicht aufgehalten. Papierfabriken, Getreidemühlen und Brauereien, Sägemühlen, Zuckerfabriken, Walzwerke und Maschinenfabriken bestellten bei der Firma Boulton & Watt Dampfmaschinen mit Drehbewegung, und diese sind es gewesen, die einer der wichtigsten gewerblichen Erfindungen erst den Weg geebnet haben.

Richard Arkwright hatte 1768 die Spinnmaschine erdacht. Für ihren Antrieb standen zunächst nur die schwerfälligen Wasserräder zur Verfügung. Watts Maschine machte Arkwrights Erfindung allgemein verwendbar. Durch das Zusammenwirken beider erblühte eine der bedeutendsten Industrien Englands.

Auch zahlreiche andere Erwerbzweige wurden jetzt erst fähig, im großen zu wirken. Überall wuchsen Fabriken empor, eine neue Zeit dämmerte herauf.

Die Überlegenheit der Dampfmaschine über die Wasserräder wird in einem Brief Boultons aus dem Jahre 1786 gekennzeichnet: „Es geht kein Wasserrad in Staffordshire, sie sind alle eingefroren, und wäre nicht Wilkinsons Dampfwalzwerk, so könnten die Nagelschmiede verhungern. Das geht aber Tag für Tag seinen Gang, walzt und schmiedet seine zehn Tonnen Eisen jeden Tag, das noch warm verkauft wird."

Die Watt-Maschine hätte aber in ihrer neuen Gestalt eine so tief greifende Wirkung nicht zu üben vermocht,

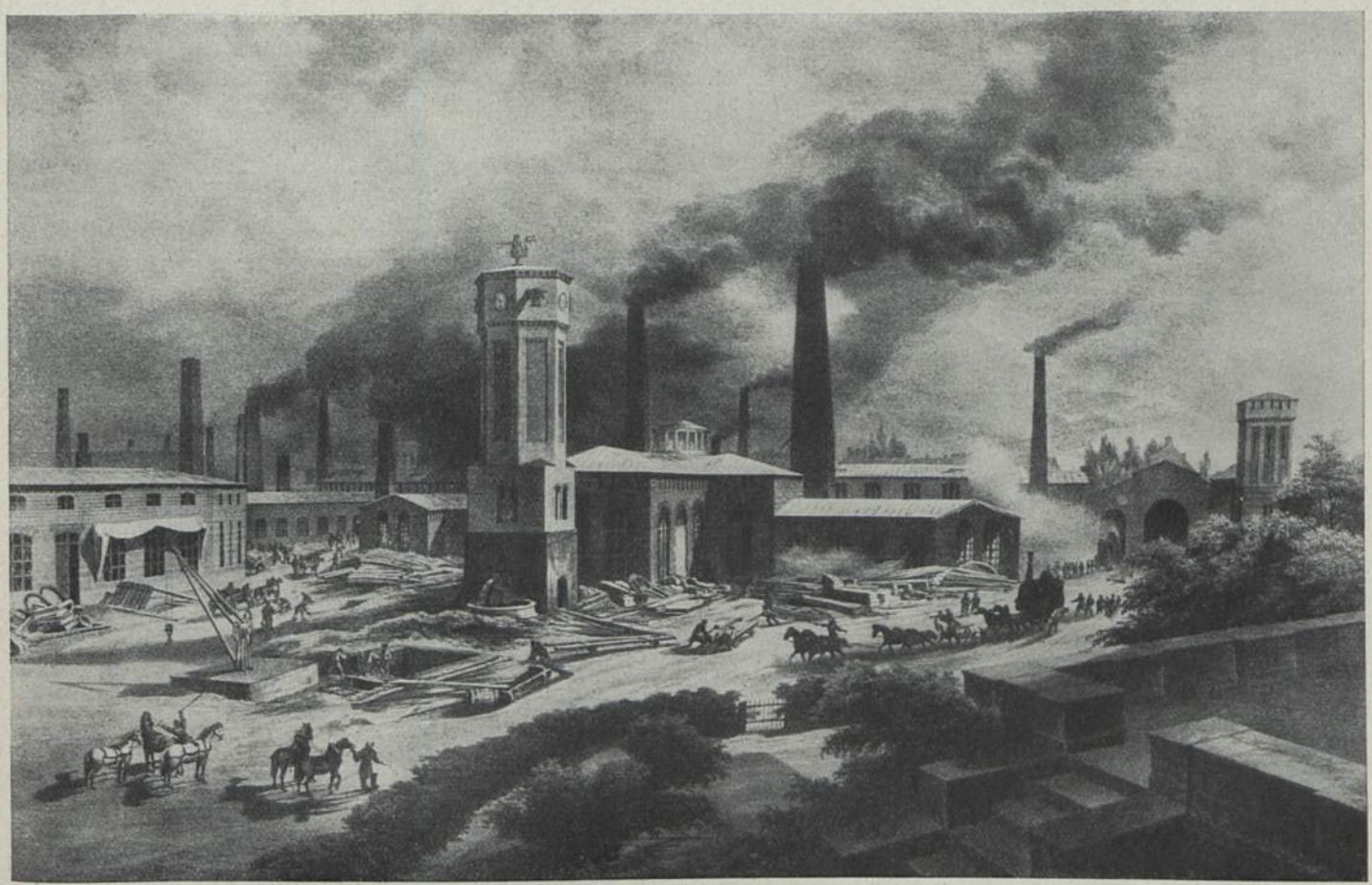
wenn nicht zugleich Einrichtungen für eine bedeutend verbesserte Ausnutzung des Dampfs bei ihr angebracht worden wären. Schon im Abschnitt Viertens seines Hauptpatents aus dem Jahre 1769 spricht Watt von seiner Absicht, die Ausdehnungskraft des Dampfs auszunutzen. Aber erst 1782 ist er so weit, um sich in einem neuen Patent die für den Bau von Expansions-Maschinen wichtigen Gedanken und Einrichtungen schützen zu lassen. Es wird darin der höchst bedeutsame Übergang von der ganzen Füllung des Arbeitszylinders zur Teilfüllung begründet.

Bis dahin wurde der Dampf in den Arbeitsraum des Zylinders stets so lange eingelassen, wie der Kolben sich in Bewegung befand. Dieser stand während des ganzen Hubs unter vollem Kesseldruck. Der Dampf im Zylinder behielt, bis das Ausströmventil zum Kondensator geöffnet wurde, dieselbe Dichte, wie er sie im Kessel gehabt hatte. Nun wohnt aber dem Wasserdampf in besonderer Weise die Fähigkeit inne, sein Volumen durch Entspannung zu vergrößern. Diese Entspannungs- oder Expansionskraft ging bei der alten Betriebsart verloren. Watt sagte sich nun, daß er beinahe die gleiche Kraftäußerung auf den Kolben erhalten würde, wenn er das Einströmventil bereits sich schließen ließe, nachdem der Kolben erst zwei Drittel des Hubs zurückgelegt hätte; über den Rest des Wegs würde der Kolben dann von der Expansion der Dampfmenge im Zylinder geschoben werden. Das erwies sich als richtig. Dieselbe Kraftleistung konnte fortab mit weit weniger Dampf und daher auch mit geringeren Brennstoffmengen erzielt werden. Ausnutzung der Expansion: das ist die zweite der grundlegenden Verbesserungen.

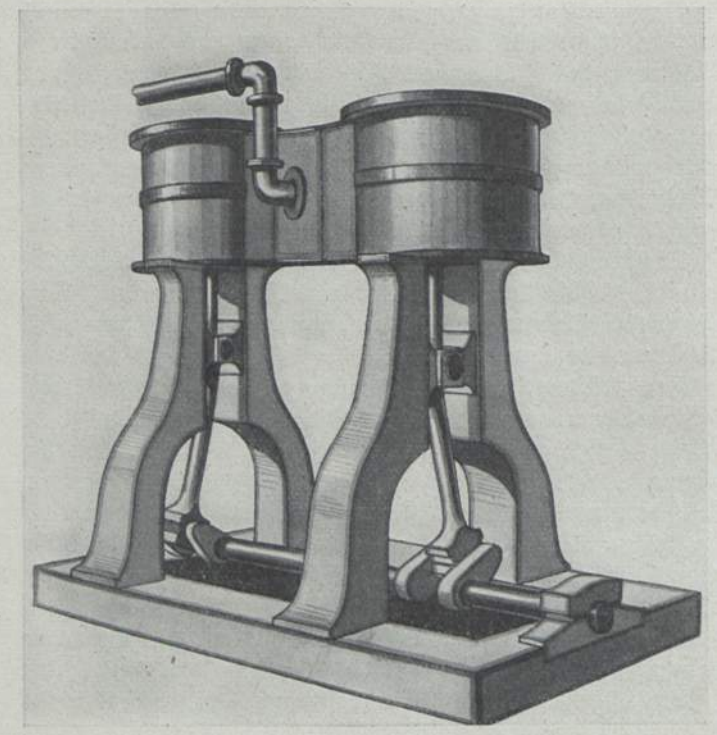
Besonders vorteilhaft war es auch, daß die Regelung der Maschine für wechselnde Ansprüche nun leicht durch Änderung des Füllungsgrads bewirkt werden konnte. Hatte die Maschine hart zu arbeiten, so wurde durch Verstellen des Anschlags am Steuerbaum, der das Einströmventil bewegte, zu beinahe ganzer Füllung übergegangen, beim Sinken der Belastung brauchte nur das Ventil immer früher geschlossen zu werden.

Die Anwendung der neuen dampfsparenden Methode wurde aber durch die Unverständigkeit der Wärter behindert. Eine törichte Eitelkeit trieb diese dazu, aus ihren Maschinen möglichst viel herauszuholen. Selbstverständlich ergab sich eine größere Leistung, wenn die Steuerung so eingestellt war, daß die Maschine immer mit ganzer Füllung arbeitete. Der zugehörige Kessel aber war für Ausnutzung der Expansion berechnet und konnte daher bei dauernd falscher Bedienung der Maschine nicht genügend Dampf bereiten. Die Expansionsmaschinen blieben daher öfter stehen, es entstand ein Mißtrauen gegen sie, und Watt mußte bei mancher auf die Nutzung der Ausdehnungsfähigkeit des Dampfs verzichten, „bis er Wärter bekommen würde, die etwas davon verstünden".

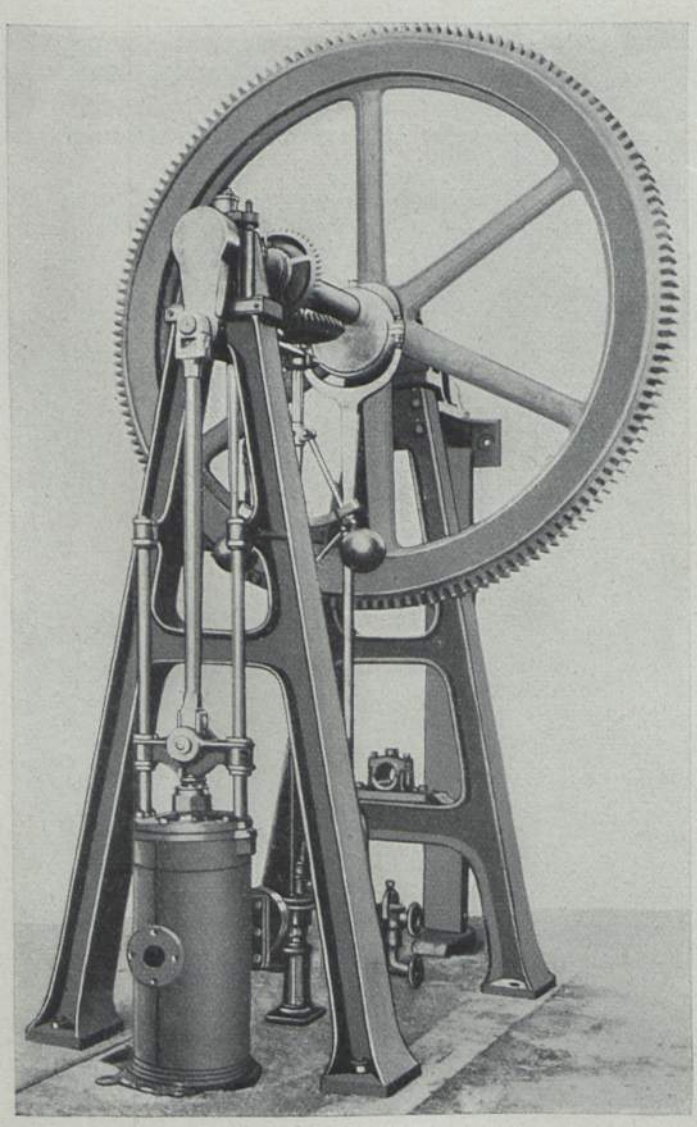
Das Patent von 1782 enthält auch den dritten neuen Gedanken von grundlegender Wichtigkeit. Bisher war der Kolben durch die Dampfkraft immer nur nach abwärts gedrückt worden. Den Aufwärtsgang bewirkte das Übergewicht des am anderen Ende des Balanciers hängenden Gestänges bei Druckausgleich auf beiden Kolbenseiten (Seite 177, Bild 310). Maschinen mit Drehbewegung hätten auf diese Art, selbst bei Anwendung sehr großer Schwungräder, nur sehr unregel-



329. Fabrikanlage von Fr. A. Borsig in Moabit



330. Hammermaschine



331. Bockmaschine

mäßig und stoßweise zu arbeiten vermocht. Watt erkannte aber, daß es unschwer möglich sei, den Dampfdruck auf beide Kolbenseiten gleichartig wirken zu lassen. Die Steuerung brauchte hierfür nur so eingerichtet zu sein, daß die durch den Kolben voneinander getrennten Zylinderräume abwechselnd mit dem Kessel und dem Kondensator verbunden wurden.

Wenn der Kolben abwärts ging, wurde eine Verbindung zwischen dem unteren Raum und dem Kondensator hergestellt, während oben Frischdampf zuströmte. Kehrte der Kolben seine Bewegung um, so wurde der obere Raum mit dem Kondensator in Verbindung gesetzt und unten Frischdampf zugeführt. An Stelle von zwei Ventilen mußten nun deren vier, je ein Einlaß- und ein Auslaßventil, vom Steuerbaum betätigt werden.

So wurde aus der einfach wirkenden die doppelt wirkende Dampfmaschine. Sie erst hatte einen ausreichend gleichmäßigen Gang für den Antrieb von Maschinen für Drehbewegung.

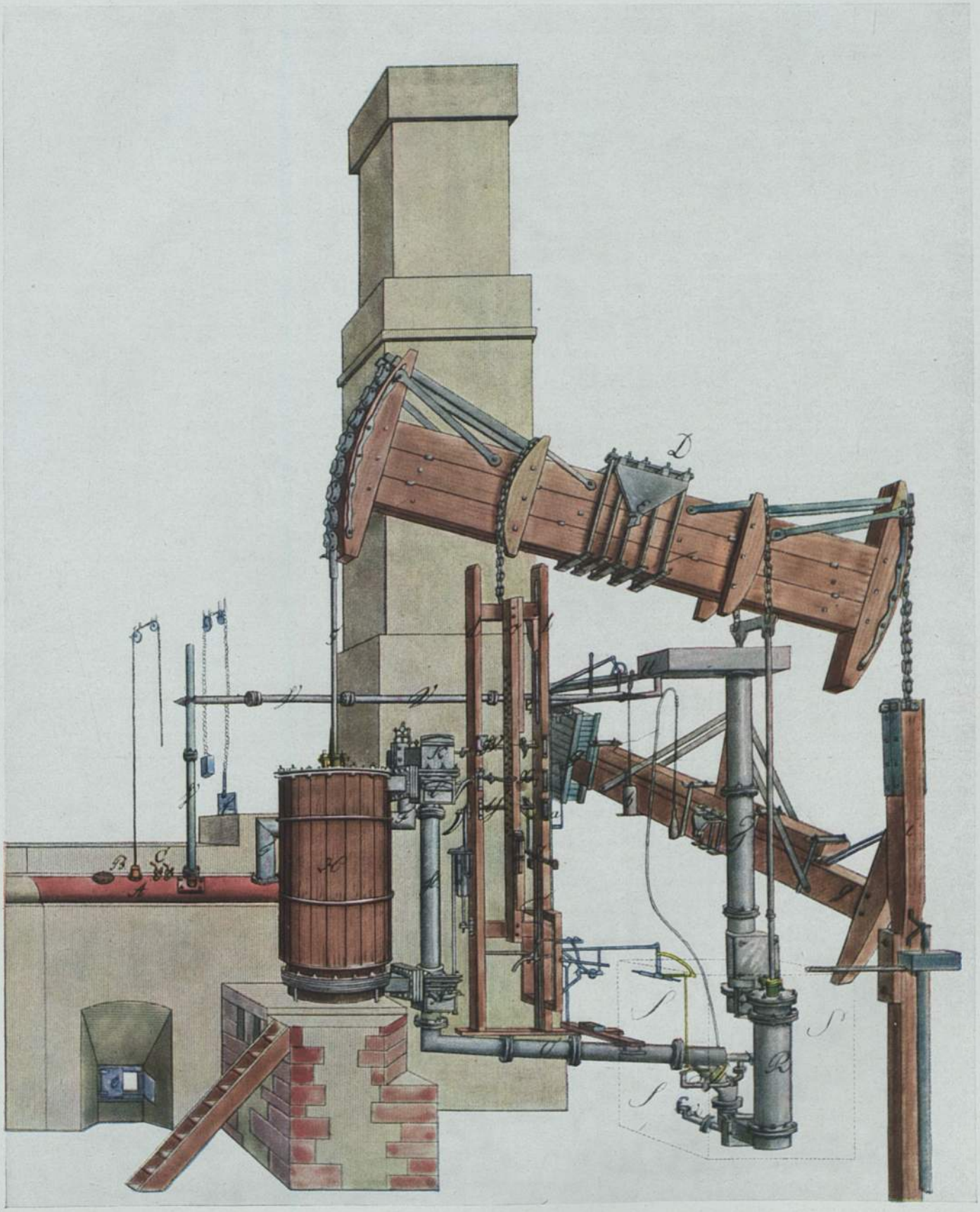
Die Einführung der Doppelwirkung erzwang aber eine grundsätzliche Änderung an wichtigen Bauteilen. Bisher war an den beiden Balancierenden immer nur ziehende Kraft aufgetreten. Der unter Dampfdruck abwärts gehende Kolben zog das eine Ende hinunter, hierauf das Gestängegewicht das andere. Nun aber sollte der Kolben sowohl ziehen wie auch drücken. Mit der einfachen Kette als Verbindung der Kolbenstange mit dem Balancier konnte daher nicht mehr gearbeitet werden. Wohl war es möglich, den Druck durch eine zweite über Rollen umgeführte Kette zu übertragen, doch ergaben sich hieraus unerträgliche Betriebsschwierigkeiten.

Watts Genie, das niemals um einen Ausweg verlegen war, wenn die Fortbildung seiner Maschine einen solchen forderte, erfand sogleich eine Schar neuer Verbindungsarten zwischen Kolbenstange und Balancier. Die wichtigste davon war das Parallelogramm, das gleichfalls ein charakteristischer Bestandteil der Dampfmaschinen in den Jahrzehnten vor und nach dem Jahrhundertwechsel gewesen ist.

Damit Zug- und Druckwirkungen, also wechselnde Beanspruchungen, glatt aufgenommen werden konnten, mußte die Verbindung zwischen Kolbenstange und Balancier starr sein. Das Ende des Schwingbalkens beschrieb aber einen Kreisbogen, indes die Kolbenstange, in der Stopfbüchse gleitend, senkrecht auf und nieder ging. Die schmiegsame Kette hatte diese Verschiedenheit der Bewegungen bisher unmerkbar gemacht. Jetzt aber mußten sie sorgfältig zusammengepaßt werden.

Watt bewirkte das durch Einschaltung einer Lenkerstange. Die Anordnung wird in ihrer einfachsten Form durch Bild 316 veranschaulicht. Die Lenkerstange ist bei A schwenkbar am Balancier und ebenso bei B am Ende eines Auslegers angebracht, dessen anderes Ende C sich um einen festen Zapfen drehen kann. Bei D ist die Kolbenstange angelenkt. Die Längen AD und BD können leicht so zueinander gepaßt werden, daß die Konvexität der Bogen, die der Punkt A und der Punkt B beim Auf- und Niedergang beschreiben, sich ausgleichen, indem die Punkte gleiche und entgegengesetzte Abweichungen von der Geraden ausführen. Der Punkt D bewegt sich alsdann genau senkrecht, womit die gewünschte Wirkung erzielt ist.

Diese in der Tat sehr geistvolle Konstruktion hat Watt besonders befriedigt. „Obgleich ich mich um Ruhm nicht viel kümmere," schrieb er an seinen Sohn, „bin ich doch



Die erste in Deutschland gebaute Dampfmaschine Wattscher Konstruktion

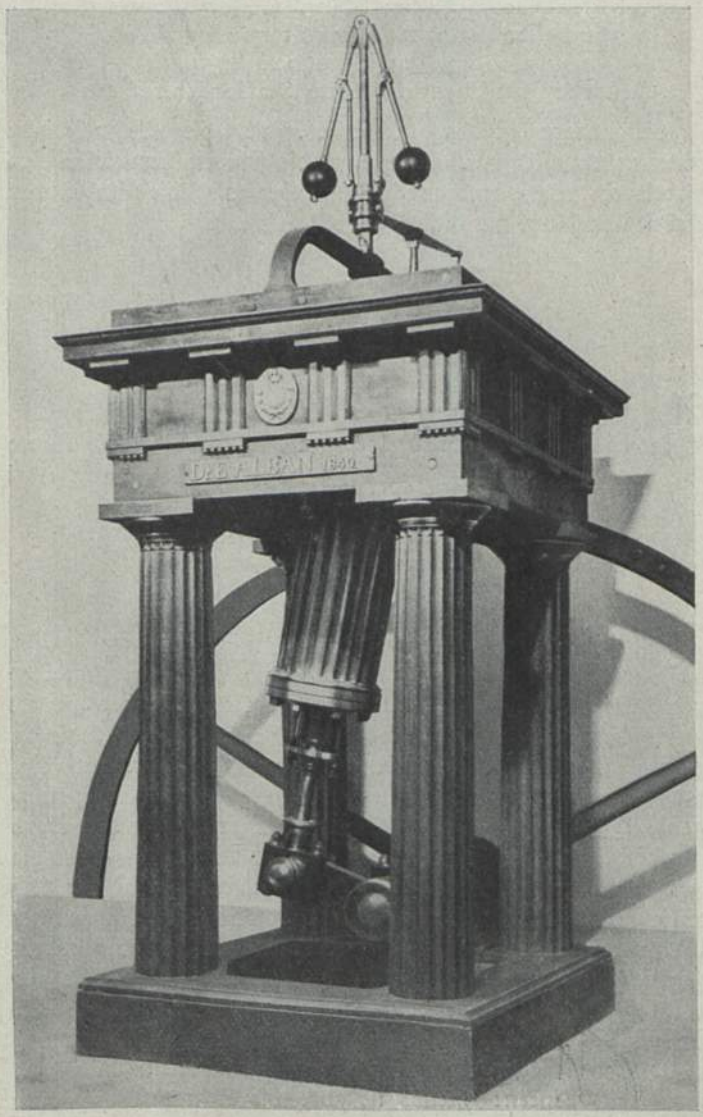
Wasserhaltungsmaschine im Burgörner Revier im Mansfeldischen. Erbaut von Bergassessor Bückling und am 23. August 1785 in Betrieb gesetzt. Nach einem Kupferstich von Carl Eckhardt, 1797

A Kessel, B Kessel-Verschluß, C Probehähne, D Balancier, E Lagerzapfen des Balanciers, F Dampfrohr, H holzverkleideter Zylinder, J Kolbenstange, K oberer Dampfbehälter, L mittlerer Dampfbehälter, M Kommunikationsrohr, N unterer Dampfbehälter, O Kondensatorrohr, P Einspritzrohr, Q Ausblasrohr, R Luftpumpe, S Kühlwasserbehälter, T Warmwasser-Pumpe, U Abflußrinne, V Kesselspeiserohr, W, X u. Y Ventilachsen, Z Ventilgewicht. a Gestänge, wodurch sämtliche Ventile verbunden sind, b Katarakt, c Steuerbaum, d dessen Säulen, e Feuerloch, f Schieber zum Schornstein, g Hilfsbalancier, i Schachtstange

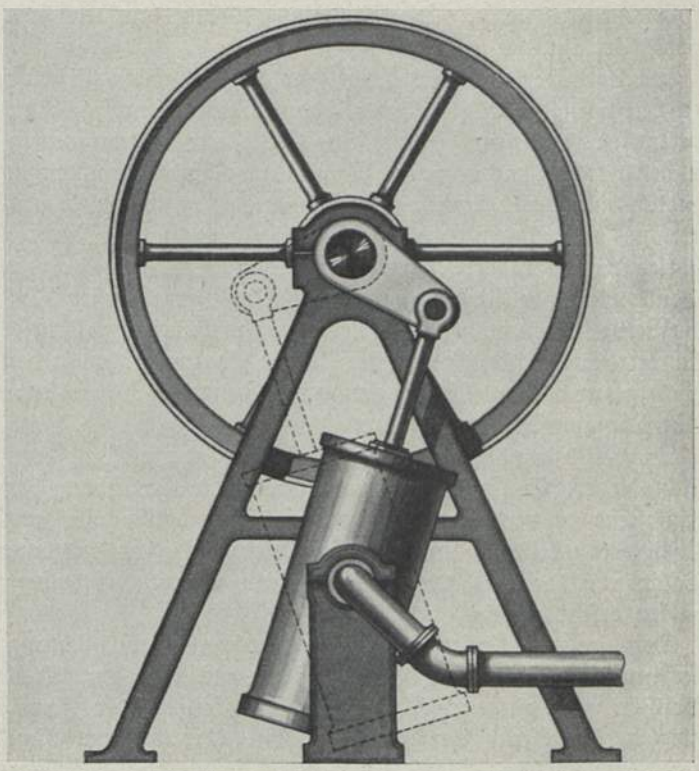
stolzer auf das Parallelogramm als auf irgendeine andere Erfindung, die ich gemacht habe."

In der Patentschrift von 1784, in der eine Methode angegeben ist, die Geradführung der Kolbenstange mittels paralleler Lenker zu bewirken, spricht Watt auch den Gedanken aus, die Leistung der Maschine mittels einer drehbaren Klappe im Dampfzuführungsrohr zu regeln. In der praktischen Ausführung bewirkte er eine selbsttätige Einstellung der Maschine auf gleichbleibende Drehzahl bei wechselnder Beanspruchung dadurch, daß er die Drosselklappe durch einen Zentrifugal- oder Schwungkugel-Regler bedienen ließ. Diese ausgezeichnete Vorrichtung ist nicht von Watt erfunden. Sie wurde bereits seit langem bei den Wind- und Wassermühlen angewendet. Ihre einfache Wirkungsweise ist im vorigen Abschnitt auf Seite 128 dargelegt. Die Verbindung des Schwungkugelreglers mit der Drosselklappe im Dampfzuführungsrohr zeigt Bild 314.

Bevor noch das letzte Jahrzehnt des achtzehnten Jahrhunderts anfing, hatte Watt durch die Anwendung aller dieser Neuerungen eine Kraftmaschine geschaffen, die sämtlichen Anforderungen jener Zeit entsprach, ja über sie hinausging. Die von ihm geleistete Entwicklungsarbeit ist ungeheuer. In der Geschichte der Technik begegnen wir vielleicht keinem Zweiten, dem es vergönnt war, so weit vorzuschreiten. Welch



332. Hochdruckdampfmaschine mit oszillierenden Zylindern von Dr. Ernst Alban, 1840
Deutsches Museum, München



333. Oszillierende Dampfmaschine von Murdock

ein Weg von der einfach wirkenden atmosphärischen Newcomen-Maschine zu der doppelt wirkenden Watt-Maschine mit Expansion, gesonderter Kondensation, mit Schubstange, Räderkurbel, Lenkergeradführung und selbsttätiger Umlaufregelung!

Wir müssen aber, um die Arbeit der nach Watt Gekommenen nicht zu unterschätzen, im Gedächtnis behalten, daß immer erst eine Niederdruckmaschine geschaffen war. Die Spannung des Kesseldampfs ging nach wie vor gar nicht oder nur wenig über den Atmosphärendruck hinaus. Seine Arbeit vermochte er nur gegen das Vakuum zu verrichten, das durch die Kondensation stets auf der anderen Kolbenseite geschaffen wurde.

Die Firma Boulton & Watt hatte sich indes zu einem Welthaus entwickelt. Sie unterhielt einen Fabrikbetrieb, der für die damalige Zeit gewaltig war. Bis zum Jahre 1785 hatten die Inhaber an dem Dampfmaschinengeschäft aber noch immer nichts verdient. Damals schrieb Watt die ergreifenden Worte an einen Freund: „Ich habe ernstlich daran gedacht, die Bürde niederzulegen, die zu tragen ich zu schwach bin, und vielleicht würde ich, wenn nicht andere Gefühle stärker gewesen wären, daran gedacht haben, die sterbliche Hülle abzuwerfen. Aber wenn's nicht schlechter wird, kann ich mich vielleicht noch fortschleppen. Salomo sagt: vermehrte Kenntnisse bringen vermehrte Sorgen. Hätte er gesagt: vermehrte Geschäfte anstatt vermehrte Kenntnisse, so würde er vollkommen recht haben."

Endlich, am 7. Dezember 1787, etwa sechs Wochen vor Watts 52. Geburtstag, konnte Boulton dem Vertreter der Firma in London mitteilen: „Da Herr Watt bei Herrn Mc. Gregor in Glasgow ist, bitte ich Sie, ihm einige Zeilen zu schreiben und ihm mitzuteilen, daß Sie ihm 4000 Pfund auf sein Konto gutgeschrieben haben, daß Sie 1000 Pfund für ihn an die Albion-Mühle bezahlt haben und ihm bis Weihnachten wahrscheinlich noch 2000 Pfund werden gutschreiben können." Fortab war Watt aller Geld-

schwierigkeiten ledig. Die Nutzungsgebühren brachten sehr hohe Beträge.

Boulton aber, der stets bereit war, sich an einem Geschäft zu beteiligen, wenn er glaubte, dadurch eine Dampfmaschine verkaufen zu können, steckte seine Mittel immer von neuem in gewagte Unternehmungen. Nach langem Kampf brachte ihm endlich eine Präge-Anstalt für Münzen, die er vorzüglich eingerichtet hatte, bedeutende und dauernde Einnahmen. Murdock schrieb später darüber: „Der unermüdlichen Ausdauer und Kraft Boultons in der Verfolgung seiner Ziele ist zum großen Teil die Vervollkommnung zuzuschreiben, die das Münzwesen schließlich erreichte." Und Watt sagte: „Hätte Boulton nichts in der Welt getan als das Münzwesen vervollkommnet, so verdiente sein Name unsterblich zu sein."

An den Grundlagen seiner Maschine änderte Watt nun nichts mehr. Er strebte nur noch danach, die Ausbildung der Einzelteile zu verbessern und so weit wie möglich alles aus Eisen herzustellen. Am längsten hielt sich der hölzerne Balancier, der erst 1799 durch einen eisernen Schwingbalken ersetzt wurde.

Der große Erfinder hatte sich aber bereits im Anfang der neunziger Jahre von den Geschäften zurückgezogen. Auch Boulton setzte sich zur Ruhe, und die Leitung der Firma ging in die Hände ihrer beiden Söhne über, die im Sinn der Väter wirkten. Watt, der während seines ganzen Lebens kränklich war, überlebte den kräftigen Boulton um ein Jahrzehnt.

Der Kampfgenosse, der durch seine Beharrlichkeit, seinen Weitblick und geschäftliche Kühnheit unberechenbar viel für das Ausreifen von Watts Gedanken und ihre Übersetzung in Holz und Eisen getan hatte, dem daher ein gut Teil des Danks und Ruhms gebührt, starb am 17. August 1809. Einen wundervollen Nachruf enthält ein Brief Watts an den Sohn des eben Verstorbenen: „Wenige Männer haben seine Fähigkeiten besessen, und eine noch geringere Anzahl haben sie so angewendet wie er. Und wenn wir dazu seine Leutseligkeit, seine Großmut und seine Liebe zu seinen Freunden rechnen, so erhalten wir das Bild eines seltenen Charakters. Einen solchen Freund haben wir verloren, auf dessen Zuneigung wir stolz sein können, während Sie stolz darauf sein können, der Sohn eines solchen Vaters zu sein!"

Der große technische Schöpfer hatte sich in dem Gut Heathfield bei Birmingham einen Altersitz erworben. Hier lebte er glücklich und zufrieden, denn die Gesundheit, die er während aller Arbeitsjahre hatte entbehren müssen, ward ihm nun zuteil. Auch sollte es ihm vergönnt sein, die Auswirkungen seines Schaffens ein weites Stück zu verfolgen. Er sah die Großindustrie Englands emporkeimen, hörte von der ersten Fahrt Fultons mit einem Dampfschiff, das durch eine Maschine aus der Fabrik von Boulton & Watt angetrieben wurde, und erlebte den Anfang des Schaffens von Georg Stephenson, der die Lokomotive vervollkommnete. In seinem Todesjahr fuhr die „Savannah" über den Ozean als erstes Schiff, das mit Dampfkraft das Weltmeer kreuzte.

Als ein ganz Großer ward der greise Watt von allen verehrt. Er nahm teil an dem wissenschaftlichen und technischen Leben, weilte aber am liebsten in der Stille seines Landsitzes. Dort hatte er sich eine kleine Werkstätte eingerichtet, in der er immer mit Versuchen beschäftigt war. Zu seiner größten Freude gelang ihm die Konstruktion einer Maschine zum Kopieren von Büsten. Er machte sich ein Vergnügen daraus, seinen Freunden Bildwerke zum Geschenk zu machen, die mittels dieses Apparats hergestellt worden waren, und bezeichnete sie in einem Brief vom Jahre 1818 scherzweise als „Erzeugnisse eines jungen Künstlers, der eben in sein 83. Jahr eintritt".

Watt starb am 19. August 1819. Er wurde in der Kirche zu Heathfield an Boultons Seite begraben. In der Westminster-Abtei, dem Ehrentempel für Englands größte Männer, steht seine Statue mit der Inschrift:

Nicht einen Namen zu verewigen,
der dauern muß, solange die Künste des Friedens blühen,
sondern zu zeigen,
daß die Menschheit gelernt hat, die zu ehren,
die ihren Dank am meisten verdienen, haben
Der König,
Seine Minister und viele der Adligen
und Bürgerlichen des Königreichs
dieses Denkmal errichtet

JAMES WATT,

welcher die Kraft eines schöpferischen,
in wissenschaftlichen Forschungen früh geübten Geistes
auf die Verbesserung
der Dampfmaschine wandte,
dadurch die Hilfsquellen seines Landes erweiterte,
die Kraft des Menschen vermehrte
und so emporstieg zu einer hervorragenden Stellung
unter den berühmtesten Männern der Wissenschaft
und den wahren Wohltätern der Welt.
Geboren zu Greenock 1736.
Gestorben zu Heathfield in Staffordshire 1819.

Großartiger ist das Denkmal, das die Technik dem Titanen errichtet hat. Sie nennt die Einheit der elektrischen Arbeit ein Watt, und minder häufiger wird die Einheit der Arbeit überhaupt mit diesem Wort bezeichnet.

*

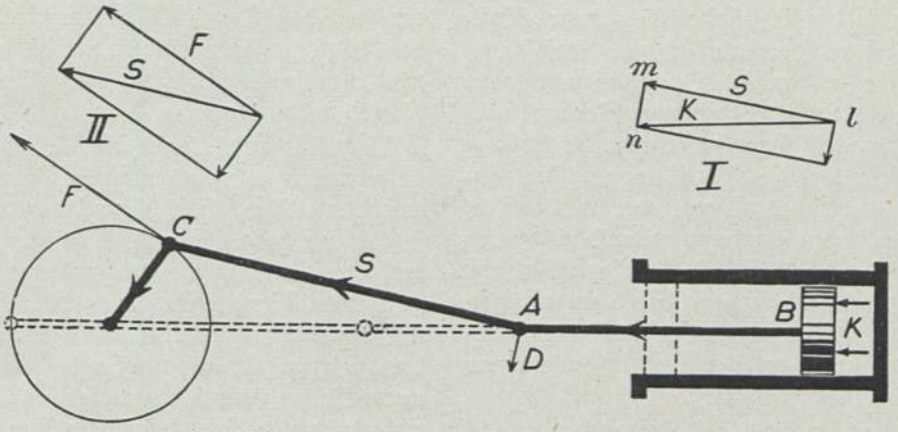
Als Schiller im Oktober 1798 bei der Wiedereröffnung des Theaters in Weimar im Prolog zum „Wallenstein" die Worte sprechen ließ:

Und jetzt an des Jahrhunderts ernstem Ende,
Wo selbst die Wirklichkeit zur Dichtung wird,
Wo wir den Kampf gewaltiger Naturen
Um ein bedeutend Ziel vor Augen sehen
Und um der Menschheit große Gegenstände,
Um Herrschaft und um Freiheit wird gerungen ...

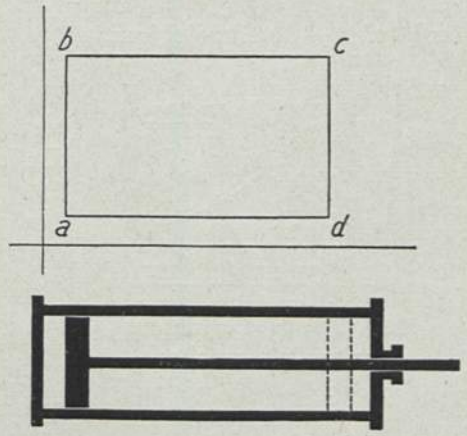
da dachte er wahrlich nicht an die Dampfmaschine, zumal er nie etwas von ihr erfahren hat. Tatsächlich aber ist sie es in der von Watt empfangenen Gestalt gewesen, die in dem bald darauf anbrechenden neuen Jahrhundert eine unerhörte, von keinem Dichter erträumte Wirklichkeit heraufgeführt hat. Sie schuf — kaum weniger kraftvoll wirkend als die französische Revolution — bedeutende Ziele, um die noch heute gerungen wird. Soweit diese Ziele technischer und wissenschaftlicher Natur waren, ist das Streben nach ihnen der Menschheit unbedingt nützlich gewesen. Leider aber wurde zugleich durch die Vertiefung der sozialen Gegensätze der Kampf um Herrschaft und Freiheit immer schärfer. So ist Watts Lebenswerk der Menschheit nicht ausschließlich zum Segen geworden. Man muß an einen Ausspruch Rousseaus denken: „Alles ist gut, wie es aus den Händen des Schöpfers hervorgeht; alles entartet unter den Händen der Menschen."

Mit dem Beginn des neuen Jahrhunderts erlosch Watts

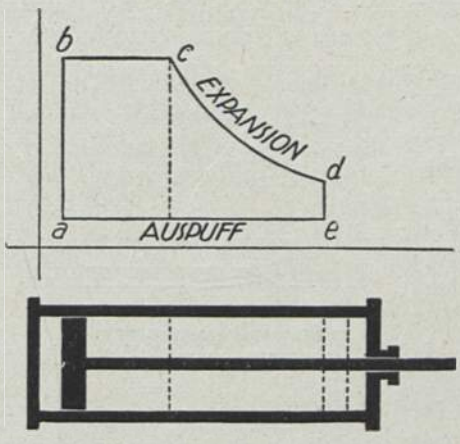
Hauptpatent, das seiner Firma nahezu die Alleinherrschaft im Dampfmaschinenbau gesichert hatte. Das Feld wurde nunmehr für die Bebauung durch jeden Arbeitslustigen frei, und es setzte eine sehr lebhafte Erfindertätigkeit ein. Sie änderte zwar zunächst nichts an den Grundgedanken, die der nun im Ruhestand lebende Großmeister aufgestellt hatte, sie brachte nicht sogleich eine Fortentwicklung grundsätzlicher Art, es wurde aber bald vieles an den Ausführungsformen verbessert.




334. Kraftübertragung vom Kolben auf die Kurbelwelle



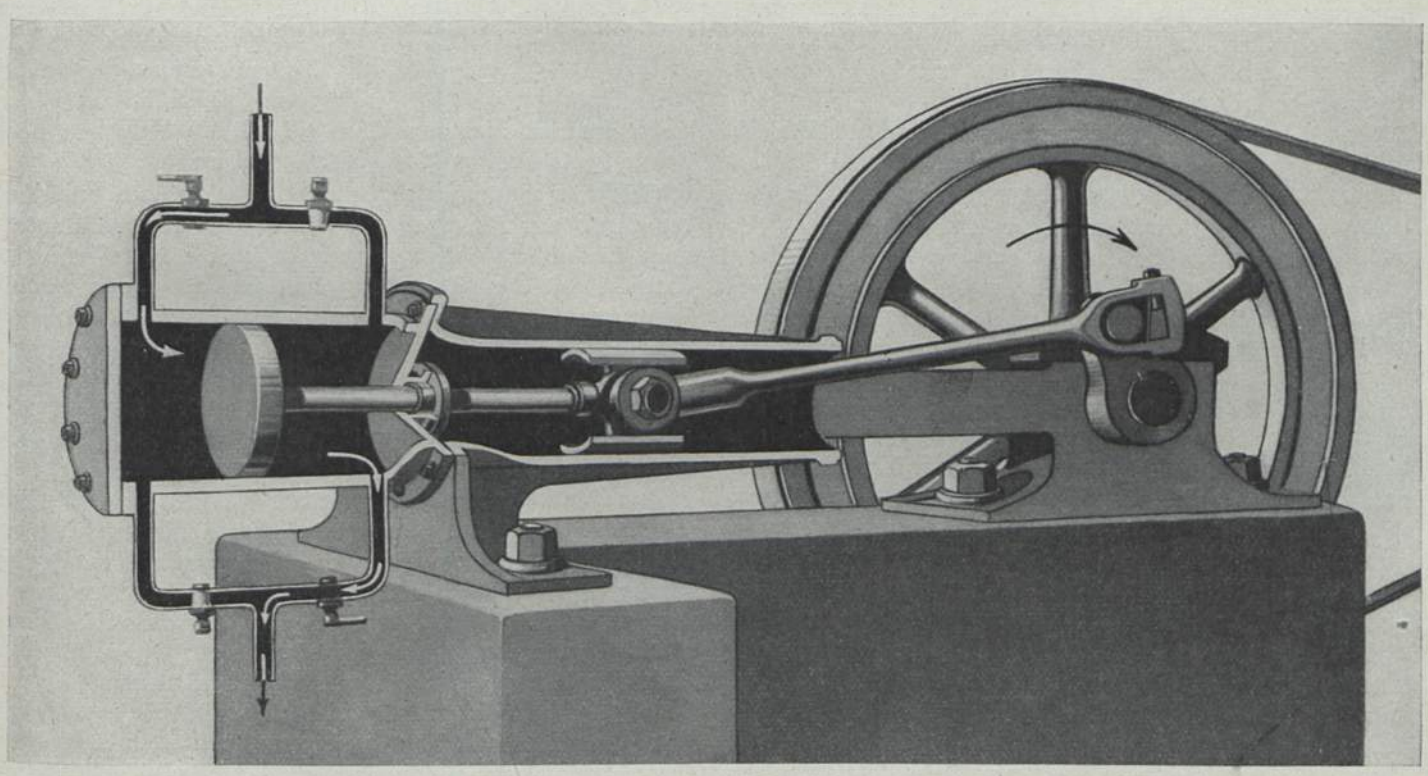

335. Dampf-Diagramm einer Volldruckmaschine




336. Theoretisches Dampf-Diagramm einer Expansionsmaschine

Besonders strebte man danach, eine „unabhängige Maschine" zu schaffen. Denn bis dahin bildeten ein Pfeiler oder eine Wand des Betriebshauses immer noch einen Teil der Maschine, indem sie das Auflager für den Balancier trugen. Nun, nachdem dieser nicht mehr aus Holzbalken von riesigen Ausmaßen gefügt, sondern knapper in Eisen ausgeführt wurde, konnte daran gedacht werden, das Auflager in das Maschinengestell einzubeziehen. Sämtliche Teile der Vorrichtung wurden auf einen gußeisernen Kasten gesetzt, der in seinem Inneren Kondensator und sämtliche Pumpen barg; es waren dies die Heißwasser oder Luftpumpe, die das Kondensatorgefäß entleerte, die Kaltwasserpumpe, die das Kühlwasser um den Kondensator laufend erhielt, und die Speisepumpe für den Kessel. Auf den Kasten war ein Rahmen aus gußeisernen Säulen gesetzt, der den Balancier trug und Gelegenheit gab, den Gegenlenker des Parallelogramms anzubringen.

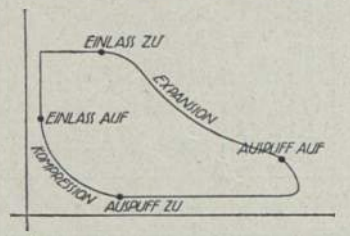
Damit war die Dampfmaschine ein in sich geschlossenes Ganzes geworden, an dem sämtliche Teile aus Eisen gefertigt waren (Bild 318).



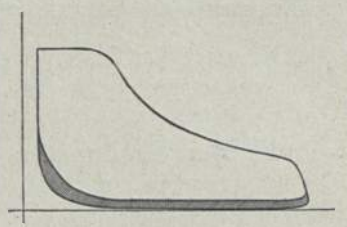
337. Schematischer Schnitt durch eine doppeltwirkende Dampfmaschine mit Auspuff

Noch immer aber nahm der Balancier einen unverhältnismäßig großen Raum ein und verbrauchte viel Kraft durch die bei jeder Hubumkehr notwendige Beschleunigung seiner Masse. Es gelang aber vorläufig trotz mancher Versuche noch lange nicht, ihn durch etwas Besseres zu ersetzen. Schwierigkeiten machte dann insbesondere auch die Steuerung der Maschine. Bei der doppeltwirkenden waren, wie wir wissen, vier Ventile zu bedienen, wozu ein recht verwickeltes Hebelgestänge gebraucht wurde. Es ist ein großes Verdienst Murdocks, daß er die vier Steuerorgane durch ein einziges, den Muschelschieber, ersetzte, der noch heute verwendet wird. Wir besprechen die Entwicklung der Steuerung im Zusammenhang.

Sehr wichtig war dann weiter der Übergang zum Gebrauch hochgespannten Dampfs. Auch Watt hatte bereits daran gedacht, gelegentlich die Dampfpressung im Kessel über den Atmosphärendruck hinaus zu steigern, denn im Abschnitt Viertens seines großen Patents spricht er von Auspuffmaschinen, solchen also, bei denen der Dampf, nachdem er gearbeitet hat, nicht einem Kondensatorgefäß, sondern der freien Luft zugeführt werden sollte. Damit auch in derartigen Fällen der Frischdampf auf der anderen Kolbenseite Arbeit leisten konnte, mußte er über den Gegendruck der Atmosphäre gespannt sein. Watt hat aber tatsächlich keine Hochdruckmaschine ausgeführt, er blieb zeitlebens ihr Feind, da er ihre Bedienung für zu gefährlich hielt. Die Erinnerung an die Explosion einer Savery-Maschine, die auf Seite 166 erwähnt wurde, lebte noch zu lebendig fort. Es war auch notwendig, dem Kessel eine widerstandsfähigere Gestalt zu geben, die Dampfleitungen haltbarer zu dichten, ehe man zu größeren Drücken übergehen konnte.




338. Tatsächliches Dampf-Diagramm einer Zylinderseite

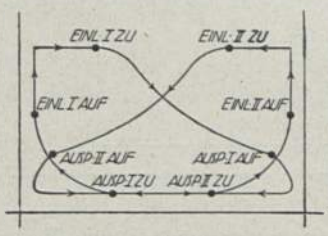


340. Tatsächliches Dampf-Diagramm einer Expansionsmaschine mit Kondensation

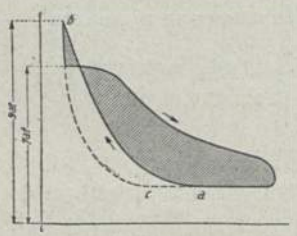
Das tat zuerst der Amerikaner Oliver Evans. Er trat der herrschenden Anschauung entgegen, die da meinte, daß man zur Erzeugung eines Dampfdrucks von 3 Atmosphären, das sind 3 Kilogramm auf das Quadratzentimeter Kesselfläche, die dreifache Kohlenmenge aufwenden müsse wie zur Erzielung einer Pressung von einer Atmosphäre. Wie gründlich falsch dieser Glaube war, werden wir später noch genauer hören; der Brennstoffverbrauch wächst tatsächlich längst nicht im gleichen Maß wie die Drücke. Evans baute Maschinen mit Dampfspannungen bis zu vier Atmosphären, was damals bereits als Hochdruck bezeichnet wurde; er erzielte hierdurch eine bedeutende Verringerung des Kohlenverbrauchs für die geleistete Arbeitseinheit und kam mit weit kleineren Abmessungen aller Teile aus.

In Europa war es Richard Trevithick, der sich große Verdienste um die Einführung von Hochdruck-Maschinen erwarb. Er verwandte sie auch für den Bau von dampfgetriebenen Straßenwagen und schuf mit ihrer Hilfe die erste Lokomotive. Das abenteuerliche Leben dieses Manns ist in Band II auf Seite 148 geschildert worden. Dort wurde auch erwähnt, daß Trevithick die Bergwerke im Innern von Peru vor dem Ersaufen rettete, da nur die leichten Teile der Dampfmaschinen seiner Art durch unwegsame Gegenden dorthin befördert werden konnten.

Als Watt von Trevithicks Arbeiten hörte, war er höchst aufgebracht. Er meinte, daß es ihn nur geringe Mühe kosten würde, eine Dampfmaschinen-Anlage für sogar hundert Atmosphären zu bauen, er möchte es aber keinem zumuten, sie zu bedienen; Trevithick verdiene gehängt zu werden, weil er allzu gefährliche Dinge treibe. Die Firma Boulton & Watt bemühte sich sogar, beim Parlament ein Verbot der Hochdruckmaschinen durchzusetzen. Es gelang aber doch nicht, das Vordringen der neuen Gattung aufzuhalten, die so außerordentlich viel zur Vereinfachung und Verbilligung des Dampfmaschinenbetriebs beigetragen hat. Die Niederdruckmaschine ist längst ausgestorben. Nach heutigen Begriffen beginnt der Hochdruck in Dampfkesseln erst bei 25—30 Atmosphären.




339. Dampf-Diagramme beider Zylinderseiten



341. Dampf-Diagramm einer Maschine mit zu hoher Kompression

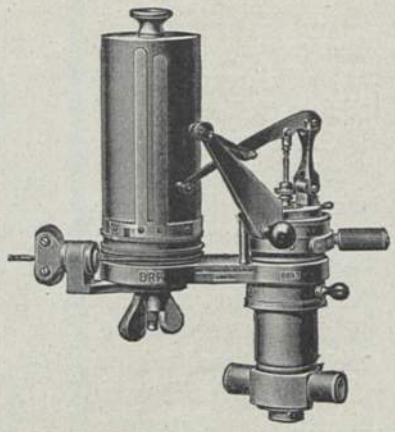
In Deutschland bemühten sich Georg von Reichenbach, der Erfinder der Wassersäulenmaschine (Seite 133), und insbesondere Dr. Ernst Alban um die Einführung und Ausbildung der Hochdruckmaschine. Alban, der als Sohn eines Pastors zu Neubrandenburg in Mecklenburg-Strelitz geboren wurde und zuerst Augenarzt war, hat sehr wichtige theoretische und praktische Arbeit geleistet (Seite 204), aber es gelang ihm trotz lebhaftester Bemühungen doch nicht, seine Maschinen in der Industrie heimisch zu machen. Als erster aller deutschen Ingenieure wurde er für seine hervorragenden Leistungen zum Ehrendoktor der Philosophie ernannt. Eine von Alban eingerichtete Maschinenfabrik besteht heute noch zu Plau in Mecklenburg.

Größte Bedeutung sollte weiter ein Gedanke erlangen, der zuerst von Jonathan Hornblower in den Dampfmaschinenbau eingeführt wurde. Er erkannte, daß die Expansionskraft des Dampfs gründlicher ausgenutzt werden könne, wenn man ihn vor dem Eintritt in den Kondensator nicht nur in einem, sondern in zwei Zylindern wirken ließe. Die Anordnungen solcher Art wurden aber erst durch Arthur Woolf zum Erfolg geführt. Wir werden von den Verbundmaschinen, die hundert Jahre später als die gewaltigsten Einheiten ausgeführt wurden, noch ausführlich sprechen (Seite 241).

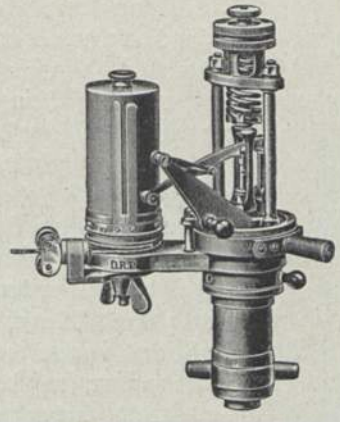
In England entstanden zahlreiche Fabriken, die sich den Bau von Dampfmaschinen zur Aufgabe machten. Ihnen allen blieb die Firma Boulton & Watt zunächst überlegen, da sie die größten Erfahrungen besaß und die Bewahrerin von Watts Lebenswerk war. Nach Jahrzehnten erst erstarkten die anderen zur Ebenbürtigkeit. Zu den ältesten Dampfmaschinenbauern in England gehören Henry Maudslay und John Penn. 1823 gründete Georg Stephenson seine Lokomotivfabrik zu Newcastle; sie entfaltete auf ihrem Gebiet die gleiche Pioniertätigkeit wie die Arbeitsstätte zu Soho und errang ebenso großen Ruhm. Bei

Maudslay lernte James Nasmyth, der eine ganz neue Anwendungsart der Kolben-Dampfmaschine erdachte.

In den Eisenwerken wurden seit langem schwere Stücke hergestellt, die nicht mit handgeschwungenen Hämmern ausgeschmiedet werden konnten. Eiserne Klötze von erheblichem Gewicht mußten niederfallen, um den glühenden Stangen und Blöcken die gewünschten Formen zu geben. Man verstand es bereits, mit Hilfe von Wasserrädern schwere Stielhämmer (Bild 319) zu bewegen, indem man sie durch Daumen heben ließ. Die Dampfmaschine steigerte den Bedarf an großen schmiedeisernen Formstücken bedeutend, und es lag nahe, diesen Krafterzeuger selbst für ihre Herstellung heranzuziehen.



342. Indikator mit Innenfeder



343. Indikator mit Außenfeder

Bauart von Dreyer, Rosenkranz & Droop, Hannover

1784 wurde zum erstenmal Eisen mit Dampfkraft geschmiedet. Die Hammeranordnung war eine Erfindung James Watts, der auch hierbei den Balancier anwendete. Wie Bild 320, die Patentzeichnung, zeigt, ist das eine Ende der Schwinge wie üblich an die Kolbenstange gesetzt, das andere faßt mittels einer Verbindungsstange den Hammerstiel und nimmt ihn hoch, wenn der Dampf den Kolben niederdrückt. Später wurde dann der Dampfzylinder zwischen den Bär und den Drehpunkt des Hammers gestellt (Bild 321).

Alle diese Vorrichtungen arbeiteten aber sehr langsam und hatten keine ausreichende Hubhöhe. Nasmyth schuf die grundlegende Verbesserung, die bis zum heutigen Tag ihren großen Wert behalten hat, indem er den Bär unmittelbar an der Kolbenstange anbrachte.

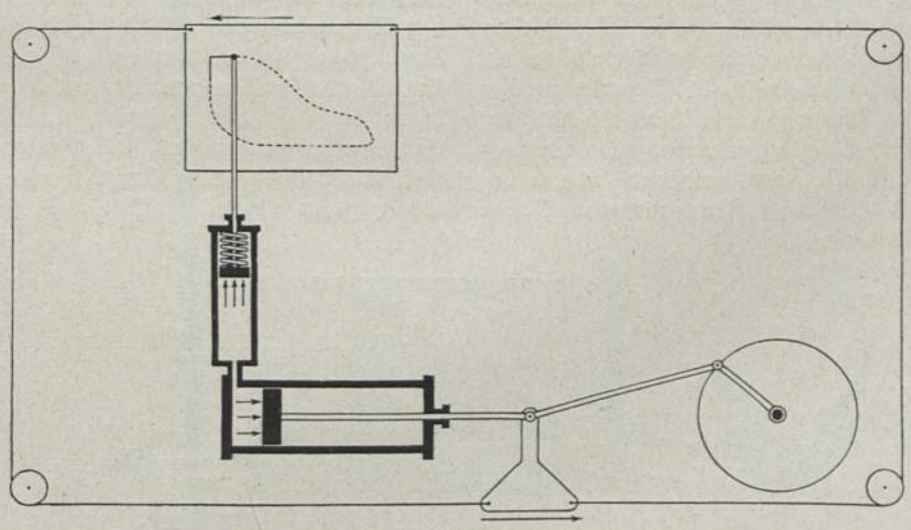
Am 24. November 1839 erhielt er einen Brief von Humphries, dem Ingenieur der Großbritannischen Dampfschiffgesellschaft, in dem dieser ihm mitteilte, daß keine Firma im ganzen Königreich die große Radwelle für einen neuen Dampfer zu schmieden vermöge, weshalb versucht werden müsse, sie aus Gußeisen herzustellen. Das regte Nasmyth zum Nachdenken an, und schon nach einer halben Stunde sah er eine ausgezeichnete Neukonstruktion klar vor Augen. Er machte damals die auf Bild 322 dargestellte Skizze, in deren rechte untere Ecke er kleine humoristische Darstellungen der alten Stielhämmer zeichnete.

Der Hammer der neuen Art (Bild 323) besteht aus einem schweren eisernen Gestell, zwischen dessen gespreizten Füßen der Amboß aufgestellt ist. Der Bär gleitet zwischen zwei senkrechten Führungen. Darüber ist der Dampfzylinder aufgestellt, dessen Kolbenstange den Bär trägt. Wird der Dampf unter den Kolben gelassen, so hebt er diesen und damit den Bär. Die Luft über dem Kolben kann durch zahlreiche seitliche Bohrungen aus dem Zylinder entweichen. Ist der Kolben so hoch gestiegen, daß er die Bohrungen verdeckt, dann preßt er die Luft in dem Raum zwischen sich und dem Zylinderdeckel zusammen, wodurch der Hub sanft abgebremst wird. Sobald man ein Auspuffventil öffnet, strömt der Dampf aus dem unteren Zylinderraum, und das Schwergewicht des Bären fällt nieder.

Hämmer dieser Art können mit bedeutenden Hubhöhen sehr geschwind arbeiten. Sie sind zu gewaltigen Abmessungen entwickelt worden. Der berühmte Hammer „Fritz" der Kruppschen Werke in Essen (Bild 325) besaß ein Bärgewicht von 50 000 Kilogramm. Er hat von 1861 bis 1911, also 50 Jahre lang, gearbeitet. Dann wurde er durch eine noch mächtigere Vorrichtung, eine Schmiedepresse, ersetzt, die ohne Stoß durch langsames Ansteigen des Wasserdrucks auf den Stempel eine Kraftwirkung von drei Millionen Kilogramm auszuüben vermag.

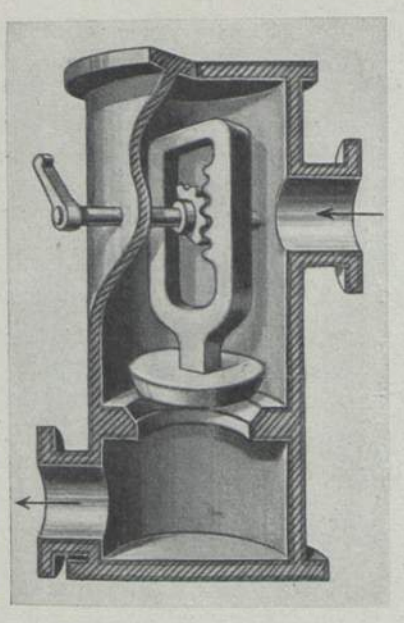
Die außerordentliche Genauigkeit, mit der die Hämmer Nasmythscher Art zu arbeiten vermögen, wurde Kaiser Wilhelm I. bei einem Besuch der Kruppschen Fabrik mit Stolz gezeigt. Man bat ihn, seine Taschenuhr auf dem Amboß niederzulegen. Der Schmied ließ hierauf das Riesengewicht des Bären so weit hinuntersausen, daß er gerade das Uhrglas berührte. Dieses wurde jedoch nicht zertrümmert.

Eine Weiterbildung der unmittelbar angetriebenen Hämmer finden wir heute in den Dampframmen (Bild 324). Bei diesen steht der Kolben fest, ein Hohlraum im Bären selbst bildet den beweglichen Zylinder. Der Dampf tritt jetzt über den Kolben und hebt den Bär, indem er unten gegen den Kolben, oben gegen den Abschluß des Zylinders drückt. Der Mechanismus ist dadurch noch bedeutend vereinfacht worden.



344. Einrichtung und Wirkungsweise des Indikators

Ein besonders großartiges Werk, das die Überlegenheit der Dampfmaschine Wattscher Art allen älteren Krafterzeugern gegenüber in blendendem Licht zeigte, wurde in den vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts in Angriff genommen: die Trockenlegung des Haarlemer Moors in Holland.



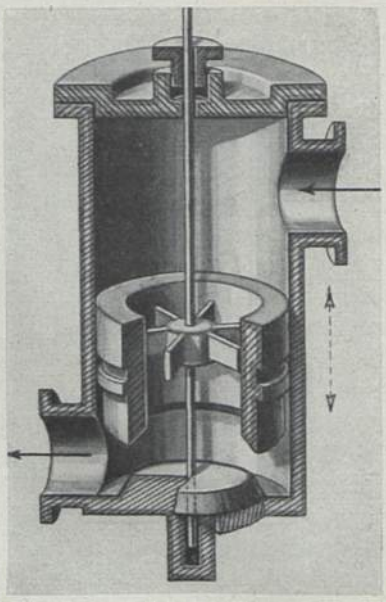
345. Tellerventil mit Zahnradantrieb

„Bis zum dreizehnten Jahrhundert waren dort", so berichtet Matschoß, „nur einzelne kleinere Seen vorhanden gewesen. Die furchtbare friesische Sturmflut des Jahres 1230 erweiterte die kleinen Seen zu einem Meer, in das sie Hunderttausende von Menschen begrub. Und immer weitere Landgebiete fraß das Meer. 1530 nahm es 56 Quadratkilometer ein, und 1648 bedeckte es 142 Quadratkilometer Fläche. Da es im Anfang der dreißiger Jahre des neunzehnten Jahrhunderts auf 180 Quadratkilometer gestiegen war und außerdem fast jedes Jahr die Gefahr bestand, daß die Wassermassen Amsterdam, Haarlem und Leyden überschwemmen und vernichten würden, beschloß man 1839 durch Gesetz, die Trockenlegung des Meers mit allen zu Gebote stehenden Mitteln zu betreiben. Zwar hatten schon im achtzehnten Jahrhundert Smeatonsche Feuermaschinen die Windmühlen bei ihrer Arbeit unterstützt, aber ihre Leistung war zu gering gewesen, um weitreichenden, durchschlagenden Erfolg möglich zu machen. Auch die sehr zahlreichen Windmühlen, die noch 1840 zu diesem Zweck im Betrieb waren, konnten bei weitem nicht die Wassermassen bewältigen.

„Die umfassenden Arbeiten begannen 1840 mit dem Bau eines großen Ringdeichs und eines Kanals. Nach sieben Jahren waren diese Bauten so weit vorgeschritten, daß das erste Pumpwerk in Betrieb gesetzt werden konnte. Die Dampfmaschine besaß zwei Dampfzylinder, von denen der eine den anderen umschloß. Der Kolben des großen Zylinders bot also dem Dampfdruck eine Ringfläche dar. Der innere Dampfzylinder maß 2,13, der äußere 3,66 Meter im Durchmesser. Der Hub betrug 3 Meter. Der innere Kolben war durch eine, der äußere Ringkolben durch vier Kolbenstangen mit einem kreisförmigen Behälter verbunden, der mit Belastungsgewichten angefüllt wurde. Von diesem mit den 5 Kolbenstangen auf und nieder gehenden Behälter wurden mit Hilfe von 11 Balanciers 11 Pumpen in Bewegung gesetzt, die bei 10 Hüben in der Minute 39 600 Kubikmeter Wasser in einer Stunde förderten. Die Dampfzylinder waren in der Mitte eines runden Turms angeordnet, und von ihnen gingen strahlenförmig nach allen Seiten die Balanciers aus.

„1852, nach etwas mehr als dreijähriger Arbeit der Dampfmaschinen, war das Riesenwerk der Entwässerung vollendet. Eine Wassermasse von fast 832 Millionen Kubikmeter hatten die Pumpen entfernt; die Kosten der Trockenlegung beliefen sich auf etwa 4½ Millionen holländischer Gulden."

Schon während der Ausführung dieses Werks wurde an eine andere, noch größere Arbeit gedacht, die Trockenlegung der Zuidersee, die eine Fläche von 3600 Quadratmetern, so groß wie der Staat Sachsen-Weimar, bedeckt. Der Boden dieses Meeresteils ist einst fruchtbares Land gewesen, gewaltige Fluten im zwölften und dreizehnten Jahrhundert erst haben ihn überschwemmt. Das große Unternehmen wird erst heute mit den starken und behenden Maschinen, die wir besitzen, durchgeführt.

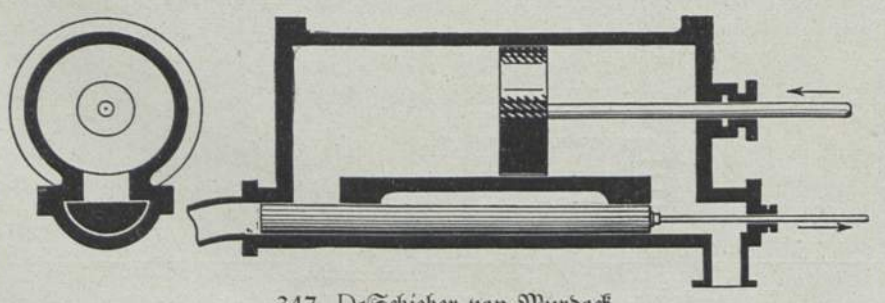


346. Rohrventil nach Hornblower

Wir kehren ins achtzehnte Jahrhundert zurück, um den Weg der Dampfmaschine in Deutschland zu betrachten. Alles was hierüber in der Jetztzeit noch zu ermitteln war, hat Matschoß erschöpfend in seinen Büchern „Entwicklung der Dampfmaschine" und „Geschichte der Dampfmaschine" zusammengestellt.

Es wurde den Völkern des europäischen Festlands nicht leicht gemacht, die neue Errungenschaft zu nutzen. Denn die Engländer wußten ganz genau, daß der Besitz der Dampfmaschine ihnen einen industriellen Vorsprung vor allen anderen sicherte, und sie gaben sich alle Mühe, sie praktisch zu einem Monopol des Vereinigten Königreichs zu machen. Ausfuhrverbote wurden erlassen und jeder Verrat von Fabrikationsgeheimnissen der Dampfmaschinen-Bauanstalten mit schweren Strafen bedroht. Es war daher nur durch Beschreitung von Umwegen möglich, Kenntnis davon zu gewinnen, was jenseits des Kanals vorging.

Friedrich der Große, der weit mehr für die wirtschaftliche Entwicklung Preußens getan hat, als die meisten wissen, die aus der Geschichtsstunde nur seine kriegerischen Taten kennen, erfaßte schon frühzeitig die Bedeutung der Dampfmaschine. Bereits 1780 wies er in einem Erlaß auf den Nutzen hin, den eine solche Einrichtung bringen könnte. Drei Jahre später wurden auf seine Veranlassung der Oberbergrat Freiherr von Eschen und der Bergassessor Bückling nach England gesandt, um sich dort über Watts Schaffen zu unterrichten. Dies gelang mit vielen Schwierigkeiten, und Bückling konnte berichten, „daß er so glücklich gewesen sei, die Boultonsche Feuermaschine, deren Mechanismus die französischen, nach London geschickten Akademisten vergebens zu erforschen bemüht gewesen sind, genau zu untersuchen und ihren Mechanismus sowohl wie das Verhältnis aller ihrer Teile sorgfältig zu berechnen".

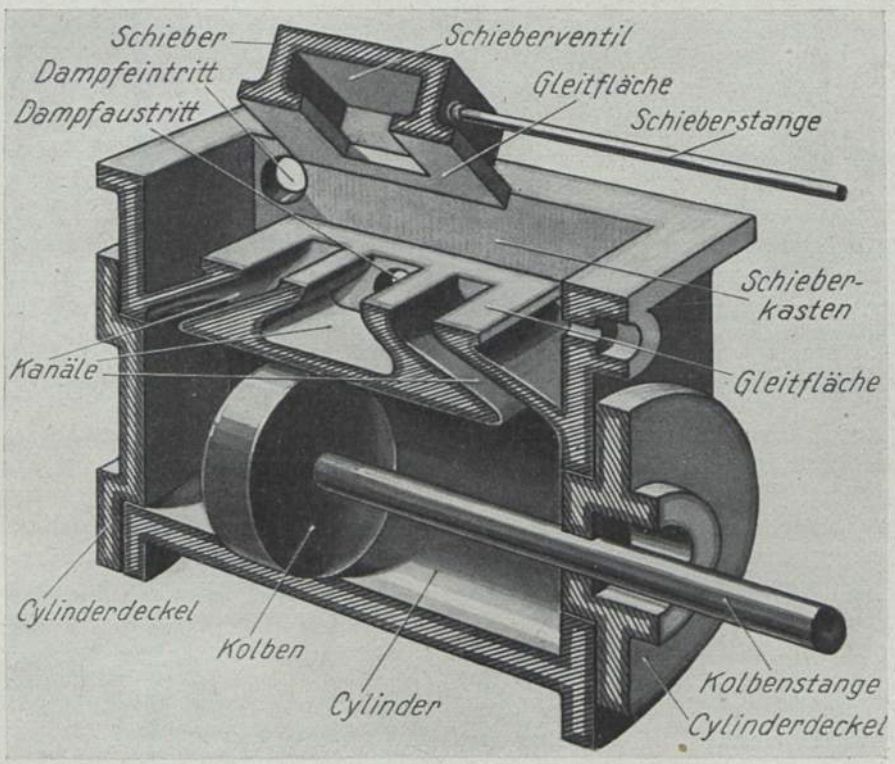


347. D-Schieber von Murdock

Nach seiner Rückkehr erhielt Bückling am 1. Juni 1783 vom König den Auftrag, eine Feuermaschine in dem Mansfeldschen Bergbaugebiet zu errichten. Dort war man bei Hettstedt im Burgörner Revier gezwungen gewesen, einen Schacht besonders tief hinunterzuführen und stand nun einem starken Wasserandrang gegenüber. Mehr als hundert Pferde wären erforderlich gewesen, um eine ausreichende Pumpanlage zu betreiben. Die Ausgaben für eine „Roßkunst" erschienen daher zu hoch. Eine Radkunst konnte nicht angelegt werden, da Aufschlagwasser in genügender Menge nicht vorhanden war. Die Dampfmaschine sollte die Rettung bringen, und sie hat es, wie in so unendlich vielen anderen Fällen, auch getan. Bückling baute zuerst ein Modell, das befriedigend arbeitete, und entwarf alsdann den Plan für die Wasserhaltungsmaschine.

Da Spezialfabriken selbstverständlich nicht vorhanden waren, wurden zur Herstellung der Einzelteile alle Gebiete Preußens herangezogen.

Den Dampfzylinder aus Bronze, der einen Durchmesser von 73,2 Zentimetern hatte und 3 Meter lang war, goß das königliche Gießhaus in Berlin, und er wurde dort auch „aus dem Kern gebohrt und inwendig sehr sauber poliert". Weitere Gußteile stammen aus Zehdenick in der Mark Brandenburg. Die Kolbenstange und andere größere Schmiedeteile lieferte ein oberschlesischer Eisenhammer. Der königliche Kupferhammer bei Eberswalde stellte den Dampfkessel her. Dieser erhielt einen Durchmesser von 2,6 Metern und war 2,2 Meter hoch. Die Pumpen wurden zu Ilsenburg und Mägdesprung im Harz gefertigt. Den hölzernen Balancier setzte man auf dem Schacht selbst zusammen.




348. Schnitt durch einen Zylinder mit Muschelschieber

Am 23. August 1785 wurde die Maschine in Betrieb genommen. Es war eine einfach wirkende Wattsche Niederdruckmaschine. Die Dampfverteilung erfolgte durch Ventile, die nach alter Art durch einen am Balancier hängenden Steuerbaum bewegt wurden. Das Gewicht des Pumpengestänges wurde mittels eines Hilfsbalanciers und des darauf sitzenden Gegengewichts so ausgeglichen, daß es gerade noch imstande war, den Dampfkolben hochzuheben.

Die Maschine arbeitete zunächst wenig zufriedenstellend. Der Kessel brannte durch, weil sich „daran ein festes Gebirge, wohl an die 20 Zoll (52,3 Zentimeter) hoch", also Kesselstein in Masse, abgelagert hatte. Nachdem dieser Schaden beseitigt war, stellte es sich heraus, daß die Kraft zur Bewältigung des Wassers nicht genügte. Bückling mußte noch einmal nach England fahren und von dort einen größeren Zylinder mitbringen. Nach dessen Einbau ging dann alles gut, und es wird berichtet: „Die Maschine hebet in einer Minute 18 mal und gießet auf jeden Hub 3 Kubikfuß Wasser. Die Kraft derselben ist der Kraft von 108 Pferden gleich." Auf Tafel XII sind die Mauern, auf denen die Drehlager der beiden Balanciers ruhen, der besseren Übersicht wegen fortgelassen.

Dieser ersten von Deutschen in Deutschland erbauten Dampfmaschine hat der „Verein Deutscher Ingenieure" hundert Jahre nach dem Beginn ihrer Tätigkeit zu Hettstedt ein Denkmal errichtet, das aus einem Granitblock mit zwei Bronzeplatten besteht. Darauf ist zu lesen: „Am 23. August kam an dieser Stelle — dem König Friedrich-Schacht — zum erstenmal eine aus deutschem Material und von deutschen Arbeitern hergestellte Feuermaschine in Betrieb zu dauernder gewerblicher Benutzung."

Friedrich der Große war eifrig bemüht, in Oberschlesien, dem äußersten Zipfel der neuerworbenen Provinz, den Bergbau und das Hüttenwesen zu entwickeln. Er wurde hierbei von dem Minister von Heinitz und dem Freiherrn von Reden unterstützt, der 1780 die Ernennung zum Direktor des oberschlesischen Bergbaus erhielt. Reden hat hier eine höchst fruchtbare Tätigkeit entfaltet. 1786 schrieb er: „Ich freue mich im voraus der Zeiten, wo belebte Industrie, schnellere Zirkulation und Kultur diesen ungeachteten Winkel zur Perle der preußischen Krone erheben, und dessen Bewohner aus armen gedrückten Sklaven zu gebildeten und glücklichen Menschen umschaffen werden." Das ist in der Tat erreicht worden. Wer noch nicht davon überzeugt war, kann allein aus diesen Worten Redens lernen, daß die gesamte industrielle Entwicklung Oberschlesiens deutscher Arbeit zu verdanken ist. Der gewerbliche Aufstieg der Provinz hat erst begonnen, nachdem sie in preußischen Besitz gelangt war.

Auch in Oberschlesien brauchte man bald für die Wasserhaltung in den Gruben Dampfmaschinen. Die erste sollte bei einem neu aufgeschlossenen Schacht in der Nähe von Tarnowitz aufgestellt werden. Sie wurde nach langen Verhandlungen bei dem englischen Maschinenbauer Samuel Homfray bestellt.

Dieser, der wegen des Patentschutzes Watts Erfindungen nicht benutzen konnte, lieferte eine atmosphärische Maschine. Die sollte, wie er in geschickten Darlegungen behauptete, weit besser sein. „Herr Boulton kann zwar", so schrieb er, „mit der Maschine, für die er ein Patent besitzt, 10 Pfund heben,

aber die Unkosten einer solchen Maschine sind so groß, und das, was man an ihn zahlen muß, ist so viel, daß niemand dergleichen errichtet, es müßte denn der Brennstoff über die Maßen teuer sein, wie z. B. in Cornwall und in London. Die Reparaturkosten bei einer Boultonschen Maschine kommen sehr hoch, und haben Sie nicht einen sehr guten Maschinenmann, der die Maschine durch und durch kennt, so hört die Plage, die Sie damit haben, gar nicht auf. Eine Maschine nach der alten Art, jedoch mit den verschiedenen Verbesserungen, die jetzt daran gemacht worden sind, ist, wenn der Brennstoff nicht gar zu teuer, weit vorzuziehen, und ich versichere Sie, daß selbst, wenn Herr Boulton mir erlauben wollte, eine Maschine nach seiner Art zu errichten, ohne daß ich ihm dafür das zu zahlen hätte, was er gewöhnlich nimmt, ich mich dennoch sehr bedenken würde."

Daß Homfray, wie vorher auch Bückling, den Namen Boultons und nicht Watts nennt, kommt daher, daß der erste als Unternehmer damals in weiteren Kreisen bekannter war als der Erfinder.

Die Maschine von Tarnowitz wurde am 4. April 1788 in Betrieb genommen. Ihr Arbeiten ist vortrefflich in Eyths Roman „Der Schneider von Ulm" beschrieben, dessen Held nebst einem anderen Wanderburschen den weiten Weg in jene Gegend nicht scheute, nur um die „Dampfkunst" zu sehen, von der viele sagenhafte Berichte umgingen.

„Auf dem Weg nach dem Maschinenhaus", so heißt es bei Eyth, „hörten sie die dumpfen, geheimnisvollen Schläge des Ungetüms um jeden Schritt deutlicher. Vor dem Haus schien der Boden zu zittern, Ketten klirrten, Stangen rasselten; hinter dem Haus hörte man Wasser rauschen, als ob ein mächtiger Bach über Felsen stürzte. Potter (der englische Maschinenwärter) lachte, als er in die Gesichter seiner Begleiter leuchtete, die eine gewisse erwartungsvolle Bangigkeit nicht verbergen konnten.

„Es war dies verzeihlich genug. Als sie in den hohen, matt erhellten Raum eintraten, war es zunächst schwierig, irgend etwas zu unterscheiden. Ein finsteres, formloses Ding wie die Trommel einer riesigen Säule stand auf einem Untersatz aus rohbehauenen Quadern. Dies war der neue Zylinder, aus dem eine blinkende runde Stange emporschoß, um sodann wieder in seinem Inneren zu versinken. Die Stange hing an einer schweren Kette, welche hoch oben, fast am Dach des Gebäudes, von einem Arm aus wuchtigen Holzbalken in die Höhe gezogen wurde, der sich langsam und feierlich auf und ab bewegte, aber bei jedem Niedergang mit dröhnendem Lärm auf eine Unterlage aufschlug, die im Mauerwerk angebracht war. Hinter dem Steinpfeiler, der den Drehzapfen dieses wagebalkenartigen Doppelarms trug, hing, wieder an einer Kette, das gewaltige Pumpengestänge, das in der unergründlichen Tiefe einer schwarzen Schachtöffnung verschwand. Von den Armen des Schwingbaums — Balancier nannte ihn Berblinger, „beam", „Baum" hieß ihn der einfache Potter, der kein Deutsch-Französisch verstand — von seinen Armen vor und hinter dem Pfeiler hingen weitere Stangen herab, von denen die eine an wunderlich geformten Hebeln und Knaggen zog und drückte, die manchmal dem Gang der Stange folgten, dann wieder plötzlich, als ob sie ärgerlich wären, selbständige, unerwartete, schnappende Bewegungen machten. Die Stange auf der anderen Seite des Pfeilers saugte an einer kleinen Pumpe, die in einer Grube verdeckt stand und in heftigen Stößen dampfendes Wasser in eine Rinne warf, das gurgelnd durch ein Loch in der Mauer davonlief.

„Das also war die Feuermaschine. Neben ihr, in einen unförmigen Backsteinmantel eingemauert, stand der Dampfkessel, vor dessen feuersprühender Esse ein schweißtriefender, kohlschwarzer Mann hantierte. Wenn er die Feuertüre öffnete, um frische Kohlen auf die sausende Glut zu werfen, glühten der ganze Raum, die Hebel und Knaggen, die blinkende Kolbenstange und die schwarzen Ketten in flammrotem Licht, das wildbewegte, fast greifbare Schatten in die Ecken und Winkel des finsteren Gebäudes warf. Das Unheimlichste waren die Töne des Ungetüms: das knarrte und ächzte, knallte und krachte, zischte und sauste, seufzte und stöhnte, bald da, bald dort, als ob in jedem Winkel ein anderer Kobold säße. Alles aber übertönte der donnerähnliche Schlag in der Höhe, wenn der Schwingbaum auf seine Unterlage traf. Dem Schlag folgte eine fünf Sekunden lange feierliche Stille. Dann war es, als ob jemand auf dem Boden gegen ein Blech klopfte; langsam, widerwillig setzte der Schwingbaum sich wieder in Bewegung, unten im Schacht räusperten sich die Pumpen und das grause Spiel, das Achzen und Stöhnen, das Sausen und Zischen, das Knallen und Schlagen, begann aufs neue.

„Wer erinnert sich an all das, wenn er in den spiegelglatten Salon tritt, in dem heutzutage eine Dampfmaschine von tausend Pferdestärken mit einem kaum hörbaren Seufzen, wenn nicht ganz lautlos, ihre Riesenarbeit verrichtet? So aber sah und hörte es sich an, als die Dampfmaschine in ihrer Kindheit die Glieder zu regen begann. "

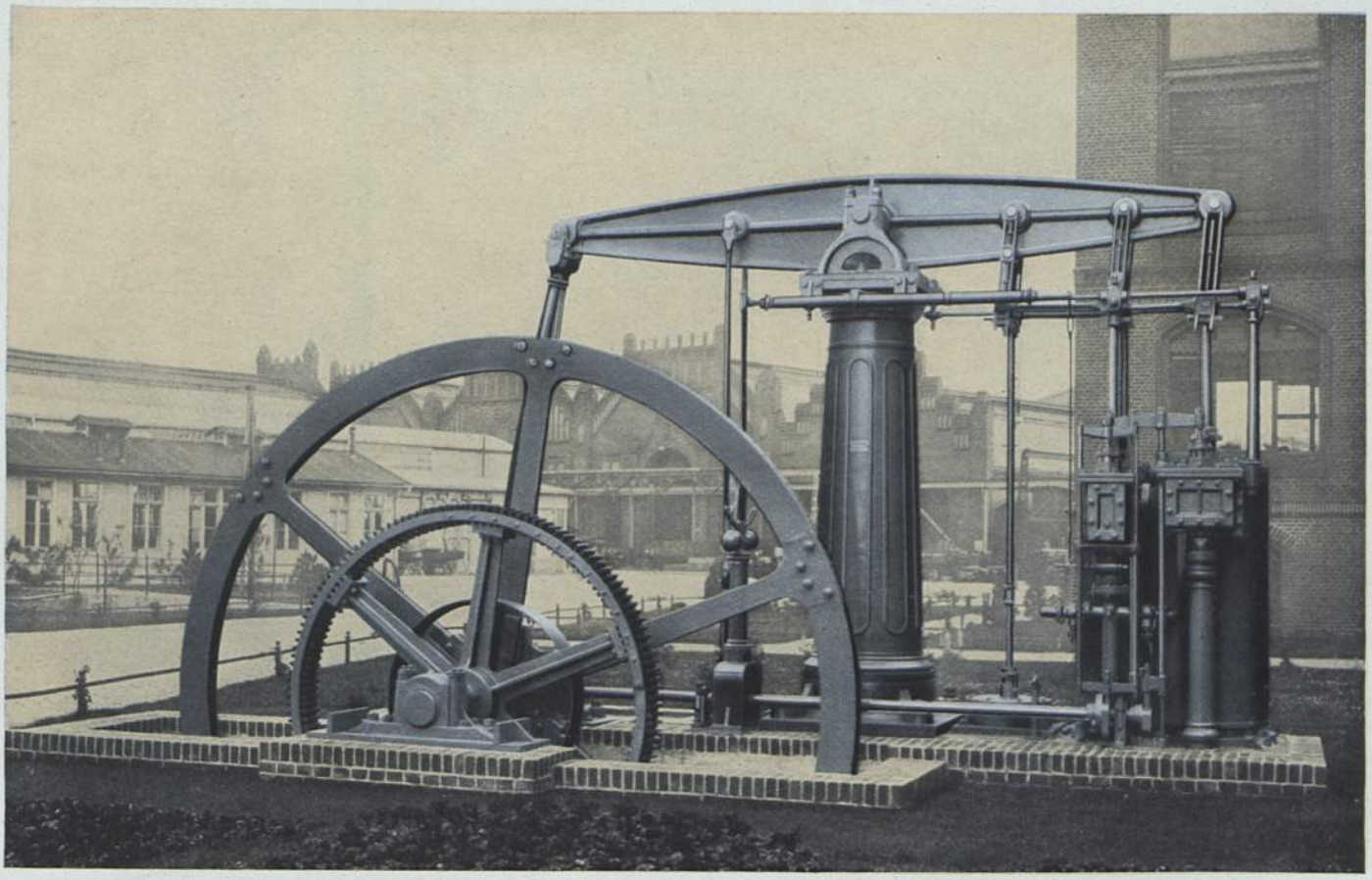
Als im Jahre 1790 der Herzog Karl August von Sachsen-Weimar im Lager zu Reichenbach in Schlesien weilte, machte er, begleitet von seinem Minister Goethe, einen Abstecher nach Oberschlesien, um den dort sich entwickelnden Bergbau kennenzulernen. Sie kamen hierbei auch nach Tarnowitz und sahen hier die Dampfmaschine. Diese blieb die einzige, die Goethe je zu Gesicht gekommen ist. Sie hat ihn nicht zu einem Dichtwerk angeregt, er schrieb nur in das Fremdenbuch die folgenden Zeilen:

Fern von gebildeten Menschen, am Ende des Reichs, wer hilft euch,
Schätze finden und sie glücklich zu bringen ans Licht?
Nur Verstand und Redlichkeit helfen; es führen die beiden
Schlüssel zu jeglichem Schatz, welchen die Erde verwahrt.

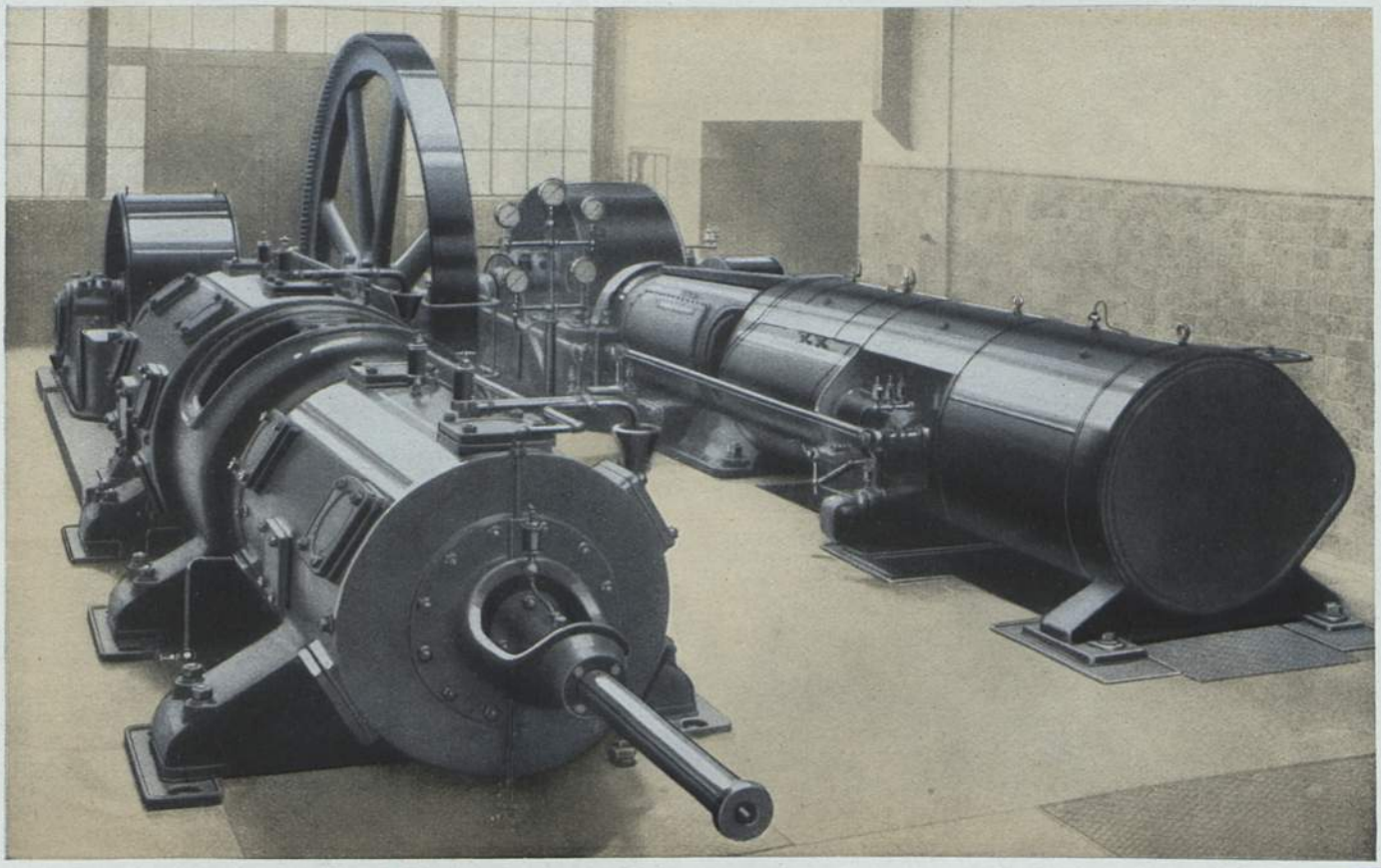
Die Wendung „fern von gebildeten Menschen" haben die Oberschlesier Goethe sehr übelgenommen und ihm in Druckschriften nachzuweisen gesucht, daß es auch unter ihnen wohlgeschulte Leute gäbe.

Die Maschine von Tarnowitz erhielt bald zahlreiche Nachfolger. Friedrich Holtzhausen, der in Hettstedt aufmerksam gelernt hatte, wurde 1792 als Feuermaschinen-Meister nach Oberschlesien berufen, wo er unter den schwierigsten Verhältnissen mit den einfachsten, rohesten Werkzeugen und gänzlich ungeübten Leuten eine Dampfmaschinen-Industrie ins Leben rief. Erzeugnisse dieser, welche von hier nach Westfalen geliefert wurden, gaben den Anstoß, daß man sich auch dort mit dem neuen Gerät zu beschäftigen begann.

Es ist insbesondere Franz Dinnendahl gewesen, der in jener Gegend die Errichtung von Dampfmaschinen unternahm. Er hatte sich vom Schweinehirten zum Kunstmeister emporgearbeitet und erzählte später, daß in dem Land, wo heute der Herzschlag deutscher industrieller Betätigung am lebhaftesten pocht, damals „nicht ein Schmied zu finden war, der imstande gewesen wäre, eine ordentliche Schraube zu machen, geschweige denn andere zur Maschine gehörige Schmiedeteile, wie Steuerung, Zylinderstange, Kesselarbeit



1. Betriebsdampfmaschine mit Balancier, erbaut im Jahre 1859 für 35 Pferdestärken bei 4 Atmosphären Druck. Die Maschine war bis 1913 in Betrieb und zuletzt mit 135 Pferdestärken belastet. Jetzt ist sie als Denkmal auf dem Fabrikhof von A. Borsig in Berlin-Tegel aufgestellt



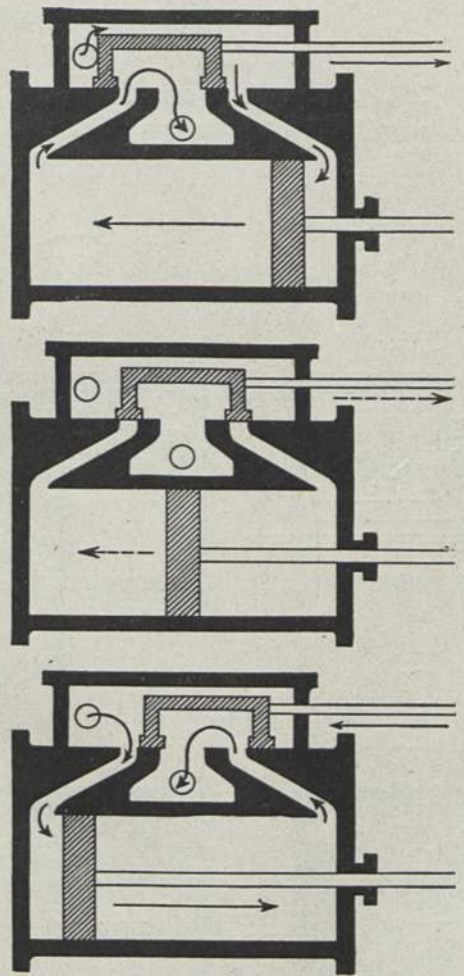
2. Moderne Schmidt-Borsig-Höchstdruck-Dampfmaschine in der Zentrale von A. Borsig, Berlin-Tegel, direkt gekuppelt mit einem Luftkompressor
Leistung: 800 Pferdestärken bei 60 Atmosphären Betriebsdruck und 10 Atmosphären Gegendruck

## Dampfmaschinen einst und jetzt

POLITECHNIKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA WROCŁAWSKA

usw., hätte anfertigen können oder Bohren und Drechseln verstanden hätte. Schreiner- und Zimmermannsarbeiten verstand ich selbst; aber nun mußte ich auch Schmiedearbeiten machen, ohne sie jemals gelernt zu haben. Indessen schmiedete ich fast die ganze Maschine mit eigener Hand, selbst den Kessel, so daß ich ein bis eineinhalb Jahre fast nichts anderes als Schmiedearbeiten verfertigte, und ersetzte also den Mangel an Arbeitern derart selbst."

Es handelte sich zunächst ausschließlich um Wasserhaltungsmaschinen, solche also, die nur ein hin und her gehendes Gestänge zu bedienen hatten. Die erste Dampfmaschine mit Drehbewegung auf deutschem Boden wurde zu Berlin in der Königlichen Porzellan-Manufaktur aufgestellt. Dies geschah im Jahre 1800 durch den Engländer Baildon, der sich auf dem Weg nach Oberschlesien befand, wohin er zur Einrichtung der Königshütte berufen war. Baildon ist dann in Oberschlesien geblieben. Noch heute besteht in der Nähe von Kattowitz ein Feinstahlwerk, das seinen Namen trägt — falls die Firma nicht inzwischen von den Polen geändert worden ist.



349. Wirkungsweise des Muschelschiebers

Die Berliner Maschine hat bis 1824 in angestrengtem Dienst gestanden und wurde dann nach Breslau zum Wasserheben verkauft. Sie hat eine kleine Vorgeschichte, die für die damalige Zeit kennzeichnend ist.

Bereits im Jahre 1788 war der Plan entstanden, in der Berliner Porzellan-Manufaktur den Dampfbetrieb einzuführen. Als das aber in der Öffentlichkeit bekannt wurde, erhob sich das übliche Angstgeschrei. Ein Freiherr von der Reck machte sich zum Sprecher der bedrängten Gemüter. Nachdem er seiner Genugtuung darüber Ausdruck gegeben hatte, daß sich die Steinkohlenfeuerung nicht in den Wohnungen habe einführen lassen, fuhr er fort: „Jetzt soll eine Tag und Nacht durch Steinkohlen betriebene Dampfmaschine angelegt werden; und wer vermag vorauszusehen, was der Geist der Erfindungen und der sich täglich häufenden Entdeckungen und Feuerarbeiten noch an die Hand geben möchte..... Ich bin es meinem Eigentumsrecht, der Erhaltung der Gesundheit meiner Familie schuldig, alles aufzuwenden, um dieses tötende Ungemach von meinem Hause zu entfernen." Es ist Reck doch nicht völlig gelungen, den Drachen Dampfmaschine zu töten, aber er hat ihn doch zwölf Jahre länger in seiner englischen Wundergrotte zurückgehalten.

Im Jahre 1819 begründete Friedrich Harkort zusammen mit Friedrich Kamp auf der alten Burg Wetter die erste Maschinenfabrik im Ruhrgebiet. Bereits im folgenden Jahr wurden dort Dampfmaschinen hergestellt. Alte Entwürfe der Mechanischen Werkstätte Harkort & Co. sind von Matschoß vor wenigen Jahren in abgelegenen Räumen der Burg aufgefunden worden, als er die Geschichte der Deutschen Maschinenfabrik (Demag) in Duisburg schrieb, deren Wurzel die Fabrik in Wetter gewesen ist. Bild 318 ist diesem Buch entnommen.

Ein Hauptort für die Entwicklung des Dampfmaschinenbaus in Deutschland ist Berlin gewesen. Hier gründete Georg Christian Freund 1816 auf einem Grundstück in der Mauerstraße eine Maschinenfabrik. Nach dem schon 1819 erfolgten Tod des ersten Inhabers wurde sie mit gleichem Erfolg von dem damals erst achtzehnjährigen Bruder des Verstorbenen, Julius Conrad Freund, weitergeführt. Noch heute besteht die Anstalt in der Franklinstraße zu Charlottenburg unter dem Namen „Berliner Actiengesellschaft für Eisengießerei und Maschinenfabrikation (früher J. C. Freund & Co.)" fort. Unter dem Beistand von Beuth (Bild 326), der als Leiter der technischen Deputation für Gewerbe die industrielle Betätigung in den preußischen Landen außerordentlich gefördert hat, entstand dann 1821 in der Chausseestraße die Maschinenfabrik von Egells, die zu einer wichtigen Pflanzstätte für den deutschen Maschinenbau geworden ist.

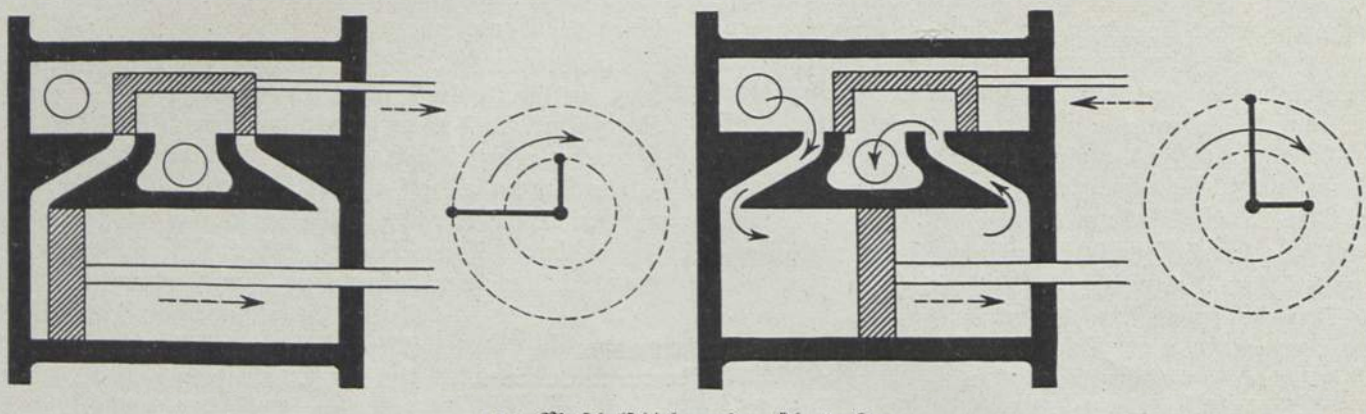
Bild 327 veranschaulicht eine dort erbaute „Bügelmaschine", die ein wichtiges Glied in der Kette der Entwicklung von der Balancier- zur modernen Bauart gewesen ist. Die Kolbenstange trägt ein Querhaupt, das in einer Geradführung gleitet und einen Bügel hinab und hinauf führt. Dieser kann eine schwingende Bewegung ausführen. Von seinen Enden gehen zwei Schubstangen nach unten, wo sie einen zweiten Bügel bewegen, an dem die Kurbel befestigt ist.

Bei Egells lernten Wöhlert, Hoppe und Borsig, die sich später gleichfalls in Berlin niederließen.

Am erfolgreichsten wirkte Friedrich August Borsig (Bild 328). Er war 1804 in Breslau als der Sohn eines Zimmermanns geboren und hatte dieses Handwerk auch selbst erlernt. Nachdem er das von Beuth gegründete Gewerbe-Institut in Berlin besucht hatte, trat er bei Egells ein und wurde dort bald Faktor der Gießerei und der Werkstätte. 1836 begann er eine eigene Fabrikation in einer Bretterbude dicht neben der Egellsschen Fabrik am Oranienburger Tor. Die Arbeitsmaschinen wurden zunächst durch eine „Roßkunst" mit zwei Pferden angetrieben.

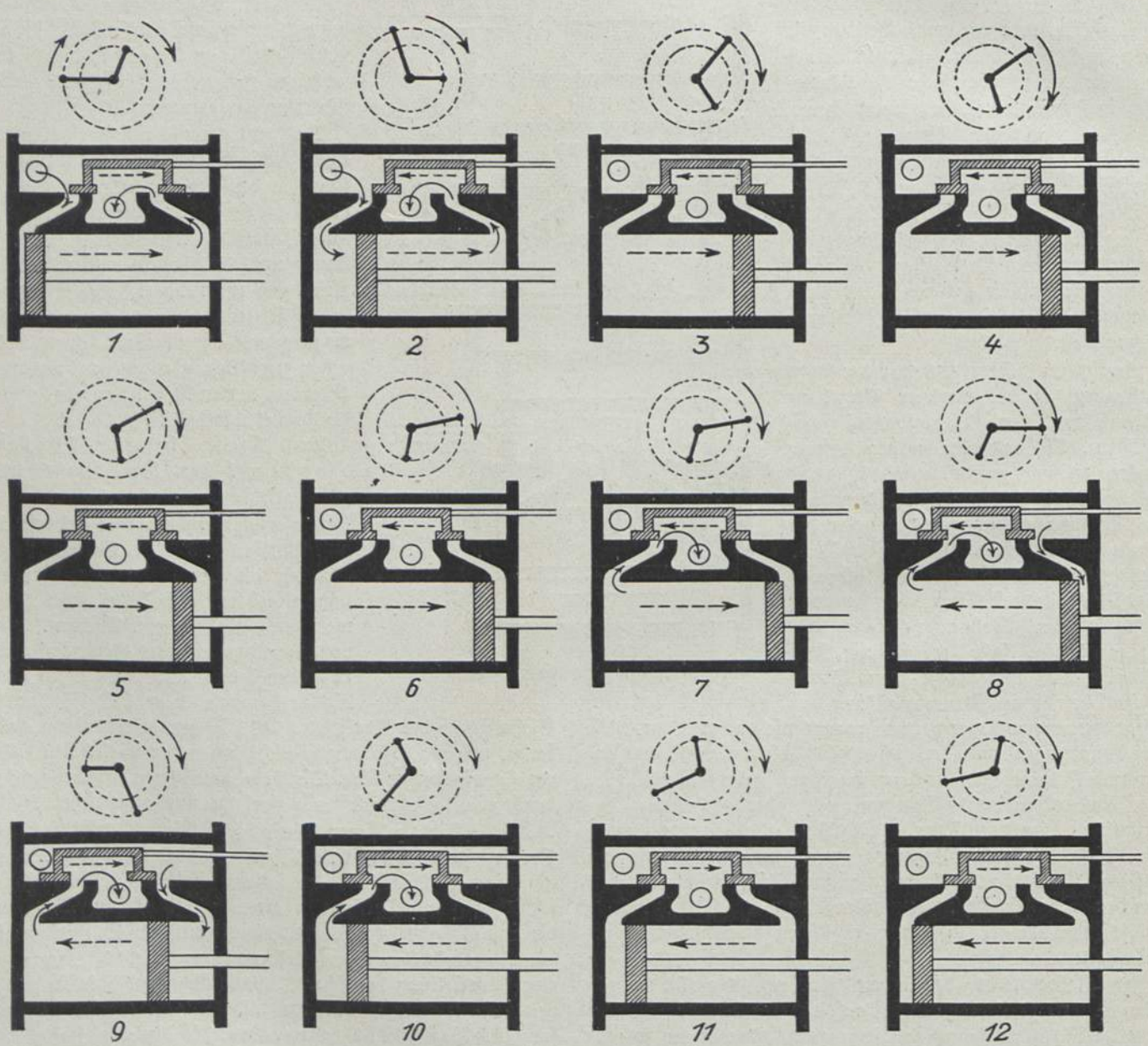
Die ersten größeren Aufträge erhielt Borsig von der Berlin—Potsdamer Eisenbahn. Zu den ältesten Dampfmaschinen-Anlagen, die er gebaut hat, gehört die „maurische" Pumpmaschine für die Wasserkunst in Sanssouci, die auf Bild 215 (Seite 115) dargestellt ist. Er widmete sich dann insbesondere dem Lokomotivbau. 1844 erregte auf einer Ausstellung deutscher Gewerbe-Erzeugnisse in Berlin die von ihm erbaute Lokomotive „Beuth" allgemeine Aufmerksamkeit. Von den 69 Lokomotiven, die bis zum Jahre 1854 von den preußischen Eisenbahn-Gesellschaften in Auftrag gegeben wurden, sind 67 aus der Borsigschen Werkstätte hervorgegangen.

1847 legte der Fabrikherr in Moabit ein großes Eisenwerk (Bild 329) an und erwarb 1854 in Oberschlesien eigene Kohlen-



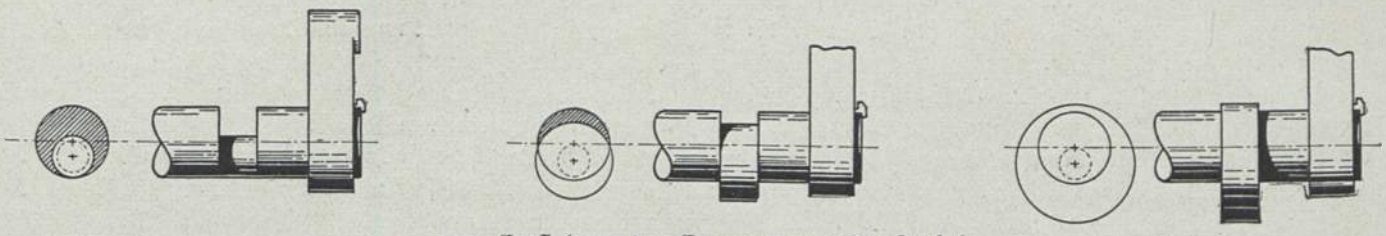
350. Muschelschieber ohne Überdeckung

für Volldruckmaschinen. Die Voreilung der Schieberkurbel entspricht genau einer Viertelumdrehung der Kurbelwelle. Die Schieberkurbel ist um 90 Grad gegen die Stellung der Hauptkurbel versetzt

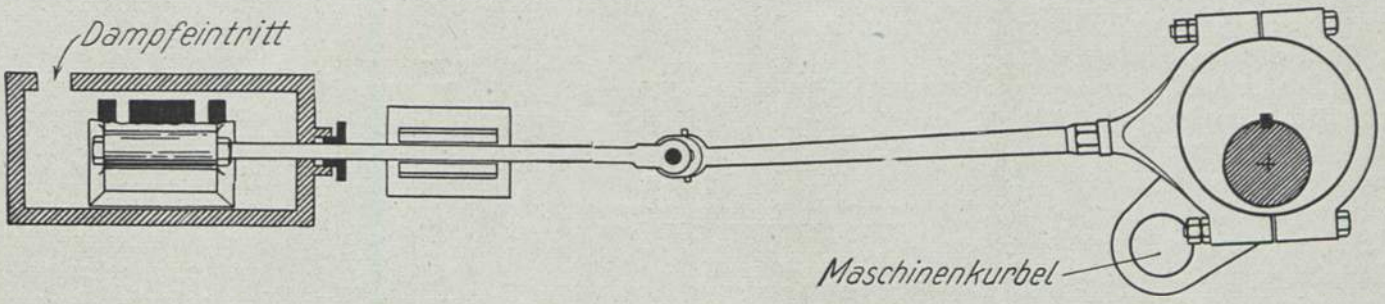



351. Wirkungsweise des Muschelschiebers mit Überdeckung

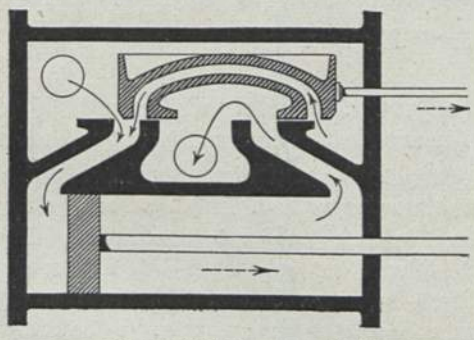
Die Schieberkurbel ist um mehr als 90 Grad gegen die Stellung der Hauptkurbel versetzt. Die Voreilung der Schieberkurbel führt mit Hilfe der inneren und äußeren Überdeckung jeder der beiden Schieberseiten Expansion und Kompression herbei. Die Bilderserie läßt das Zusammenwirken beider Zylinderseiten deutlich erkennen



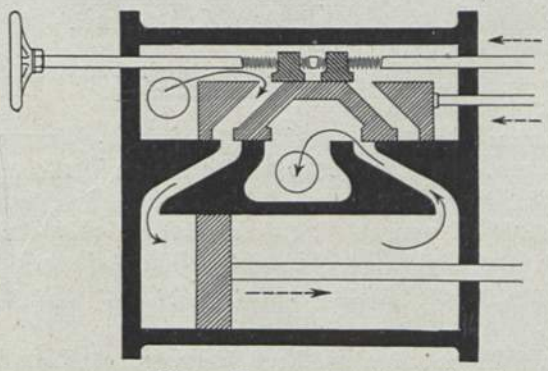
352. Entstehung des Exzenters aus der Kurbel



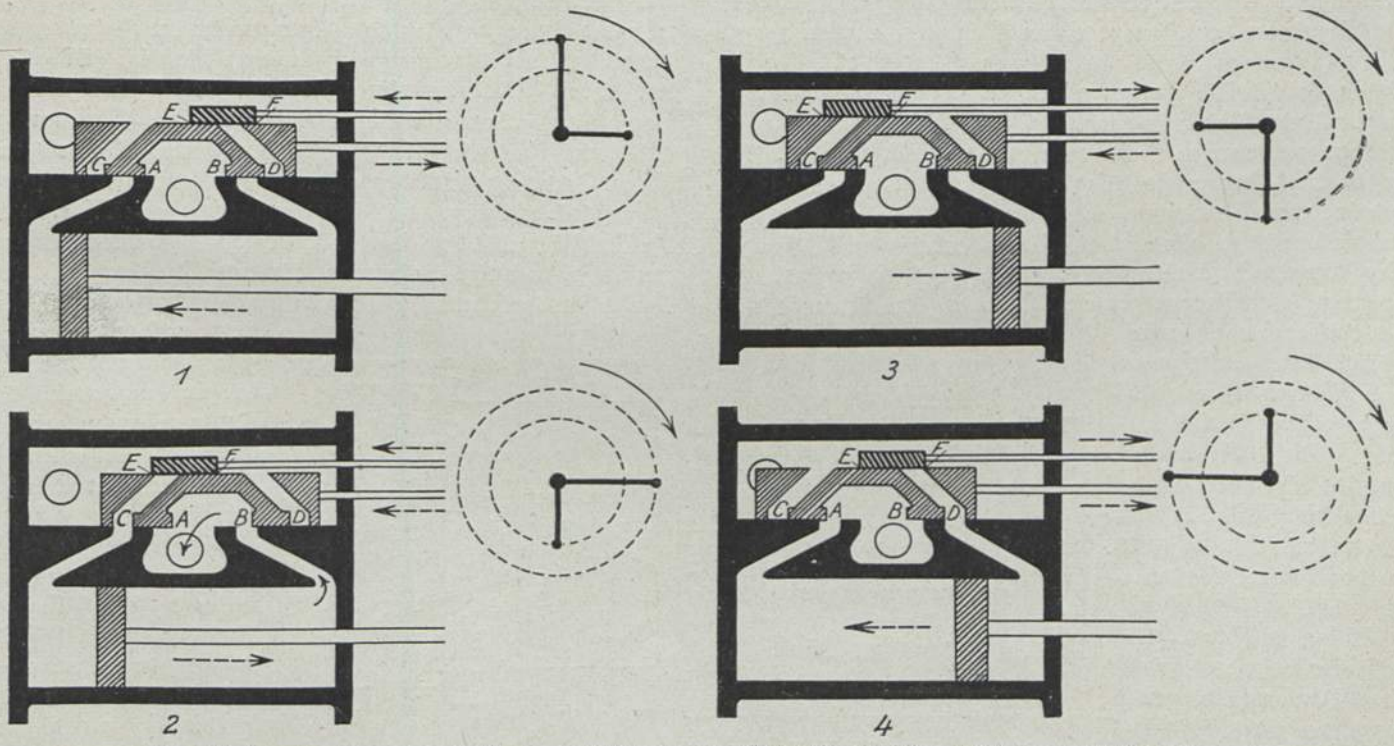

353. Muschelschieber mit Exzenterantrieb



354. Muschelschieber von Trick mit Dampfkanal in der Muschel



355. Meyer-Steuerung mit geteiltem Expansionsschieber




356. Wirkungsweise des zweiteiligen, aus Grund- und Expansionsschieber bestehenden Muschelschiebers

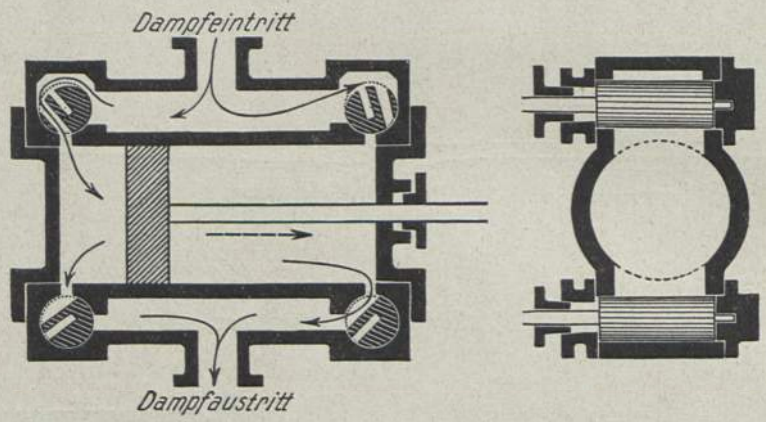
gruben und Hochofen-Anlagen. Das heutige sehr große Borsigwerk gehört zu den wenigen oberschlesischen Stätten, die in deutschem Besitz geblieben sind.

Als Borsig in demselben Jahr plötzlich starb, übernahm sein Sohn Albert die Leitung. Heute steht die große, nach Tegel bei Berlin verlegte Maschinenbauanstalt, die zu den berühmtesten in Deutschland gehört, unter der Leitung der Enkel Ernst und Conrad von Borsig. Auf Tafel XIII,1 ist eine der ältesten selbsterbauten Betriebsmaschinen dargestellt, die als ein prächtiges Denkmal heute auf dem Fabrikhof in Tegel steht.

Ein Schüler Borsigs war Louis Schwartzkopff, der gleichfalls am Gewerbe-Institut in Berlin studiert hatte und später Maschinenmeister an der Magdeburger Bahn war. Auch er wählte 1852 für die Gründung einer eigenen Maschinenfabrik die Chausseestraße, die ja auch heute noch eine von reichem industriellen Leben erfüllte Gegend durchzieht. Neben Betriebsdampfmaschinen baute Schwartzkopff Dampfhämmer und Lokomotiven, von denen 1879 bereits die tausendste abgeliefert wurde. Noch heute unterhält die Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft vormals L. Schwartzkopff an der alten Stätte einen Fabrikbetrieb. Die Hauptarbeitsstätte befindet sich aber in dem Vorort Wildau in der Nähe von Königswusterhausen.

Unter den Männern, die im Reich Pioniere des Dampfmaschinenbaus waren, seien genannt F. Schichau, der sich 1837 in Elbing niederließ, J. A. Maffei, der 1841 in München die ersten Lokomotiven baute, Georg Egestorff, der Begründer der Hannoverschen Maschinenbau-Aktiengesellschaft (Hanomag), und Karl Anton Henschel, der die Firma Henschel & Sohn in Kassel zu großer Bedeutung emporführte. Balancier-Maschinen sind noch in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts hergestellt worden. Indessen trieb der große Platzbedarf dieser Bauart zu einer gedrängteren Anordnung, die nun auch infolge der Fortentwicklung des allgemeinen Maschinenbaus möglich war. Die Einzelteile konnten sehr genau und daher mit geringeren Abmessungen hergestellt werden. Die Lenkerführung der Kolbenstange machte völlig der kräftigeren und sicheren Geradführung zwischen Gleitbacken Platz. Diese ist bereits an der Egellsschen Bügelmaschine (Bild 327) zu finden, wir sehen sie auch an der Bockmaschine auf Bild 331.

Es zeigte sich dann, daß eine besonders günstige Bauform entstand, wenn der oder die Zylinder in einem kräftigen Rahmengestell hoch angebracht und die Kurbelwellen senkrecht darunter in dem eisernen Fundamenttisch gelagert wurden. So entstand die stehende Maschine, die auch Hammermaschine (Bild 330) heißt, weil ihr Vorbild der Dampfhammer von Nasmyth gewesen ist. Sie wird noch heute viel angewendet, insbesondere da, wo der Raum sehr beschränkt ist. Das ist auf Schiffen immer der Fall, weshalb die Hammerbauart dort fast allein im Gebrauch ist, soweit nicht Turbinen angewendet werden. (Siehe auch Band III, Abschnitt 17, insbesondere das Bild 247 auf Seite 170.)

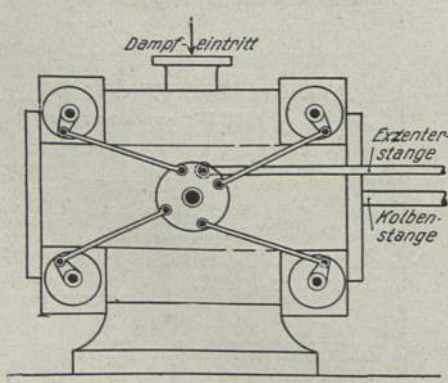



357. Schnitt durch den Zylinder einer Corliß-Maschine

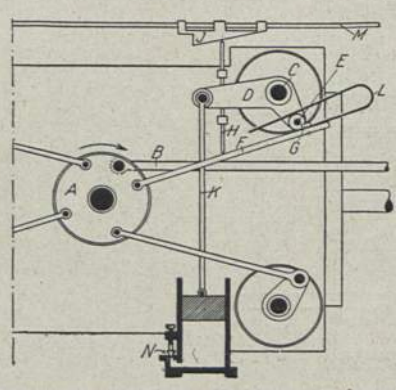
Der Wunsch, die Maschinen möglichst einfach durchzubilden, führte dann zur Anwendung schwingender oder oszillierender Zylinder. Murdock hatte bereits 1785 eine solche Anordnung (Bild 333) angegeben und ein Modell aus Holz gefertigt, das im Kensington-Museum zu London aufbewahrt wird. Kennzeichnend für die Bauart ist, daß die Kolbenstange zugleich die Schubstange bildet und der Zylinder sich in Drehzapfen hin und her bewegt. Schwierig ist hierbei die Zuführung des Dampfs, der nur durch einen der Schwingzapfen eintreten kann.

Alban (Seite 196) hat sich lebhaft mit der Entwicklung dieser Maschinengattung beschäftigt. Er hängte den Zylinder in einem rechteckigen Rahmen auf und brachte die Schwingzapfen oben an, während sie bis dahin sich immer in der Mitte des Zylinders befunden hatten. Hierdurch erreichte er eine Verkleinerung der Zapfenbewegung, so daß die Lager der von dem durchgehenden Dampf erhitzten Zapfen weniger beansprucht wurden. Die pendelartige Aufhängung des Zylinders erleichterte auch die Massenbeschleunigung bei jeder Umkehr der Bewegung, da das Eigengewicht der Zylindermasse hierbei mithalf. Eine große oszillierende Maschine (Bild 332) von Alban bildet ein Hauptschaustück der schönen Sammlung alter Dampfmaschinen im Deutschen Museum zu München. Das Gestell hat die Form eines Tempels und ist in dorischem Stil gehalten. Der Konstrukteur sparte bei der Ausführung des Rahmens nicht an Eisen, denn die Maschine sollte nach seinem Willen „auch in ihrem Äußeren ihre hohe, wichtige Bedeutung für den Menschen und sein Wirken ausdrücken". Maschinen mit schwingenden Zylindern werden in neuerer Zeit nur noch hier und da für den Antrieb von Raddampfern ausgeführt, deren Kurbelwellen so hoch über dem Schiffsboden liegen, daß die Hammerbauart nicht angewendet werden kann, während eine liegende Maschine zu viel Platz wegnehmen würde.

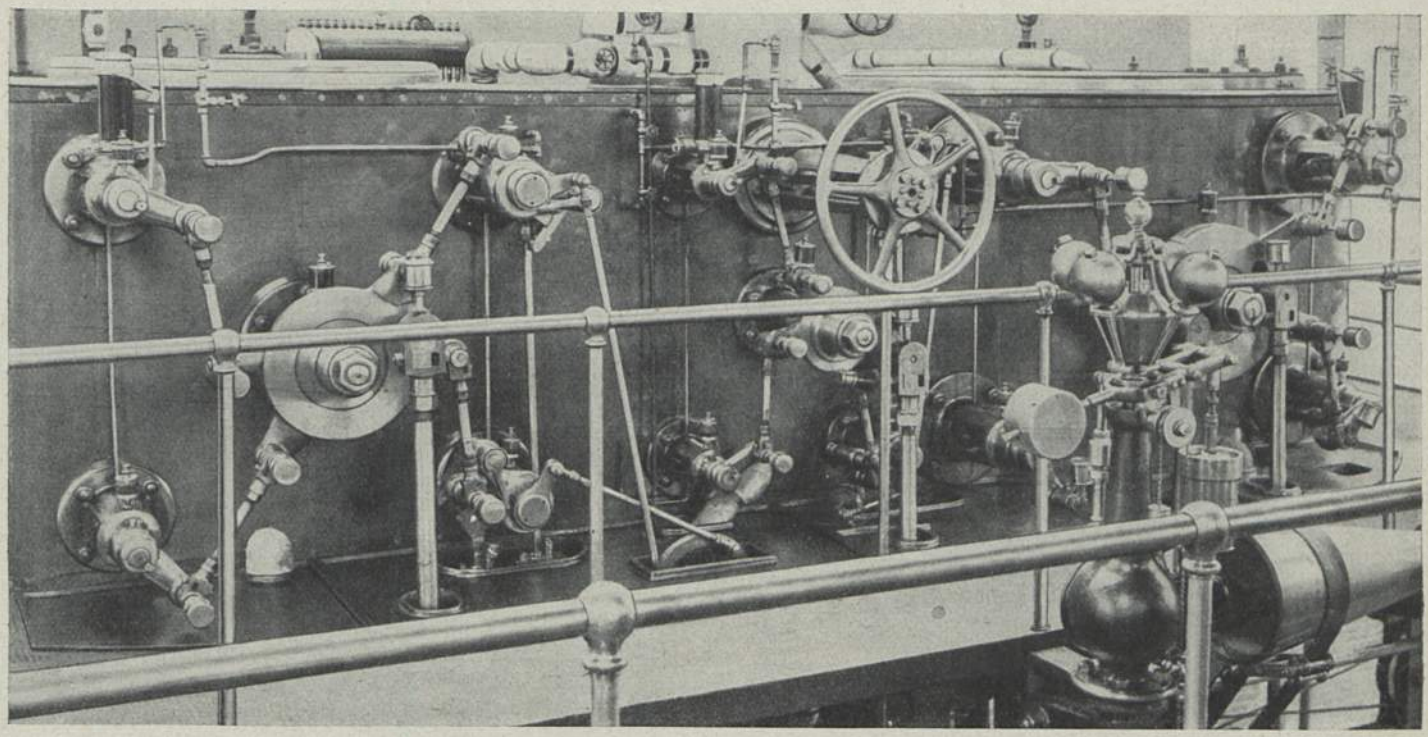
Im allgemeinen aber ist die liegende Bauart heute weitaus am meisten verbreitet. Sie ist bequem




358a. Antrieb der Corliß-Steuerung mittels Exzenterstange



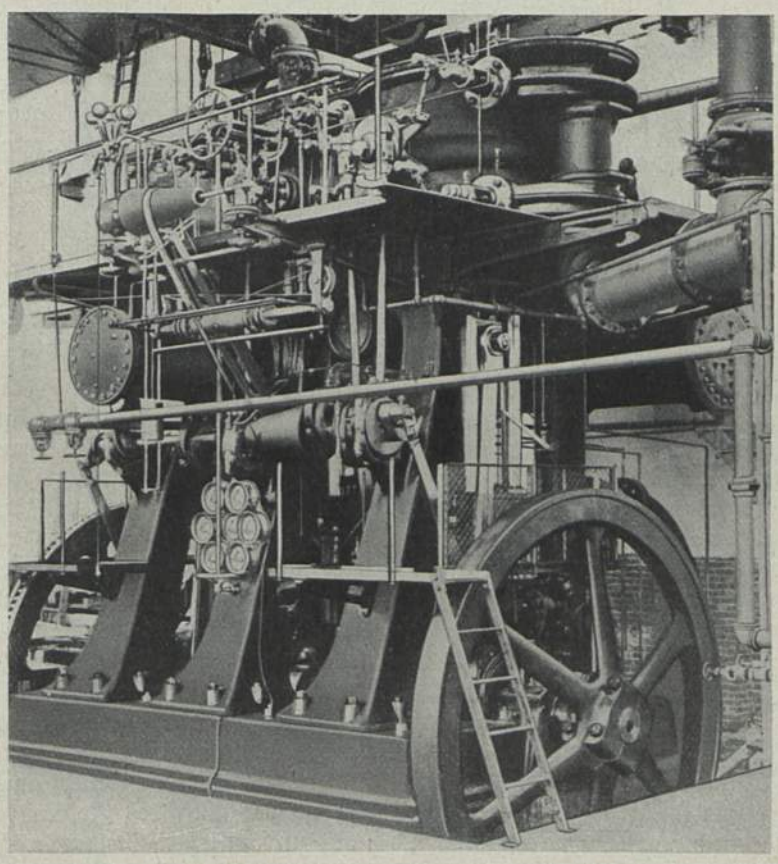

358b. Wirkungsweise der Steuerung von Corliß



359. Corliß-Steuerung

zu bedienen und gewährt den Vorteil, daß alle ihre Teile ausgezeichnet auf der breiten Grundplatte befestigt werden können. Infolge der kräftigen Unterstützung lassen sich Durchbiegungen und Erzitterungen trefflich verhindern. Die Einführung dieser ausgezeichneten Maschine begegnete aber harten Widerständen, denn seit den Anfängen kannte man in den Betrieben nur stehende Zylinder und konnte sich liegende gar nicht vorstellen. Das Beharrungsvermögen des menschlichen Geistes, das dem kühnen Fortschritt fast stets entgegentritt, offenbarte sich auch hier. Die Leute zeigten sich unwillig dem gegenüber, der das gewohnte Bild der Dampfmaschine umändern wollte.

Nicht ganz unberechtigt aber war die Befürchtung, daß der Kolben die Wandung eines liegenden Zylinders einseitig abnutzen würde. Ruht er doch mit der unteren Hälfte darauf, während bei stehender Anordnung gleichmäßige Anlage stattfindet. Es sind viele verwickelte Anordnungen erdacht worden, um die einseitige Abnutzung des liegenden Zylinders durch den Kolben zu vermeiden, deren Folgen aber bei weitem nicht so arg sind, wie man anfangs glaubte. Wir werden noch hören, wie heute durch Verlängerung der Kolbenstange nach hinten, ihre Lagerung in einer zweiten Stopfbüchse und auch durch eine besondere Formung der Kolbenstange die Schwierigkeit völlig überwunden ist.



360. Dreifach-Expansionsmaschine mit Corliß-Steuerung

Der Gegenwart erscheint jede andere Bauart der Dampfmaschine als die liegende eine Merkwürdigkeit. In dieser Form ist die Kolben-Dampfmaschine der tatkräftigste Helfer bei der neuzeitlichen technischen Arbeit geworden. Die Höhe des Dampfdrucks im Zylinder schwankt im allgemeinen zwischen 6 und 20 Atmosphären. Da aber mit steigendem Dampfdruck das Verhältnis der Arbeitsfähigkeit des Dampfes zur aufzuwendenden Kohlenmenge ein günstigeres und so die mit Hochdruck betriebene Dampfmaschine wärmetechnisch besser arbeitet, so gehen die Bemühungen der Konstrukteure dahin, den Dampfdruck auf 100 und noch mehr Atmosphären zu steigern, seitdem es gelungen ist, Rohrleitungen, Stopfbüchsen, Armaturen usw. herzustellen, die diesem Drucke und den damit verbundenen Dampftemperaturen standhalten. Unsere Zeit ist Zeugin dieser Bestrebungen. Wir haben bereits Dampfmaschinen von

60 Atmosphären im Betrieb und von 100 Atmosphären im Bau. Und so sei zum Schluß unserer geschichtlichen Betrachtung einer solchen Höchstdruck-Kolbendampfmaschine von 60 Atmosphären Betriebsdruck Erwähnung getan, die von der A. Borsig G. m. b. H. in Berlin-Tegel hergestellt wurde und seit zwei Jahren in der Zentrale dieser Firma im Betrieb ist (Tafel XIII,2). Vorn sehen wir die Dampfmaschine und im Hintergrund den von ihr angetriebenen Luft-Kompressor. Der Dampf expandiert hier von 60 auf 10 Atmosphären. Dieser Abdampf von 10 Atmosphären wird in einen Dampfspeicher geschickt, um von dort aus Dampfhämmer und andere Maschinen niederen Druckes zu speisen. Fast sämtliche Kolbendampfmaschinen sind dazu bestimmt, drehende Bewegung herzugeben, nur in seltenen Fällen, wie beim Antrieb von Pumpen in großen Wasserwerken und von Kompressoren für Luft oder irgendein anderes Gas wird hin und her gehende Bewegung abgenommen.

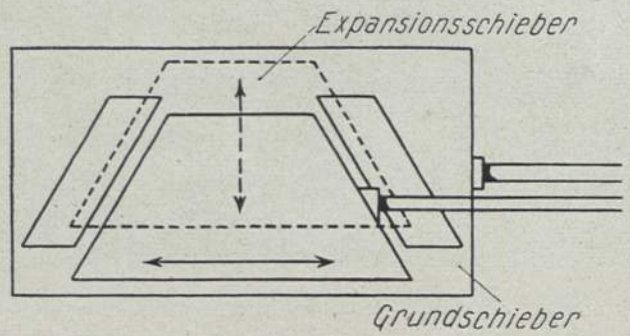
*

Bild 337 veranschaulicht den grundsätzlichen Bau einer neuzeitlichen doppeltwirkenden Dampfmaschine mit Auspuff.

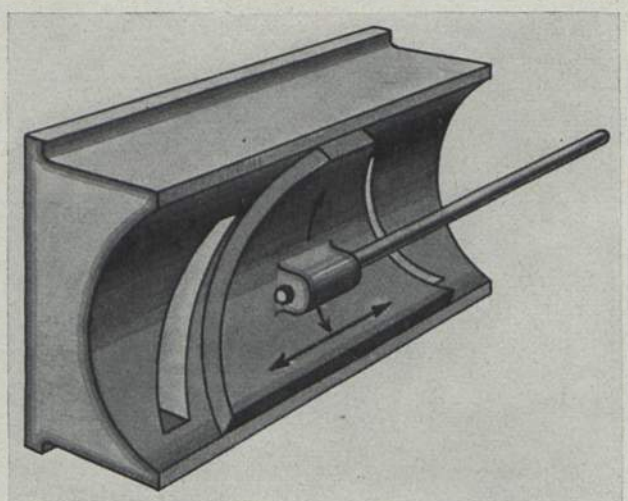
Der Dampf wird durch ein Rohr von dem oft fernab liegenden Kessel in den Zylinder geführt; er leistet bald auf der einen, bald auf der anderen Kolbenseite Arbeit und tritt dann in die freie Luft aus. Wann und wo der Dampf in den Zylinder eintreten soll, zu welcher Zeit er ihn verlassen darf, wird durch Regelungsorgane bestimmt, die man in ihrer Gesamtheit die Steuerung der Dampfmaschine nennt.

Wir sehen, daß auf unserem Bild die Einlaßklappe links oben, ein rein schematisches Ding, aufgezogen ist. Zugleich ist die Auslaßöffnung rechts unten freigegeben. In dem Zylinderraum rechts vom Kolben herrscht jetzt also Atmosphärendruck. Links drückt der Dampf mit einer Pressung von, sagen wir, 10 Atmosphären auf den sorgfältig abgedichteten Kolben, der folglich nach rechts geschoben wird. Wenn er fast am Ende seines Hubs angelangt ist, werden die beiden jetzt offenen Klappen geschlossen und gleichzeitig die beiden anderen aufgeschoben. Nun entsteht nach kürzester Zeit Überdruck auf der rechten Seite des Kolbens, er kehrt seine Bewegung um und durchläuft den Zylinder, bis er von neuem das Hubende erreicht hat.

Die Kolbenbewegung wird nach außen durch die Kolbenstange übertragen. Sie durchdringt den rechten Zylinderdeckel in einer Stopfbüchse, das ist ein kurzes Rohrstück, in das ein weicher, schmiegsamer und doch gegen Hitze und Reibung widerstandsfähiger Stoff oder Eisenringe höchst kunstvoll so eingesetzt sind, daß die Stange sich ohne Zwängung bewegen kann, daß aber doch kein Dampf durch das Rohr auszutreten vermag. Das rechte Ende der Kolbenstange ist in dem Kreuzkopf gelagert, einem Träger mit großen gerundeten Gleitschuhen oben und unten, die zwischen entsprechend geformten Gleitflächen hin und her gehen können.




361. Rider-Steuerung mit ebenem Expansionsschieber



362. Rider-Steuerung mit rundem Expansionsschieber

Die Umsetzung der geradlinigen in die Drehbewegung erfolgt durch den Kurbeltrieb, der aus der Pleuel- oder Schubstange und der Kurbel besteht. Der linke Kopf der Schubstange kann um den Mittelzapfen des Kreuzkopfs auf und nieder schwingen. Die Kurbel sitzt auf der kräftigen Kurbelwelle, von der die Arbeit der Maschine abgenommen wird, und zwar mit Hilfe des aufgesetzten Schwungrads, über das ein Riemen läuft. Mit ihrem anderen Ende liegt die Kurbelwelle in einem zweiten Lager, das ein gesondertes Baustück ist.

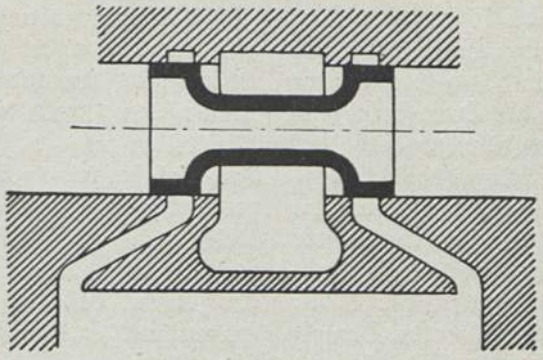
Der Kolben und das Getriebe setzen jeder Bewegung, zu welcher der Dampfdruck sie veranlassen will, durch ihre Massenträgheit einen Widerstand entgegen. Deshalb übt der Dampf wechselnd einen Druck auf den rechten oder linken Deckel des Zylinders aus, der das Gefäß fortwährend gegen die Kurbelwelle zu verschieben sucht, bald auf sie zu, bald von ihr fort. Diese Kraftwirkung wird von dem Maschinenrahmen, einem großen, gußeisernen Formstück, aufgenommen, das mit starken Schrauben im Fundament verankert ist. Der Rahmen umschließt auf der einen Seite das Hauptlager der Kurbelwelle, gegenüber ist ein Flansch angegossen, an den der Zylinder geschraubt wird.

Wenn wir rein schematisch ermitteln wollen, welche Leistung, das heißt, welche Arbeitsmenge in der Zeiteinheit (siehe Seite 96) unsere übertrieben einfach dargestellte Maschine abzugeben vermag, dann müssen wir zunächst die Kraft ermitteln, die ständig auf den Kolben wirkt.

Wir haben angenommen, daß der zugeführte Dampf eine Spannung von 10 Atmosphären hat. Dies bedeutet, daß er auf jedes Quadratzentimeter der Fläche, gegen die er drückt, eine Pressung von 10 Kilogramm ausübt, und zwar über den entgegenwirkenden Luftdruck hinaus, der ja, wie schon die übliche Bezeichnung sagt, 1 Atmosphäre beträgt. Unser Kolben soll einen Durchmesser von 30 Zentimetern haben. Der Halbmesser der Scheibe (r) ist alsdann 15 Zentimeter. Nun weiß jeder aus der Schule, daß der Inhalt einer Kreisfläche $= r^2 \times \pi$ (Pi) ist, einer Zahl, deren Wert rund $3\,^1/_7$ beträgt. Der Inhalt unserer Kolbenfläche ist also $15^2 \times 3\,^1/_7$, das sind rund 707 Quadratzentimeter. Jedes Quadratzentimeter erhält einen Druck von 10 Kilogramm, die Kraftwirkung des Dampfs auf den Kolben beträgt also rund 7070 Kilogramm.

Nun wollen wir weiter annehmen, daß die Hublänge, das ist der Weg des Kolbens von der äußersten Stellung links zur äußersten Stellung rechts und umgekehrt, 1 Meter beträgt. Diesen Weg legt der Kolben bei jeder Umdrehung der Maschine zweimal zurück, da er währenddessen eine hin

und her gehende Bewegung ausführt. Die Arbeit, die er während dieser Zeit verrichtet, das Produkt also von Kraft und Weg (Kraft × Weg), ist 7070 Kilogramm × 2 Meter = 14 140 Meterkilogramm. Die Maschine möge 60 Umdrehungen in der Minute, also je eine in der Sekunde ausführen. Dann beträgt die Leistung, die der Kolben abgibt, das ist die Arbeit in der Sekunde, 1 × 14 140 Meterkilogramm = 14 140 Sekundenmeterkilogramm. Da nun, wie wir von Seite 97 wissen, 75 Sekundenmeterkilogramm gleich einer Pferdestärke sind, so steht eine Kolbenleistung von 14 140 : 75 = 188,5 Pferdestärken zur Verfügung.



363. Entstehung des Kolbenschiebers aus dem einfachen Muschelschieber

Diese Leistung kann jedoch bei weitem nicht vollständig von der Kurbelwelle abgenommen werden. Denn ein Teil der Kolbenkraft geht durch die Reibung zwischen Kolben und Zylinderwand, der Kolbenstange in der Stopfbüchse, des Kreuzkopfs auf den Gleitflächen, der Schubstange am Kreuzkopf- und Kurbelzapfen und der Welle in ihren Lagern verloren. Diese Verluste betragen bei modernen Dampfmaschinen etwa 10 bis 15 v. H.

Die Kolbenkraft wird nun folgendermaßen auf den Kurbeltrieb übertragen: Denken wir uns bei dem schematisch gezeichneten Getriebe auf Bild 334 den Punkt A, der den Kreuzkopfzapfen bedeutet, nicht unterstützt, so ist es klar, daß beim Vorwärtsschieben des Kolbens nach links, wenn wir die Kolbenstange bei B gelenkig angebracht annehmen, ein Einknicken nach unten stattfände. Das Gelenk A würde sich senken. Bei der wirklich ausgeführten Maschine wird das durch die untere Gleitfläche im Maschinenrahmen verhindert. Auf diese Fläche wird also bei jedem Kolbengang nach links ein Druck ausgeübt, der senkrecht auf der Schubstangenrichtung steht. (Beim Rückgang des Kolbens geschieht das gleiche gegen die obere Gleitfläche.)

Wir müssen also die Kolbenkraft K nach dem Parallelogramm der Kräfte zerlegen in eine Teilkraft D, die senkrecht zur Schubstange, und eine zweite, die in deren Richtung wirkt. Dies ist in dem kleinen Teilbild I geschehen. S ist natürlich kleiner als K. Das ergibt sich auch rein mathematisch daraus, daß K die Hypothenuse, also die größte Seite in dem rechtwinkligen Dreieck l-m-n ist.

Die Schubstangenkraft S muß ihrerseits gleichfalls zerlegt werden, da sie am Kurbelzapfen C nicht allein drehend, sondern auch drückend wirkt. Denn sie preßt den Kurbelkörper auf die Welle nieder. So bilden wir ein zweites Parallelogramm der Kräfte (Teilbild II) aus, dem wir F als die wirklich drehende Kraft entnehmen. F hat in dem gezeichneten Augenblick die Richtung einer Tangente an den Kurbelkreis in Punkt C.

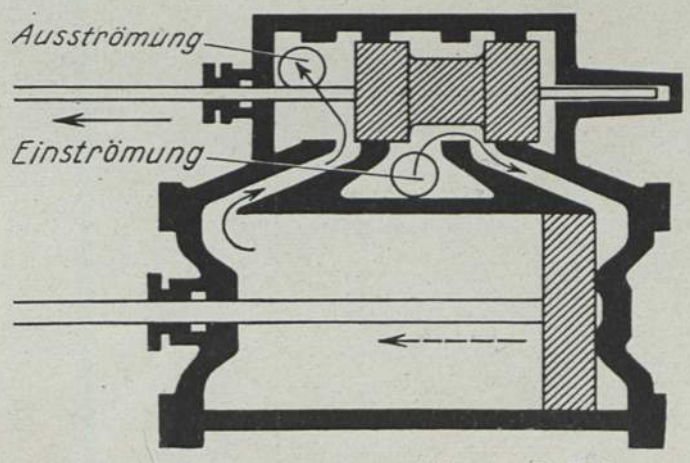
Mit jeder Änderung der Kurbellage verändert sich die Lage der Tangente und damit auch die Größe der Kraft F. Diese ist am stärksten, wenn die Kurbel ungefähr senkrecht nach oben oder nach unten steht, sie wird gleich Null in den punktiert gezeichneten Kurbelstellungen. Das sind die sogenannten Totpunkte oder Totlagen der Maschine, bei denen, da ja Kolbenstange, Schubstange und Kurbel in einer geraden Linie liegen, gar keine Kraft vom Kolben auf die Kurbelwelle übertragen wird. Wenn also der Dampf auch immer gleichmäßig auf den Kolben drückt, so verändert sich doch die Größe der Drehkraft an der Kurbel fortwährend.

Schon hierdurch entsteht eine Ungleichmäßigkeit, die, damit sie nicht eine Unregelmäßigkeit des Laufs zur Folge hat, durch das Schwungrad ausgeglichen werden muß. Dieses speichert, wenn die Drehkraft das Durchschnittmaß übersteigt, den Überschuß in sich auf und gibt ihn in der Nähe der Totlagen sowie während deren Dauer wieder ab. Über die Schwungradwirkung wird noch zu sprechen sein.

Wir können jetzt auch bereits einsehen, daß die Anwendung hochgespannten Dampfs in der Maschine günstig ist. Denn mit jeder Steigerung des Dampfdrucks erhalten wir eine Erhöhung der Kraftwirkung auf dieselbe Kolbenfläche. Hätten wir nur einen Kesseldruck von 2 Atmosphären statt 10, wie wir angenommen haben, so würde die auf unseren Kolben ausgeübte Kraft und damit die Leistung der Maschine nur $^1/_5$, also nicht 188,5 Pferdestärken, sondern 37,7 Pferdestärken, betragen. Hoher Kesseldruck gestattet also, beträchtliche Leistungen mit kleinen Maschinen zu erwirken. Diese sind aber in der Herstellung billiger.

Dieser Gewinn könnte aber nicht zutage treten, wenn zur Erzeugung hoher Dampfspannungen im Kessel viel Brennstoff notwendig wäre, wenn, wie früher angenommen wurde, das Hervorrufen von 10 Atmosphären den fünffachen Kohlenaufwand erforderte wie die Erzeugung von 2 Atmosphären. Wir haben aber bereits gehört, daß das tatsächlich keineswegs der Fall ist; der Kohlenverbrauch steigt in weit geringerem Maß als der Atmosphärendruck. Die genaueren Zahlen hierzu werden im Abschnitt 29, Seite 279, gegeben.

Nach unseren bisherigen Betrachtungen ist der Dampfdruck, der auf den Kolben wirkt, immer der gleiche. Wenn der Kolben ganz links steht (Bild 337), wird der Einlaß geöffnet, und während des gesamten Hubs steht der linke Zylinderraum mit dem Kessel in Verbindung. Sobald am Hubende die Einlaßklappe links geschlossen wird, öffnet sich die Klappe rechts, und der Kolben wird wieder mit dem Kesseldruck über seinen ganzen Rückweg gebracht. Wir können uns die Wirkung des Dampfs im Zylinder auf eine, z. B. die linke Kolbenfläche in Verbindung mit den wechselnden Kolbenstellungen leicht durch ein Bild veranschaulichen.




364. Kolbenschieber-Steuerung mit innerer Einströmung

Zu diesem Zweck zeichnen wir über die schematische Darstellung des Zylinders (Bild 335) mit Kolben eine senkrechte und eine wagerechte Linie, die einander schneiden, ein Koordinatenkreuz. In der senkrechten Richtung wird der Dampfdruck wiedergegeben, in der wagerechten die Kolbenstellung.

In der gezeichneten äußersten Linkslage des Kolbens tritt der Dampf ein, und sogleich steigt der Druck im Zylinder von 1 Atmosphäre bei a, die sich infolge der offen gewesenen Verbindung mit der Luft von selbst eingestellt hatte, auf 10 Atmosphären bei b. Jetzt bewegt sich der Kolben nach rechts, und während dieser ganzen Zeit verharrt der Dampfdruck auf 10 Atmosphären. Bei c wird die Einlaßöffnung verschlossen und der Auspuff geöffnet. Die Dampfspannung sinkt sogleich auf 1 Atmosphäre, die während des ganzen Kolbenrückgangs von d bis a unverändert bleibt. Wenn wir von irgendeiner Kolbenstellung aus ein Lot nach oben ziehen, finden wir immer den gleichen Abstand der Wagerechten voneinander.

Wir haben hier das Schaubild oder Diagramm einer Volldruckmaschine vor uns. Es sieht berückend einfach aus, ist aber doch das Abbild eines sehr ungünstigen Arbeitsvorgangs. Denn wenn bei einer so betriebenen Maschine der Auslaß geöffnet wird, dann tritt der Dampf mit einem schußähnlichen Knall heraus, und ein solches Knallen, das ja nur durch Arbeitsaufwand hervorgebracht werden kann, ist stets ein Zeichen dafür, daß Energie verlorengeht. Das geschieht hier deshalb, weil der Dampf, der sich am Hubende im Zylinder befindet, die volle Kesselspannung von 10 Atmosphären hat. Er könnte noch Arbeit leisten, auch nachdem er vom Zuführungsrohr abgeschnitten ist. Denn der Dampf hat ja eine sehr erhebliche Ausdehnungskraft.

Wir wissen nun, daß bereits Watt während der letzten Zeit seines Schaffens nicht mehr mit Volldruckmaschinen gearbeitet hat, sondern die Expansionsfähigkeit des Dampfs verwendete. Heute gibt es, von wenigen Sonderfällen abgesehen, Volldruckmaschinen überhaupt nicht mehr. Die Expansionsmaschine ist die Normalgattung.

Ihr Diagramm hat die auf Bild 336 gezeichnete Gestalt.

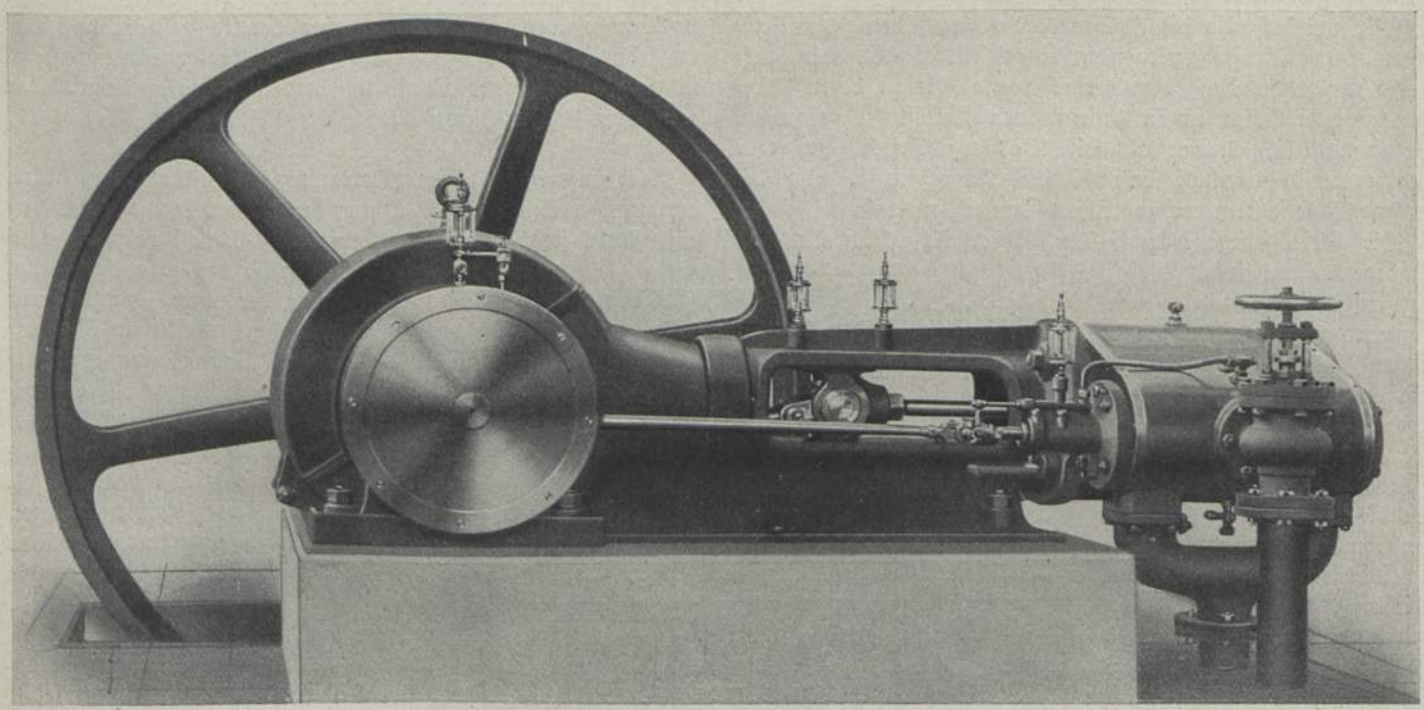
Wieder steigt bei der Linksstellung des Kolbens durch Öffnen des Einlasses der Dampfdruck sogleich auf 10 Atmosphären, und diese Pressung wird beibehalten, bis der Kolben nach c gelangt ist. Hier schließt aber bereits der Einlaß, und während des übrigen Kolbenwegs sinkt der Dampfdruck, bis er am Hubende nur noch eine geringe Größe hat. Beim Öffnen des Auslasses wird kein Knall mehr hörbar, sondern nur noch ein leichtes Ausatmen, als ein Zeichen, daß der Dampf bis in die Nähe des Atmosphärendrucks entspannt ist. Der jetzt noch verlorengehende Rest seiner Arbeitskraft ist gering, er muß aber geopfert werden, damit der freigelassene Dampf noch den Gegendruck der Atmosphäre zu überwinden vermag.

Die Kurve c d hat eine ganz bestimmte Gestalt, die aus der Natur des sich entspannenden Dampfs und einigen anderen Umständen hervorgeht.

Während der Expansionszeit wird die auf den Kolben ausgeübte Kraft allmählich immer geringer, weil ja der Dampfdruck sinkt. Es ist die zweite Aufgabe des Schwungrads, auch diese Ungleichheit im Antrieb der Kurbelwelle unmerkbar zu machen.

Auch das Diagramm auf Bild 336 ist bloße Theorie. Es entspricht noch nicht den wirklichen Vorgängen im Zylinder einer unserer Dampfmaschinen. Wir haben noch eine ganze Reihe von Abänderungen daran anzubringen.

Wollte man tatsächlich erst beginnen, die Ausströmöffnung freizugeben, wenn der Kolben am Hubende angelangt ist, so würde der nun von der anderen Seite her angreifende Dampfdruck eine unnötig starke Gegenkraft vorfinden. Denn das Steuerorgan, das die Austrittöffnung bedient, kann nicht ohne jeglichen Zeitverlust ganz aufspringen, und auch wenn dies der Fall wäre, ginge der Dampfdruck nicht sogleich auf die Atmosphärenspannung zurück. Hierzu braucht er zwar nur eine kurze Zeit, aber doch Zeit. Um ihm diese zu geben, wird das Ausströmorgan schon ein Stück vor dem Hubende aufgemacht. Es beginnt die Vorausströmung,



365. Moderne Kolbenschieber-Dampfmaschine
Bauart von A. Borsig, Tegel

während welcher der Dampfdruck stark absinkt, so daß er tatsächlich schon eine ganz geringe Zeit nach der Hubumkehr die Spannung der Atmosphäre erreicht hat. Die rechte untere Ecke des Diagramms wird hierdurch abgerundet (Bild 338).

Die Schließung des Ausströmorgans erfolgt längst vor dem Hubende, und das ist eine Maßnahme, die außerordentlich günstig auf die Arbeit der Maschine wirkt.

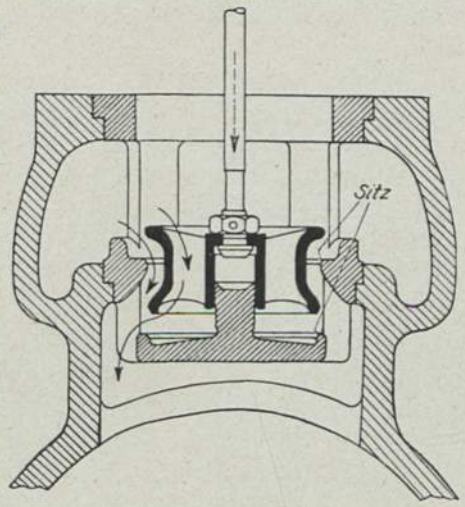
Zunächst scheint das Gegenteil der Fall zu sein. Denn wenn der Auspuff der linken Zylinderseite geschlossen ist, während der Kolben noch weiter nach links läuft, muß dieser den darin gebliebenen Dampf zusammenpressen. Die hierfür aufzuwendende Arbeit ist von der Gegenseite zu leisten und geht für die Wirkung auf das Getriebe verloren.

Demgegenüber steht aber folgende Überlegung.

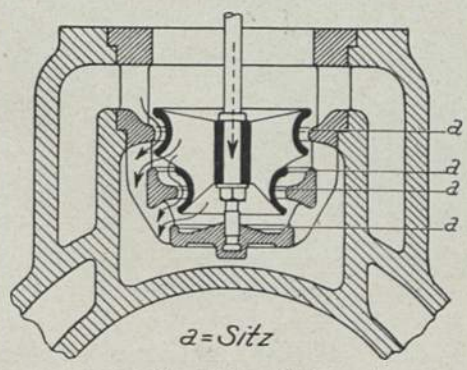
Jedesmal, wenn das Hubende erreicht ist, müssen alle Teile des Getriebes ihre Bewegungsrichtung umkehren. Legte der Kolben auch noch den letzten Teil des Hubs mit voller Geschwindigkeit zurück, so könnte diese Umkehr nur durch einen schweren Stoß geschehen, der die Lager hart erschüttern, an allen Zapfen reißen und hämmernd auf die Gefüge von Kolben und Schubstange wirken würde. Durch den vorzeitigen Abschluß der Ausströmung aber tritt eine sanfte Abbremsung ein; das Getriebe übersteht den Richtungswechsel bei gemildertem Stoß bedeutend besser. Die Anwendung der Kompression ist schon aus diesem Grund unentbehrlich, wenn eine schnell laufende Maschine nicht rasch zerstört werden soll.

Aber es entsteht auch noch ein weiterer Vorteil. Der Kolben muß beiderseits bereits ein Stück vor dem Zylinderdeckel sein Wegende erreichen, da die abschließende Wand von ihm natürlich nicht berührt werden darf. So bleibt immer ein Spalt zwischen dem in äußerster Lage stehenden Kolben und dem Zylinderdeckel. Dieser „schädliche Raum" wäre ohne Kompression beim Öffnen des Einströmorgans stets mit Dampf von sehr niedrigem Druck gefüllt. Mit der Spannung sinkt aber auch die Temperatur des Dampfs, denn die vom Kessel abgeschlossene Dampfmenge kann ja nur Arbeit abgeben, indem sie Wärme verliert. Der Frischdampf, der beim Öffnen des Einlasses zunächst in den schädlichen Raum dringt, würde sich also mit dem kalten Dampf zu mischen haben, er würde einen beträchtlichen Teil seiner Wärme und damit seiner Arbeitskraft einbüßen.

Jetzt, wo die nachgebliebene Füllung des schädlichen Raums fast wieder bis in die Nähe der Eintrittspannung gesteigert, ihre Temperatur wieder erhöht ist, tritt diese unwillkommene Einwirkung nicht auf. Die Kompression ist also eine unentbehrliche Maßnahme. Der kleine Verlust durch die Erhöhung des Gegendrucks am Hubende wird reichlich wettgemacht. Die Abrundung der unten links liegenden Diagrammecke (Bild 338) erscheint darum von besonderer Wichtigkeit.




366. Schnitt durch ein zweisitziges Rohrventil




367. Viersitziges Rohrventil

Auch die Einströmöffnung wird bereits kurz vor dem Hubwechsel freigegeben, weil auch die Wirkung des hier steuernden Organs schleichend ist und der Frischdampf Zeit haben muß, den schädlichen Raum ganz mit seiner Wärme und Spannkraft zu erfüllen, bevor der Kolben tatsächlich den neuen Hub beginnt.

Die Diagrammecke links oben bleibt demnach scharf, weil sich, solange das Eintrittorgan geöffnet, also die Verbindung mit dem Kesselraum vorhanden ist, an der Dampfspannung nichts ändert, wenn auch der Kolben sich bewegt. An der Ecke rechts oben muß aber auch eine kleine Abrundung angebracht werden, weil das Abschließen der Eintrittöffnung nicht augenblicklich erfolgt.

Während die Abbremsung des Kolbenlaufs vor dem Hubwechsel auf der linken Seite durch die Kompression erfolgt, tritt Minderung der Geschwindigkeit vor dem Hubwechsel auf der rechten Seite durch die Verringerung der Expansionskraft des Dampfs und die Vorausströmung ein.

Das wirkliche Diagramm einer Zylinderseite hat also die auf Bild 338 gezeichnete Form.

Will man erkennen, welche Vorgänge sich auf beiden Zylinderseiten gleichzeitig abspielen, so muß man die Diagramme beider Seiten nach Bild 339 ineinander zeichnen. Hierbei ist zu beachten, daß die beiden Diagrammlinien in den Pfeilrichtungen durchlaufen werden. Während also zum Beispiel auf der linken Zylinderseite Einströmung und Ausdehnung stattfinden, geht in der rechten Zylinderseite die Ausströmung vor sich.

Unsere Diagramme sind sämtlich in einiger Entfernung von den Null-Linien, den Koordinatenstrichen, gezeichnet. Der Abstand von der senkrechten Linie stellt den Dampfaufwand dar, der jedesmal zur Füllung des schädlichen Raums aufgewendet werden muß. Diese Dampfmenge geht nicht ganz verloren, weil sie später an der Expansion teilnimmt. Aber sie büßt doch immer einen Teil ihrer Tatkraft ein, da sie die Temperatur des schädlichen Raums stets ein wenig zu steigern hat, weil diese trotz der Kompression die Kesselwärme nicht erreicht. Die Entfernung der Diagrammlinie über dem schraffierten Teil auf Bild 340 von der wagerechten Koordinate ist durch den Gegendruck der Atmosphäre bedingt. Wäre dieser nicht vorhanden, so würde die Ausströmlinie auf der Null-Linie liegen, die vom Diagramm umschlossene Fläche wäre größer, und da diese ein Sinnbild der von dem Kolben erzielten Leistung ist, geht daraus hervor, daß dann auch diese Leistung größer wäre.

Es muß also, um die Ausnutzung der im Kessel erzeugten Dampfmenge zu erhöhen, danach gestrebt werden, den Abstand des Diagramms von der wagerechten Null-Linie so gering wie möglich zu halten. Bei einer Maschine, die mit Auspuff in die Atmosphäre arbeitet, ist eine weitere Annäherung unausführbar, wohl aber kann der

Gebrauch eines Kondensators in dieser Beziehung heilsam wirken.

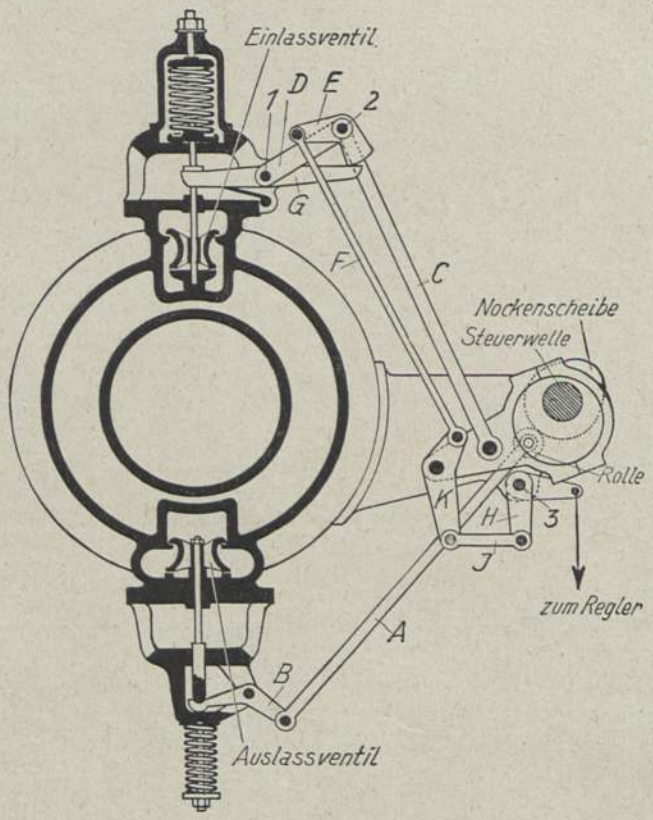
Man vermag ja im Inneren eines Kondensators durch gründliche Niederschlagung des Dampfs, das heißt durch starke Kühlung des Gefäßes, einen recht beträchtlichen Grad von Luftleere zu erzeugen. Es gelingt heute, bis auf 0,2 Atmosphären hinunterzukommen. Dadurch wird eine Vergrößerung der Diagrammfläche um das auf Bild 340 schraffierte Stück erreicht. Es findet also durch die Kondensation eine verbesserte Ausnutzung des Kesseldampfs statt, direkt an der Maschine gesehen deshalb, weil der Gegendruck der nicht arbeitenden Zylinderseite gegenüber der arbeitenden bei geöffnetem Auslaß nur etwa ein Fünftel der Höhe hat, die bei Auspuffbetrieb eintritt.

Von diesem Gewinn sind aber abzuziehen die Aufwendungen für den Betrieb der Heißwasser- oder Luftpumpe am Kondensator, die das niedergeschlagene Wasser wegschafft, und der Kaltwasserpumpe, die das Kühlwasser zubringt. Der Gewinn überwiegt jedoch, und deshalb arbeiten heute die allermeisten Dampfmaschinen mit Kondensation, obgleich diese nicht mehr, wie bei der Wattschen Niederdruck-Maschine, unbedingt erforderlich ist. Man läßt den Dampf nur noch dann unter Atmosphärendruck auspuffen, wenn er außerhalb der Maschine, zum Beispiel für Heizzwecke oder zur Versorgung von Kochapparaten, weiter verwendet werden soll.

Die Erörterungen über die Abrundungen der Ecken des Diagramms und die Vergrößerung der Fläche durch die Anwendung des Kondensators haben uns bereits gezeigt, was alles man aus diesem Schaubild zu erkennen vermag. Seine Form und sein Inhalt geben eine genaue Charakter-Darstellung der Dampfmaschine. Es ist nun wunderhübsch, daß der Ingenieur nicht gezwungen ist, das Diagramm jeder Zylinderseite einer fertigen Maschine mühsam mittels zahlreicher Messungen und Berechnungen zu entwerfen, daß er es vielmehr von der Maschine selbst fertig herstellen lassen kann. Das geschieht mit Hilfe eines kleinen, einfachen, ausgezeichnet wirkenden Apparats, den bereits Watt in seinen Grundzügen erdacht hat.

Auf dem Rücken jedes Dampfmaschinenzylinders sind in der Nähe der Deckel stets zwei hohe Stutzen mit Innengewinde angegossen, die für gewöhnlich durch Schraubenbolzen verschlossen gehalten werden. An die Stelle der Schrauben kann man aber je ein kleines rundes eisernes Gefäß setzen, in dessen Innerem sich ein Kolben befindet. Dieser ist in seinen Zylinder genau so eingesetzt wie der Maschinenkolben in den seinen und stellt überhaupt ein genaues, nur verkleinertes Abbild dieses dar. Der kleine Kolben wird von einer kräftigen Feder niedergepreßt.

Wenn der Dampfdruck aus dem Maschinenzylinder von unten her auf den Kolben drückt, so wird die Feder mehr oder weniger stark zusammengepreßt — wir wollen annehmen um 1 Millimeter durch jede Atmosphäre Dampfdruck. Die Hubbewegung des kleinen Kolbens ist durch eine senkrechte Stange nach außen geleitet, und Watt hatte an dieser Kolbenstange eine Zeigerspitze angebracht; indem diese sich längs eines Maßstabs auf und ab bewegte, las er die wechselnden Drücke ab. Das Instrument nannte er Indikator, eine Bezeichnung, die von dem lateinischen Wort indicare = anzeigen abgeleitet ist.




368. Die Ausklink- oder Freifallsteuerung der Gebrüder Sulzer

Die unmittelbare Beobachtung der Zeigerbewegung war schon bei den langsam laufenden Maschinen der damaligen Zeit recht mühsam und wäre beim heutigen Schnellbetrieb unmöglich. Es war daher ein ausgezeichneter Gedanke von Watts Ingenieur John Southern, den Indikator selbstschreibend zu machen.

Die Spitze des Zeigers wurde durch einen Schreibstift ersetzt, der sich sanft gegen ein Papierblatt legte. Dieses war auf einer ebenen Tafel befestigt, die mittels eines Schnurtriebs von der laufenden Maschine hin und her gezogen wurde. Auf unserem Bild 344 ist zur Erleichterung des Übergangs in die neuzeitlichen Formen gleich eine liegende Maschine angenommen, während Watt ja nur stehende kannte, und der Schnurtrieb ist an den Kreuzkopf angelenkt.

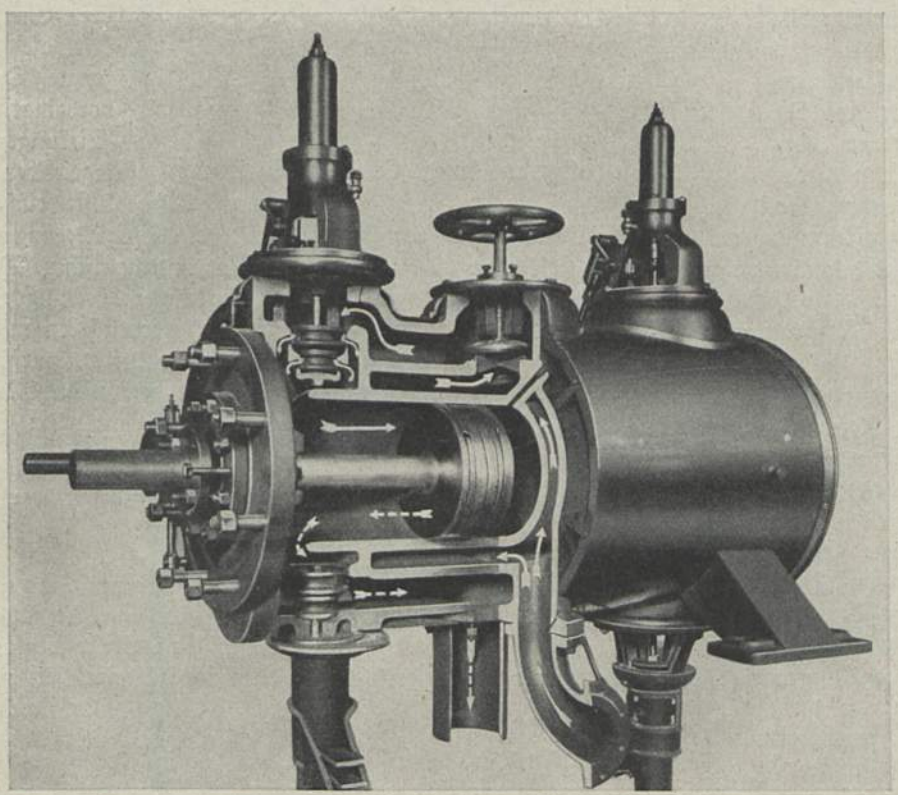
Geht der Kolben nach rechts, so wird die Indikatortafel nach links geschoben und umgekehrt. Der Schreibstift zeichnet jetzt bei jedem Hub die wechselnden Drücke in der Zylinderseite, an die er gesetzt ist, als eine geschlossene Diagrammlinie auf. Die Maschine schreibt die Geschehnisse in ihrem Inneren selbst nieder. Die Höhenlage des Stifts wird in jedem Augenblick durch den Dampfdruck bestimmt, seine Querstellung zum Papier durch die Kolbenstellung.

John Mac Naught hat alsdann um 1825 die Papierbewegung bedeutend vereinfacht, indem er an die Stelle der ebenen Tafel eine runde Trommel als Papierträger setzte. Eine Schnur, die auf deren Fuß aufgerollt ist, wird vom Kreuzkopf gezogen, so daß die Trommel sich in der Einen Richtung dreht. Hierbei wird eine innen liegende Feder gespannt, die beim Rückgang der Maschine die Trommel zurückdreht.

Als die Umlaufgeschwindigkeiten der Maschinen immer mehr und mehr anwuchsen, zeigte es sich, daß die Diagrammlinien nicht mehr glatt aufgezeichnet wurden. Es bildeten sich Zacken darin aus, deren Ursache die lebendige Kraft der

bewegten Indikatorteile war. Diese hatten ein zu hohes Gewicht, der Schreibstift wurde bei der geschwinden Aufwärtsbewegung über die Höhe, die dem Dampfdruck entsprach, hinausgeschleudert, er sank beim Abwärtsgang zu tief, um sich nachträglich erst richtig einzustellen. Es gelang dem Amerikaner Richards, die Teile so weit zu erleichtern, daß der Indikator auch bei raschestem Antrieb schöne glatte Linien niederschrieb.

Zugleich sorgte er für eine Vergrößerung des Schreibstifthubs, dessen Gesamtlänge bei der notwendigen Anwendung starker Federn zu gering im Verhältnis zum Kolbenweg war. Das Diagramm wurde bei unmittelbarer Anbringung des Schreibstifts an der Kolbenstange des Indikators zu niedrig. Richards ließ die Kolbenstange an einem einarmigen Hebel angreifen, der den Schreibstifthub um ein Mehrfaches vergrößerte. Hierbei war es aber notwendig, dafür zu sorgen, daß der Stift nicht, wie es ohne besondere Vorkehrung der Fall gewesen wäre, beim Kolbenhub einen Kreisbogen beschrieb, sondern eine gerade Linie zurücklegte. Diese Aufgabe wurde bereits von Richards gelöst, aber erst Thompson fand 1875 die wirklich brauchbare Form für raschen Betrieb.



369. Schnitt durch den Hochdruckzylinder einer Ventildampfmaschine
Bauart der Gebrüder Sulzer, Winterthur. Deutsches Museum, München

Bild 342 zeigt den Thompson-Indikator in neuzeitlicher Ausführung. Die Kolbenstange ist mit dem Schreibhebel nicht unmittelbar, sondern durch eine Gelenkstange verbunden, die sich nach rechts und links bewegen kann. Der Drehpunkt des Schreibhebels ist nicht fest, sondern gleichfalls in einer Gelenkstange angebracht; er kann sich gleichfalls seitlich verschieben. Ein links befestigter Lenker ist so bemessen, daß die Bewegung des Schreibstifts durch ständige entsprechende Verlegung des Drehpunkts stets in der Senkrechten erfolgt. Die Einrichtung hat große Ähnlichkeit mit dem berühmten Wattschen Parallelogramm für die Balanciermaschinen (Seite 192, Bild 316).

Der Indikator ist ein Präzisionsinstrument, das sehr sorgfältige Durcharbeitung aller Einzelteile erfordert, damit man sich wirklich auf ihn verlassen kann. Er ist daher allmählich immer feiner durchgebildet worden. In Deutschland haben sich um die Pflege des Indikators besonders die Firmen Schäffer & Budenberg in Magdeburg-Buckau sowie Dreyer, Rosenkranz & Droop in Hannover verdient gemacht.

Rosenkranz paßte 1900 das Instrument einer neuen Forderung an. Wird nämlich für den Betrieb der Dampfmaschine sehr heißer Dampf verwendet, so ändert sich bei längerem Gebrauch das Stoffgefüge der Feder, die den kleinen Kolben niedergedrückt hält. Die Arbeit dieser Feder ist aber ausschlaggebend für die Diagrammhöhe. Man muß sicher sein, daß sie stets bei Druckzunahme um 1 Atmosphäre um das gleiche Stück zusammengepreßt wird, gerade wie sie es bei der ersten Probe getan hat. Rosenkranz verlegte deshalb die Feder aus dem Inneren des Indikators nach außen, wo sie, dem Angriff des Dampfs entrückt, kühl bleibt (Bild 343). Das scheint eine unwesentliche Änderung, sie erforderte aber tatsächlich eine gründliche Umarbeitung des gesamten Aufbaus des Indikators und hat ihn sehr viel zuverlässiger gemacht. Bei Heißdampfmaschinen wird heute stets der Indikator mit außen liegender Feder verwendet.

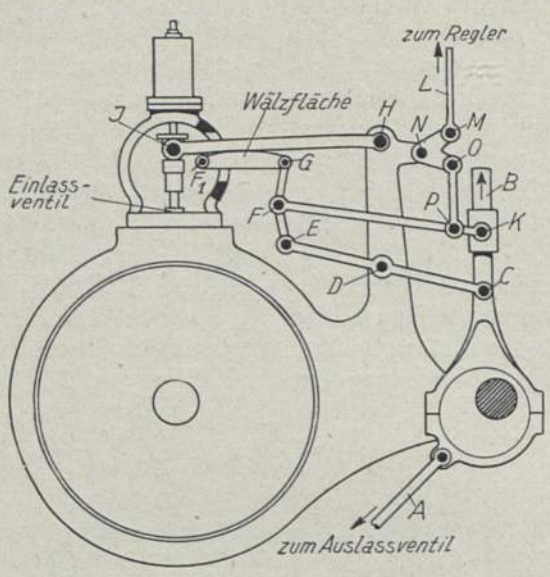
Für Messungen an Maschinen, die mit einer Dampfspannung von z. B. 14 Atmosphären arbeiten, braucht man natürlich einen Indikator mit stärkerer Feder als für Maschinen, die mit Dampf von 6 Atmosphären gespeist werden. Die Gebrauchsanweisung jedes Indikators gibt an, um wieviel Millimeter sein Schreibstift bei jeder Druckzunahme um 1 Atmosphäre gehoben wird. Damit die sich drehende Papiertrommel keinen zu großen Durchmesser zu haben braucht, wird zwischen den antreibenden Kreuzkopfzapfen und die um die Trommel gelegte Zugschnur eine Hebelanordnung eingeschaltet, die verkleinernd wirkt.

Wenn man weiß, um wieviel jede Atmosphäre Druck den Schreibstift des Indikators hebt, und welchen Weg die Trommel jedesmal zurücklegt, wenn der Kolben sich um 10 Zentimeter bewegt, dann gibt unter Anwendung dieser Maßstäbe die von der Diagrammlinie eingeschlossene Fläche unmittelbar die Arbeit an, die im Zylinder während des Hubs geleistet worden ist. Durch Umfahren der Bildlinie mit einem Meßwerkzeug, dem Planimeter, läßt sich der Flächeninhalt rasch ermitteln.

Aber nicht nur das regelmäßige Arbeiten der Maschine läßt sich mittels des Indikators beobachten, er vermag auch Krankheiten der Maschine zu verraten. Aus dem Diagramm auf Bild 341 ist zum Beispiel zu ersehen, daß die Kompression viel zu stark ist. Sie ist am Ende des Kolbenwegs bei b auf 9 Atmosphären gestiegen, während der Kesseldruck nur 7 Atmosphären beträgt. Beim Öffnen des Einlasses sinkt der Dampfdruck plötzlich, für das überstarke Zusammendrücken wird also eine beträchtliche Arbeitsmenge umsonst aufgewendet. Die Ursache des Fehlers ist, daß der Ausströmkanal zu früh, nämlich

schon bei a geschlossen wird. Es muß dafür gesorgt werden, daß er bis zum Punkt c offen bleibt. Die Kompressionslinie würde alsdann den gestrichelt gezeichneten Verlauf nehmen, die Fläche des Diagramms wäre vergrößert, woraus hervorginge, daß der Kolben nun mehr Arbeit leistet.

So weist der Indikator die Erkrankung nach und zugleich den Weg für ihre Heilung. Mit Recht wird dieses Instrument das Stethoskop des Ingenieurs genannt. Wie der Arzt durch Aufsetzen des Hörrohrs oder Stethoskops erhorchen kann, ob die in der Brusthöhle eingeschlossenen Organe regelrecht arbeiten oder vom Normalen abweichen, so werden dem Dampfmaschinenbauer vom Indikator die inneren Gebrechen der Maschine enthüllt. Viele tiefe Einsichten und damit zahlreiche Fortschritte sind auf dem selbsttätig niedergeschriebenen Diagramm als Fundament aufgebaut.

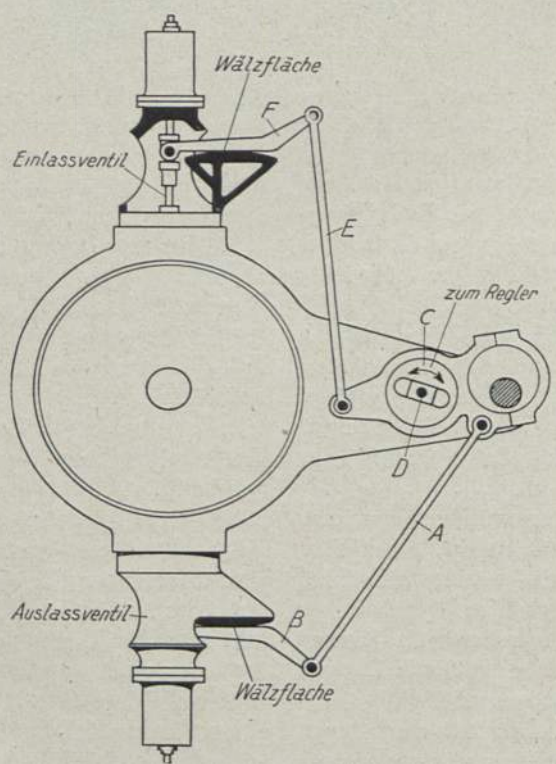



370. Die halbzwangläufige Collmann-Steuerung

Man kann das Diagramm wohl auch mit einer geographischen Karte vergleichen. Die Formen eines Erdteils kann keines Menschen Auge in ihrer ganzen Ausdehnung gleichzeitig erfassen. Wir wissen trotzdem ganz genau, wie die Umrisse der Erdteile aussehen, weil wir leicht übersehbare Kartenbilder davon entwerfen können. So vermag auch niemand das Arbeiten des Dampfs im Zylinder zu beobachten. Das Schaubild aber stellt die Vorgänge in dem Arbeitsgefäß mit greifbarer Deutlichkeit dar.

Durch Ausmessen der Diagrammfläche können wir die Arbeitsmenge feststellen, die dem Kolben bei einem Hub zugeführt wird. Werden beide Zylinderseiten indiziert, so ist die während einer Umdrehung der Maschine, zugeleitete Arbeitsmenge ermittelt. Diese in Meterkilogramm ausgedrückt und mit der sekundlichen Umdrehungszahl der Maschine multipliziert, ergibt die Leistung am Kolben. Werden die hierbei festgestellten Sekundenmeterkilogramm durch 75 dividiert, so erhält man eine Zahl, welche die indizierten Pferdestärken angibt.

An der Kurbelwelle können auf verschiedene Arten die effektiven oder Nutzpferdestärken ermittelt werden, das sind die, welche die Maschine tatsächlich für nutzvolle Arbeit abgibt. Das Verhältnis der effektiven zu den indizierten Pferdestärken ist der mechanische Wirkungsgrad der Maschine. Wir wissen bereits von Seite 207, daß dieser etwa 85 bis 90 v. H. beträgt.




371. Die zwangläufige Radovanovic-Steuerung

Der Dampfmaschinenbauer muß seine Größe kennen, ein Fabrikbesitzer aber, der eine Maschine anschaffen will, wünscht eine erweiterte Feststellung. Er will sich auch über die Verluste klar sein, die im Kessel, bei der Leitung des Dampfs von diesem in den Zylinder und durch die Wärmeausstrahlung der Maschine entstehen. Das Verhältnis der Energie, die den auf den Kesselrost geschütteten Kohlen innewohnt, zu der Energie oder Arbeitsfähigkeit, die der mit ihrer Hilfe erzeugte Dampf am Kolben hervorbringt, heißt der thermische Wirkungsgrad der Maschinenanlage. Über ihn, der ungeheure Verluste einschließt, werden wir im nächsten Abschnitt bei der Erörterung des Kesselbaus sprechen.

Thermischer und mechanischer Wirkungsgrad zusammen ergeben den wirtschaftlichen Wirkungsgrad der Kraftanlage, der aussagt, wieviel Nutzpferdestärken man aus einer bestimmten Menge Heizstoff erhält. Hieraus ersieht der Fabrikbesitzer die Kosten, die er für die gewünschte Maschinenleistung stündlich aufzuwenden hat. (Siehe auch den Schluß des nächsten Abschnitts.)

*

Eine neuzeitliche Dampfmaschine ist ein lebender Organismus. Wer da sieht, wie sie sinnvoll ihre Glieder regt, wie sie ohne menschliche Beihilfe sorgsam und genau ihre Arbeit verrichtet, wird ihr die Beseeltheit nicht absprechen können. Die Maschine wäre aber seelenlos, nichts als eine Marionette, die an Bindfäden zappelt, wenn die Abschlußorgane des Zylinders wirklich so ausgebildet wären, wie wir es zur Vereinfachung der Erörterung bisher angenommen haben.

Auf Bild 293 werden die Ein- und Ausströmöffnungen durch Klappen oder Hähne bedient, die vom Wärter mittels irgendwelcher Griffe zur rechten Zeit aufgezogen und zugeschoben werden müssen. Die Maschine ist damit des Eigenwillens beraubt. Wir wissen aber, daß sie seit den Zeiten des sagenhaften Potter und des sehr realen Beighton sich selbst steuern kann. Heute vermag sie das natürlich weit besser und genauer zu tun als in früheren Zeiten, und es ist jetzt unsere Aufgabe, das Werden und Sein der neuzeitlichen Dampfmaschinensteuerung zu betrachten.

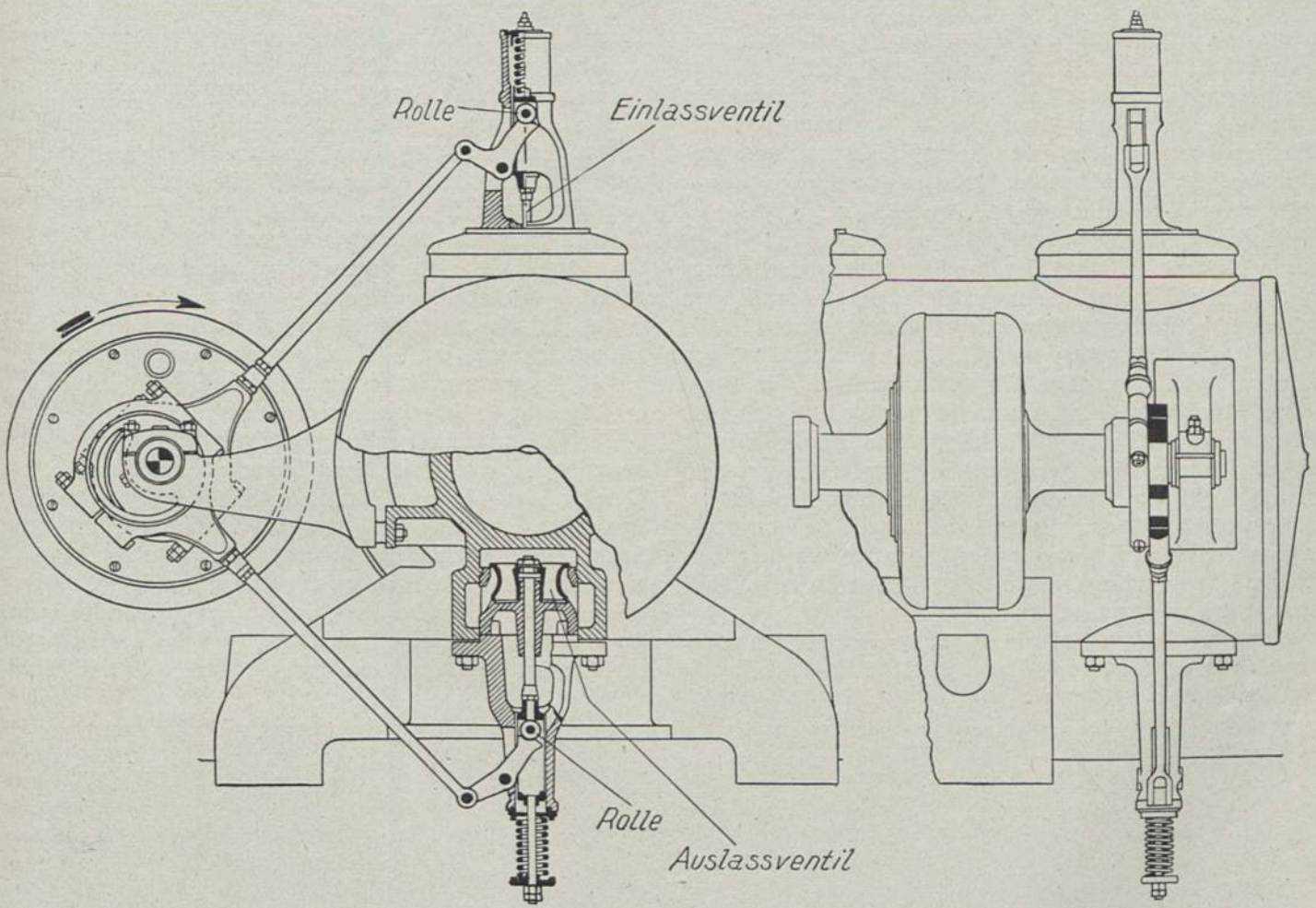
Wir treten damit in eine Erörterung von besonderer grundsätzlicher

Wichtigkeit ein. Denn während wir bisher vom Körper der Maschine gesprochen haben, reden wir nun von ihrer Seele.

Die Steuerung umfaßt die Organe zur Leitung des Dampfs. Sie haben die Macht, dafür zu sorgen, daß die Maschine gerade so arbeitet, wie man es wünscht. Letzten Endes ist es ihre Aufgabe, den Betriebsstoff derart zu schalten, daß beim Indizieren des Zylinders Diagramme von der auf Bild 339 dargestellten Art entstehen. Das vermögen die heutigen Einrichtungen mit großer Genauigkeit zu leisten, während die Diagramme zu Watts Zeiten sehr viel ungünstiger ausfielen.

Ventilspindel mit ihrem verhältnismäßig langen Hub sicher dicht zu halten vermochte. Bei dem dargestellten Antrieb brauchte nur eine Steuerwelle wenig hin und her gedreht zu werden, wodurch die Abdichtung erleichtert wurde. Freilich mußte man in Kauf nehmen, daß das Zahnradsegment an der Steuerwelle und der gezahnte Bügel, durch den das Ventil gehoben und gesenkt wurde, unzugänglich im Dampfraum lagen.

Für das Anheben jedes Ventils solcher Art mußte sehr viel Kraft aufgewendet werden, weil der Teller durch den




372. Auf- und Seitenriß der Lentz-Steuerung

Bis zum Jahre 1800 wurde zur Bedienung des Zylinders nahezu ausschließlich das Tellerventil verwendet. Der Hauptteil war eine runde Metallplatte mit kegelförmig abgeschrägter Kante, die auf einem entsprechend geformten Ventilsitz ruhte. Sie wurde auf diesen durch die eigene Schwere niedergedrückt. Vier solcher Vorrichtungen mußten vorhanden sein, damit auf beiden Zylinderseiten die Verbindung zum Kessel und zum Kondensator wechselnd freigegeben und verschlossen werden konnte. Aus dem Dampfraum, in dem der Teller jedes Ventils sich befand, drang nicht, wie es heute bei Anwendung von Ventilen stets der Fall ist, der Mittelschaft, Ventilspindel genannt, senkrecht hinaus, um oben oder unten von dem Lenkhebel gepackt zu werden, man verwendete zum Heben und Niederdrücken des Ventils lieber eine Einrichtung nach Bild 345.

Die Kunst des Stopfbüchsenbaus war nämlich damals noch nicht so weit entwickelt, daß man die Ausführung der

Dampfdruck belastet war. Gegen das Einströmventil zum Beispiel preßte von oben her der volle Kesseldruck, während darunter die Kondensatorleere herrschte. Das Tellerventil war nicht entlastet.

Hornblower schuf noch vor Ende des Jahrhunderts eine ausgezeichnete Verbesserung, indem er die Anordnung umkehrte. Er ließ, so kann man sagen, nicht mehr den Teller vom Ventilsitz, sondern diesen vom feststehenden Teller abheben. Es entstand so ein Steuerorgan, dessen Körper rohrförmige Gestalt hatte, weshalb es auch Rohrventil genannt wurde.

Aus Bild 346 ist deutlich zu erkennen, daß der Dampf jetzt in der Hauptsache nur noch gegen eine schmale ringförmige Fläche wirken konnte, so daß das Anheben bedeutend erleichtert war. Dieses Ventil ist mit durchgehender Ventilspindel nach heutiger Art dargestellt. Damit der Dampf nicht außen zwischen Ventilrohr und Führungsrohr hin-

durchzudringen vermochte, war eine kolbenähnliche Dichtung angebracht.

Aus diesem Hornblowerschen Rohrventil ist später das doppelsitzige Ventil entwickelt worden, von dem wir bei der Erörterung der modernsten und genauesten Steuerungsart zu sprechen haben werden. Das nicht entlastete Tellerventil wird heute noch bei den Gasmaschinen verwendet, wo es gegenüber den hohen Hitzegraden im Zylinder am sichersten dicht hält. Neuerdings freilich ist Professor Stumpf mit Erfolg bemüht, das Tellerventil eben wegen seiner größeren Dichtigkeit wieder in den Dampfmaschinenbau einzuführen.

Vier getrennte Steuerorgane an einem Zylinder zu bedienen, erfordert stets die Anwendung eines verwickelten Hebelwerks, und wenn auch die hochausgebildete Dampfmaschinentechnik unserer Zeit solche vielteiligen Anordnungen nicht mehr zu scheuen braucht, falls sie damit besondere Wirkungen erreichen will, so mußte doch in Watts Tagen nach Vereinfachung gestrebt werden. Steuerungen mit wenig Einzelteilen werden auch heute noch bei allen Maschinen angewendet, die harte und nicht zu genaue Arbeit zu leisten haben.

Ein blendend einfacher Bau der Dampfmaschinensteuerung ist durch den Übergang von auf und nieder gehenden Organen zu einem gleitenden Dampfverteiler erreicht worden.

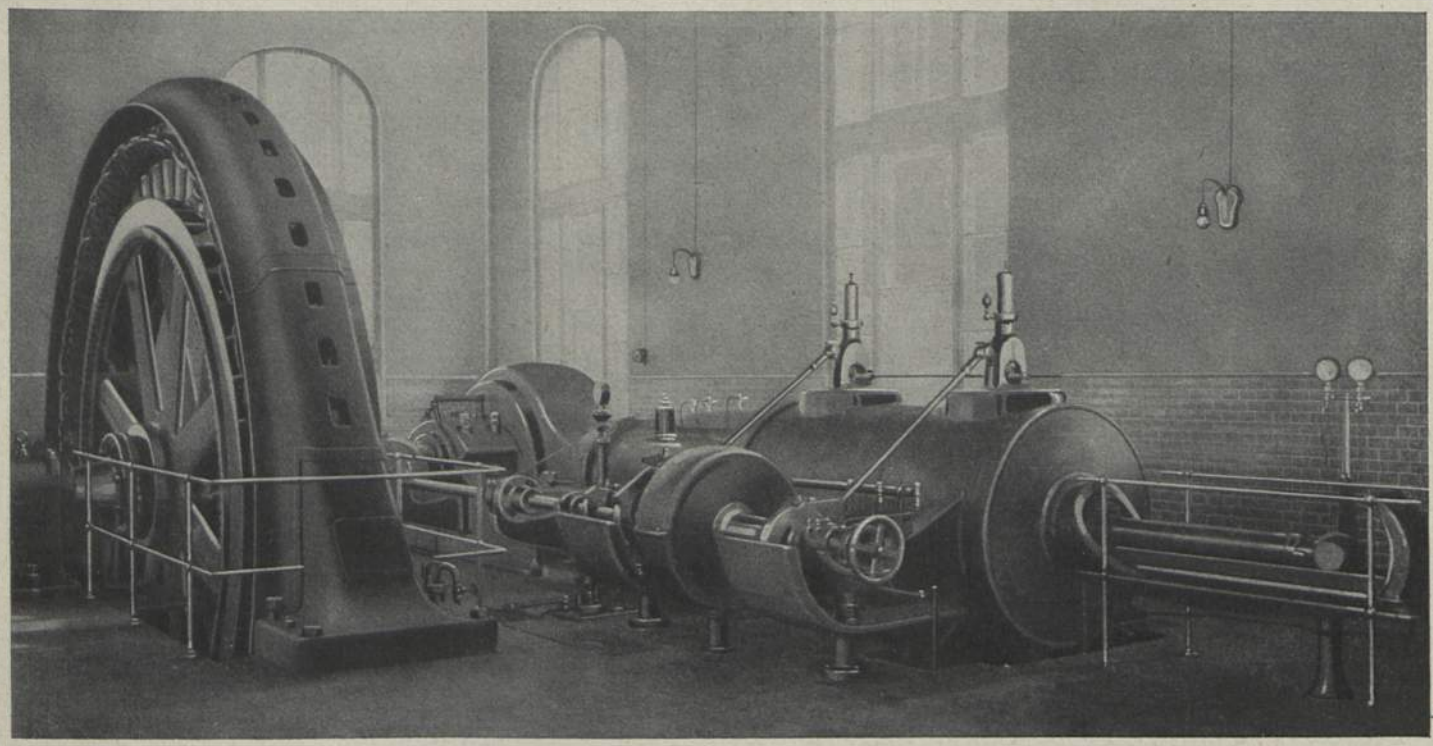
Die erste Steuerung mit Schieber wurde 1799 von Murdock geschaffen. Der Gleiter erhielt nach der Form seines Querschnitts, die einem lateinischen D glich, die Bezeichnung D-Schieber (Bild 347). Der Murdocksche D-Schieber besorgte die Dampfverteilung der einfachwirkenden Wattschen Maschine. Daraus hat sich durch Abplattung des gewölbten Teils und einige weitere Änderungen der noch heute außerordentlich häufig benutzte Flach- oder Muschelschieber entwickelt, so genannt, weil sich in seinem Inneren eine muschelartige Vertiefung befindet.

Damit der Muschelschieber den Zylinder einer doppeltwirkenden Dampfmaschine bedienen kann, erhält dieser einen Anguß, in dem sich drei Kanäle befinden (Bild 348). Sie haben sämtlich in der Richtung quer zur Zylinderachse eine beträchtliche Länge. Der mittlere Kanal, der mit dem Zylinderinneren nicht in Verbindung steht, ist eine bloße Höhlung. In einer Seitenwand dieser Höhlung beginnt das Ausströmrohr, das zum Auspuff oder zum Kondensator führt. Die beiden anderen Kanäle, die durch schmale Leisten von den Rändern der Mittelöffnung getrennt sind, laufen in je einer langen Windung bis in die Nähe der Zylinderdeckel und durchbrechen dort die Wand, so daß sie ins Innere des Zylinders münden. Durch sie strömt der Dampf ein und aus.

Die oberen Enden der Kanäle liegen in einer sorgfältig bearbeiteten Ebene, dem Schieberspiegel, auf dem sich das Steuerorgan in gleicher Richtung wie der Maschinenkolben hin und her bewegt. Der Schieber selbst, ein kastenförmiges Gebilde, ist dampfdicht in den Schieberkasten eingeschlossen, in den das vom Kessel herkommende Dampf-Einströmrohr mündet. Durch die Hinterwand des Schieberkastens, die der Kurbelwelle zugekehrt ist, geht die Antriebstange für den Schieber durch eine Stopfbüchse hinaus.

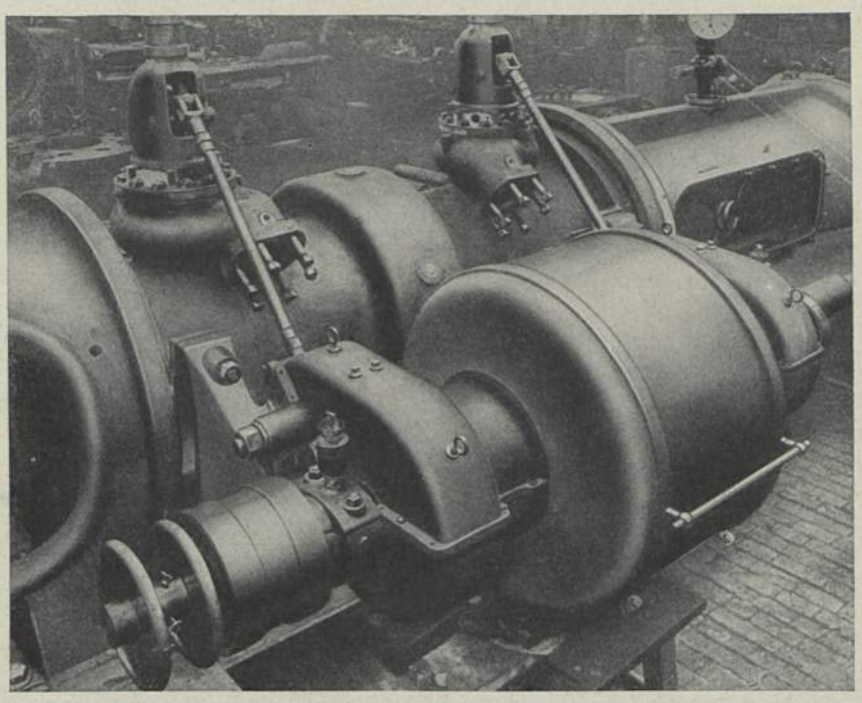
Es erleichtert unsere Betrachtung, wenn wir annehmen, daß der Schieberspiegel oben, „auf dem Rücken" des Zylinders, also wagerecht liegt. In Wirklichkeit ist er seitlich und senkrecht, um 90 Grad gegen die angenommene Lage versetzt, angeordnet, weil der Antrieb des Schiebers von der Kurbelwelle abgeleitet werden muß.

Der in den Schieberkasten eintretende Frischdampf preßt, unterstützt von einer Feder, den Schieber auf den Spiegel nieder. Dort wo seine Ränder auf der Spiegelfläche aufliegen, vermag infolge der sorgfältigen Glättung beider Flächen kein Dampf durchzutreten. Befindet sich also der Schieber in der auf Bild 349 oben dargestellten Lage, dann kann Dampf aus dem Schieberkasten nur durch den rechten Kanal in den Zylinder dringen: der Kolben bewegt sich nach links. Zugleich verbindet die Muschel des Schiebers den linken Kanal mit dem Aus-



373. Moderne Einzylinder-Dampfmaschine mit Lentz-Steuerung
Wumag (Waggon- und Maschinenbau A.-G.), Görlitz

trittkanal, so daß auf der linken Zylinderseite Auspuff stattfindet. Bei der Stellung auf Bild 349 unten ist der linke Kanal geöffnet, der rechte mit dem Austrittkanal durch die Muschel verbunden: jetzt geht der Kolben nach rechts. Dazwischen gab es eine Mittelstellung (Bild 349 Mitte), in der die beiden Seitenkanäle sowohl vom Schieberkasten wie von der Austrittöffnung abgetrennt waren. Während dieser Zeit fanden auf der rechten Seite Expansion, auf der linken Kompression statt, während der Kolben sich weiter nach links bewegte.



374. Zylinder mit Steuerung für Hochhub-Düsentellerventile von Professor Stumpf

Um uns die Art klar zu machen, in welcher der Schieber angetrieben werden muß, wollen wir für einen Augenblick annehmen, daß wir eine Volldruckmaschine vor uns haben, eine solche also, bei der es weder Kompression noch Expansion, sondern nur Einströmung und Auspuff gibt.

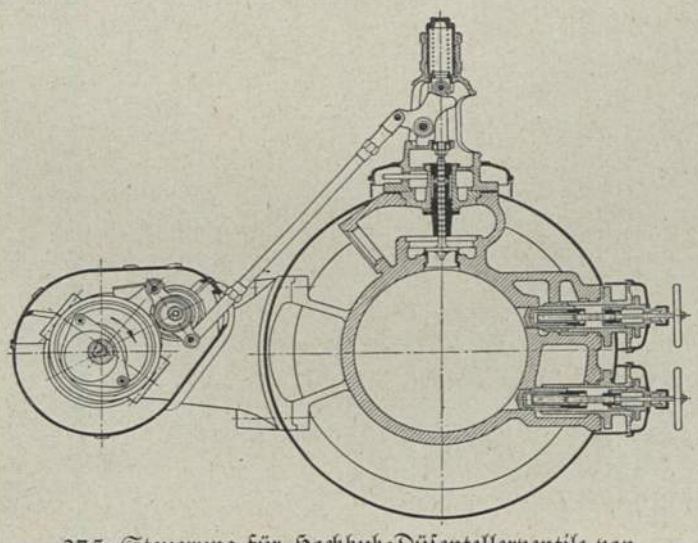
Während bei einer Volldruckmaschine links Einströmung stattfindet, pufft die rechte Zylinderseite aus und umgekehrt. Ein Abschluß beider Seitenkanäle findet nur während einer theoretisch unendlich kleinen Zeit im Augenblick der Hubumkehr statt. Der Schieber hat dann im Querschnitt die einfache Form, die auf Bild 350 dargestellt ist. Seine Stege, die auf dem Spiegel gleiten, sind nur genau so breit wie die Seitenkanäle des Zylinders.

Die Bewegung des Schiebers erfolgt in gleicher Weise wie beim Kolben durch eine Schubstange von der Kurbelwelle aus. Die Schubstange ist mit einer auf der Kurbelwelle sitzenden Kurbel verbunden. Diese hat in Wirklichkeit eine besondere Form, wir nehmen aber vorläufig eine gewöhnliche Kurbel an, was wir ohne weiteres dürfen, da die Wirkung der beiden Mechanismen genau die gleiche ist.

Auf Bild 350 links ist der Kolben gerade in seiner linken Endstellung angelangt und im Begriff, seine Richtung umzukehren. Die Stege des Schiebers verschließen beide Seitenkanäle. Das Steuerungsorgan befindet sich in seiner Mittellage. Indes der Kolben alsdann nach rechts geht, muß sich der Schieber ebenfalls nach rechts bewegen, um den linken Einströmkanal zu öffnen sowie die Verbindung zwischen dem rechten Seitenkanal und dem Austrittkanal herzustellen.

Die richtigen Stellungen von Schieber und Kolben zueinander entstehen dann, wenn die Schieberkurbel um 90 Grad gegen die Stellung der Hauptkurbel versetzt ist, und zwar muß sie in der Drehrichtung der Maschine voraneilen. Hat der Kolben seine Mittelstellung erreicht, steht also die von ihm angetriebene Hauptkurbel senkrecht nach oben (Bild 350 rechts), dann befindet sich der Schieber in der äußersten rechten Stellung, seine Kurbel liegt wagerecht nach rechts. Läuft der Kolben weiter nach rechts, so kehrt der Schieber schon seine Richtung um, damit er bei der rechten Totlage des Kolbens wieder beide Seitenkanäle verschließen, hierauf Einströmung von rechts ermöglichen und der linken Seite den Auspuff freigeben kann.

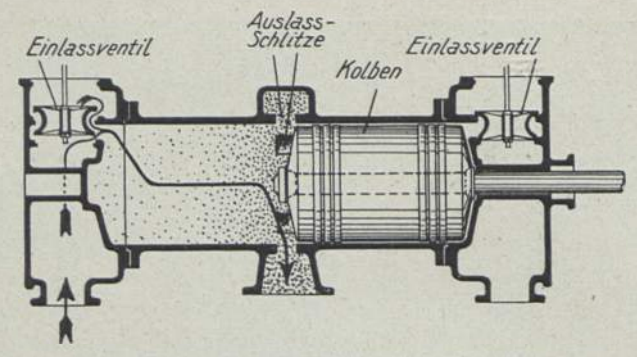
Nun wollen wir aber tatsächlich nicht eine Volldruckmaschine, sondern eine solche mit Expansion und Kompression betreiben. Hierfür können wir einen Schieber der oben besprochenen Art nicht brauchen, und dieser ist auch aus mechanischen Gründen nicht anwendbar. Denn durch ihn ist eine wirkliche Abtrennung des Zylinderinneren von dem mit Frischdampf erfüllten Schieberkasten und vom Austrittkanal nicht zu erreichen, weil die Schieberkanten im Betrieb stets etwas verschleißen, so daß die Seitenkanäle nie vollständig verschlossen würden. Die Stege des Schiebers, der unsere Maschine wirklich zu bedienen vermag, müssen daher verbreitert sein.



375. Steuerung für Hochhub-Düsentellerventile von Professor Stumpf

Es entsteht der Muschelschieber mit Überdeckungen, dessen Querschnitt schon die Bilder 348 und 349 zeigten. Für seinen Betrieb ist notwendigerweise die Stellung der Schieberkurbel gegen die Hauptkurbel abzuändern. Blieben die 90 Grad Voreilung erhalten, so würde die linke Steuerkante, der Rand der äußeren Überdeckung links, den linken Einströmkanal noch längst nicht freizugeben beginnen, wenn der Kolben am linken Hubende angelangt ist. Dies muß aber, da ja mit Voreinströmung gearbeitet wird, nicht erst jetzt, sondern sogar schon etwas vorher geschehen.

Dementsprechend ist der Voreilwinkel größer als 90 Grad zu machen. Die Voreilung der Schieberkurbel führt nun ohne weiteres mit Hilfe der äußeren und der inneren Überdeckung jeder der beiden Schieberseiten Expansion und Kompression herbei. Dies sowie das Zusammenwirken beider Zylinderseiten ist deutlich aus der Bilderserie 351 zu erkennen. Für jede Schieberstellung sind hier die zugehörige Lage des Kolbens sowie die Stellungen der Haupt- und der Schieberkurbel anzugeben.




376. Schema der Gleichstrom-Dampfmaschine von Professor Stumpf

Bereits auf Teilbild 2, bevor also die Hauptkurbel die Mittellage erreicht hat, beginnt der Schieber seine Bewegungsrichtung umzukehren. Auf Teilbild 3 hat er den linken Einströmkanal bereits abgeschlossen, während der Kolben sich immer noch nach rechts bewegt. Der in den Zylinder eingeschlossene Dampf expandiert nun also bis kurz vor Teilbild 6, wo bereits die Ausströmung einsetzt. Auf der anderen Zylinderseite sehen wir, daß der Ausströmkanal der rechten Seite auf Teilbild 5 bereits geschlossen ist, während der Kolben den Weg nach rechts noch nicht beendet hat. Bis zum Teilbild 7 findet auf der rechten Zylinderseite Kompression statt, worauf die Voreinströmung einsetzt.

Es ist leicht einzusehen, daß jede Vergrößerung des Voreilwinkels die Voreinströmung früher eintreten läßt. Denn wenn der Voreilwinkel zwischen Hauptkurbel und Schieberkurbel noch größer ist als auf unseren Bildern, dann wäre der Kolben bei der auf Teilbild 12 gezeichneten Stellung der Schieberkurbel, wenn also die Einströmung links bereits beginnt, noch weit zurück. Gleichzeitig würde aber auch beim Rückgang des Schiebers der Abschluß des linken Kanals früher erfolgen.

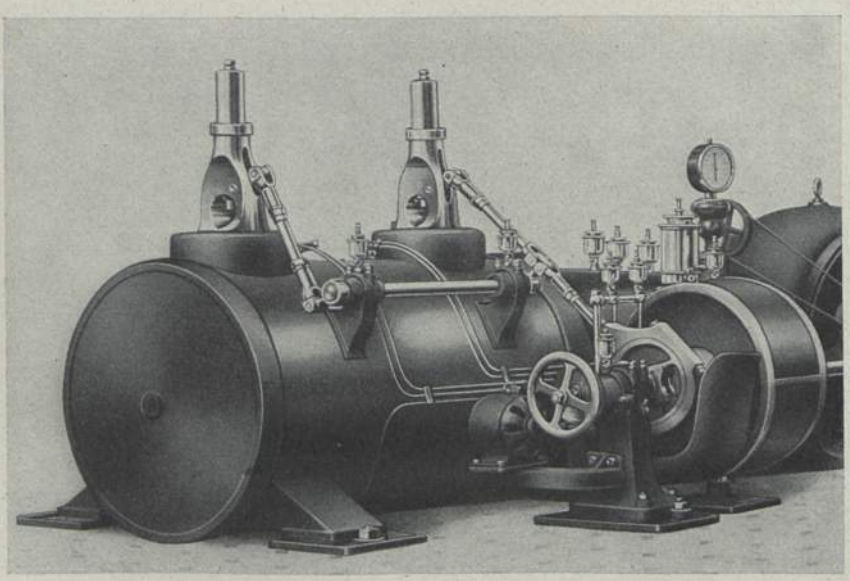
Jede Vergrößerung des Voreilwinkels ergibt gleichzeitig früheren Beginn der Voreinströmung und Verlängerung der Expansion, oder, was dasselbe ist, geringere Füllung des Zylinders. Aber auch auf die Kompression und die Ausströmung wirkt die Änderung des Voreilwinkels. Man erhält Steigerung der Kompression infolge früheren Abschlusses (siehe Teilbild 4 rechts) und Früherlegung der Vorausströmung (siehe Teilbild 6 links), da die beiden Schieberkanten die eben angegebenen Stellungen früher erreichen.

Der Voreilwinkel bestimmt den Füllungsgrad der Maschine und damit auch ihre Leistung. Denn je früher die Einströmung abgeschlossen wird, desto weniger Dampf kommt in den Zylinder. Mit Hilfe des Muschelschiebers kann also die Leistung der Maschine verschieden eingestellt werden. Es entsteht jedoch die sehr unangenehme Nebenwirkung, daß gleichzeitig mit der Änderung an der Einströmung auch alle anderen Hauptpunkte des Diagramms verlegt werden, daß auch Kompression und Vorausströmung zu anderen Zeiten einsetzen, da sie ja allesamt von den Stellungen desselben starren Organs abhängig sind.

Wir müssen jetzt die wirkliche Form des Schieberantriebs betrachten. Es wurde bereits gesagt, daß seine Bewegung von der Kurbelwelle abgeleitet wird, auf der das Schwungrad sitzt, und von der die gesamte Arbeitsleistung abgenommen wird (Bild 337). Der Schieberweg nach rechts und links ist kurz, die Mitte des Zapfens seiner Kurbel braucht also von der Wellenmitte nicht sehr weit entfernt zu sein.

Wir nehmen an, auf Bild 352 sei die in die Hauptwelle gesetzte Schieberkurbel dargestellt. Der Zapfen kann ziemlich dünn sein, da die zu übertragende Kraft ja nicht sehr groß ist. Der gestrichelte Kreis ist der Schieberkurbelkreis, sein Durchmesser der Hub des Schiebers. Für diese Hublänge ist es nun aber offenbar ganz gleichgültig, wie dick der Kurbelzapfen ist. Wir können ihn dicker machen, ohne daß sich an der Schieberbewegung etwas ändert, wenn nur immer die Entfernung der Zapfenmitte von der Wellenmitte unverändert bleibt. Man darf das so weit treiben, daß der Durchmesser des Kurbelzapfens schließlich größer wird als der Durchmesser der Welle — immer unter genauer Aufrechterhaltung des Abstands der beiden Achsen von einander.

Daraus erwächst baulich ein sehr bedeutender Vorteil. Müßte man nämlich in die Kurbelwelle tatsächlich einen dünnen Zapfen einsetzen, so wäre sie sehr stark geschwächt und würde an der Einsetzstelle brechen, wenn mittels des auf dem Schwungrad liegenden Riemens eine hohe Leistung abgenommen würde. Jetzt aber, nach der Verdickung des Zapfens, brauchen wir die Welle gar nicht mehr zu unterbrechen, sondern schieben den Kurbelantrieb in Form eines Rings mit exzentrischer Bohrung über die Welle, mit der er sich drehen muß, weil ein eingetriebener Keil ihn dazu zwingt. Die zugehörige Schubstange erhält einen zum Ring oder Bügel erweiterten Kopf, der die scheibenförmige Kurbel umfaßt (353). Damit er bequem aufgesetzt werden kann, ist der Ring geteilt, die Hälften

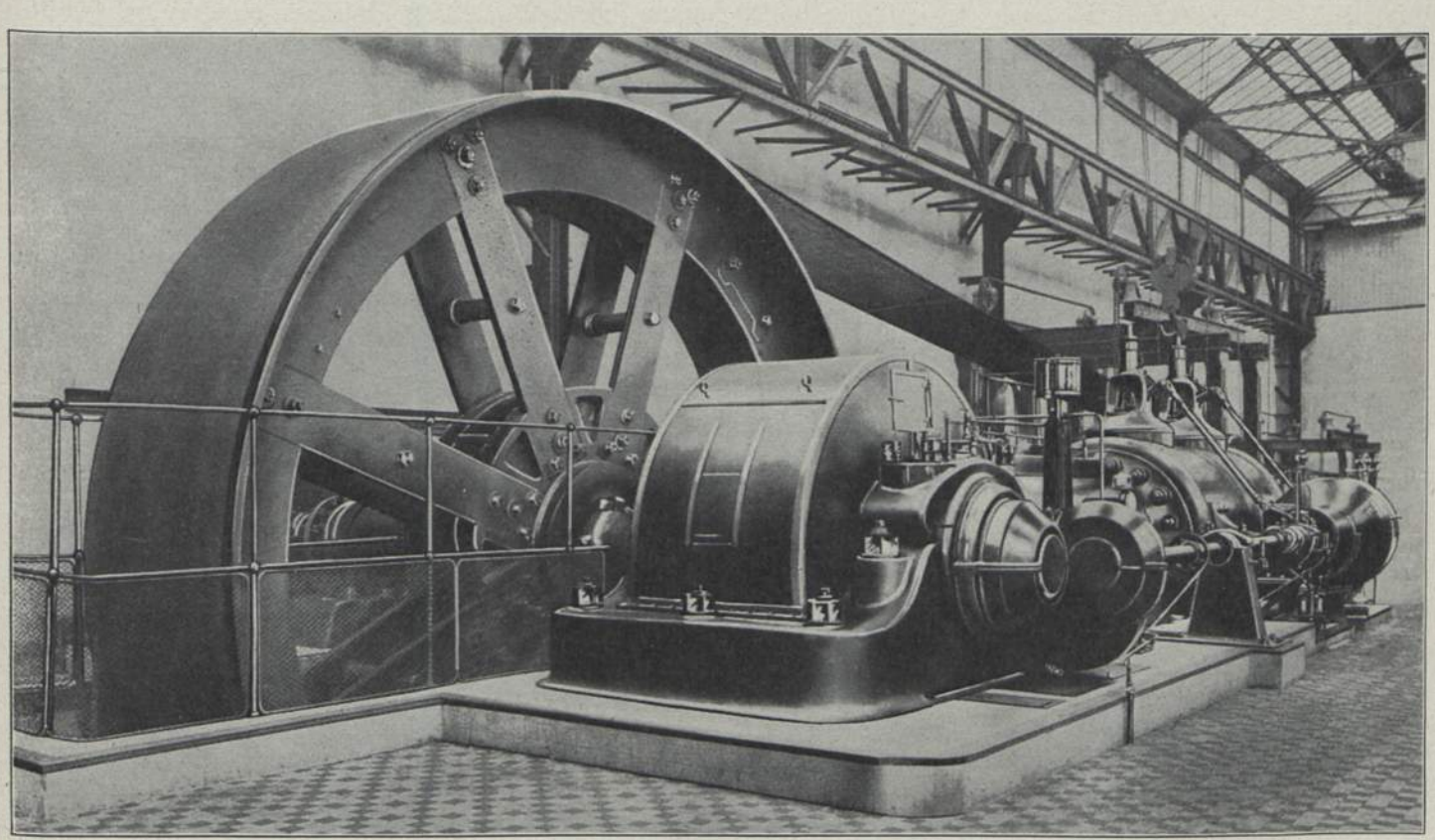


377. Blick auf die Steuerung der Gleichstrom-Dampfmaschine
Wumag, Görlitz

werden durch Schrauben zusammengehalten. So entsteht der Exzenter, eine Sonderform der Kurbel, die stets verwendet wird, wenn ein leichter Antrieb von einer durchlaufenden Welle abgeleitet werden muß, und die nur im Äußeren von der gewöhnlichen Kurbel abweicht.

Es ist ein Nachteil des Muschelschiebers, daß er die Kanäle des Zylinders allzu langsam oder, wie man sagt, schleichend öffnet. Dem einströmenden Dampf steht zunächst nur ein ganz schmaler Durchlaß zur Verfügung, der sich erst allmählich verbreitert. Es treten durch diese Drosselung des Dampfs empfindliche Verluste ein. Viele Hilfsmaßnahmen sind daher versucht worden, um bei unveränderter Exzenterbewegung ein rascheres Öffnen der Einströmkanäle durch den Muschelschieber zu bewirken. Am besten bewährt hat sich die Methode von Trick.

Maschine soll ja sowohl bei Leergang wie bei der schwersten zulässigen Belastung mit gleicher Umdrehungszahl laufen. Dies wird geschehen, wenn es gelingt, die bei jedem Kolbenhub in den Zylinder tretende Dampfmenge der Beanspruchung anzupassen. Mit anderen Worten: hat die Maschine wenig Arbeit zu leisten, dann ist der Punkt c des Diagramms auf Bild 336 weiter nach links zu rücken, das heißt die Einströmung früher zu beenden, die Expansion zu verlängern; bei schwerer Belastung muß der Punkt c nach rechts verlegt werden, damit mehr arbeitsfähiger Dampf in den Zylinder kommt. Man erkennt, daß durch diese Maßnahme die Energie, die der Maschine zugeführt wird, einmal kleiner, das andere Mal größer ist als während des Normalzustands, schon daran, daß hierbei die Diagrammflächen verkleinert oder vergrößert werden.



378. Gleichstrom-Walzenzugmaschine
Bauart Hunger. Leistung: 2000 PS. Demag, Duisburg

Hierbei ist nach Bild 354 in dem sonst unverändert bleibenden Muschelschieber ein Kanal ausgespart, der bewirkt, daß beim Öffnen eines Einströmrohrs der Dampf aus dem Schieberkastenraum an zwei Stellen gleichzeitig durchströmen kann. Hierfür ist es notwendig, daß der Schieberspiegel beiderseits nicht weit über die Ränder der Einströmkanäle hinausreicht. Es öffnet sich, wenn der Kanalschieber zum Beispiel nach rechts gehend mit seiner linken Kante gerade die Einströmung freigegeben hat, auch rechts ein Rohr, das eine Verbindung zwischen Schieberkastenraum und Zylinderraum herstellt. Der freigegebene Querschnitt wird auf diese Art stets verdoppelt. Die äußeren Überdeckungen sind, wenn sie auch baulich nicht mehr hervortreten, doch tatsächlich auch hier vorhanden.

Es wurde bereits erwähnt, daß die Anpassung der Maschinenleistung an wechselnde Beanspruchungen am besten durch Veränderungen des Füllungsgrads geschieht. Die

Keine andere Beeinflussung vermag die Maschinenleistung in so günstiger Weise zu regeln wie die Füllungsänderung. Denn diese bewirkt, daß nur immer gerade so viel Dampf verbraucht wird, wie notwendig ist. Nun haben wir gehört, daß beim Gebrauch eines Muschelschiebers Füllungsänderung leicht durch Verstellung des Voreilwinkels der Kurbel bewirkt werden kann. Aber wir sind uns auch klar darüber geworden, daß hierdurch gleichzeitig Vorausströmung und Kompression, und zwar in ungünstiger Weise, verändert werden. Will man also bei einer Maschine, die durch einen Muschelschieber gesteuert wird, die Möglichkeit der Füllungsänderung ausnutzen, so muß durch eine besondere Maßnahme verhindert werden, daß zugleich die anderen Diagrammpunkte wandern.

Dies kann nur durch eine bauliche Ausgestaltung der Muschelschiebersteuerung geschehen, die das Getriebe recht verwickelt macht. Das uns bekannte Organ ist zu ver-

größern und heißt nunmehr Grundschieber, ferner wird ein Dampfverteiler auf seinen Rücken gesetzt, der Expansionsschieber.

Auf Bild 356 sind die Kanäle im Zylinderkörper unverändert geblieben. Der Muschelschieber aber, jetzt unser Grundschieber, hat rechts und links je einen Ansatz erhalten, so daß auch in ihm zwei Kanäle entstanden sind. Der aufgelegte plattenförmige Expansionsschieber wird durch ein besonderes Exzenter gesteuert, das gegenüber dem Grundschieber-Exzenter um 90 Grad voreilt.

Die Wirkung der Innenkanten des Grundschiebers, A und B, bleiben unverändert. Sie bestimmen nach wie vor allein den Beginn von Vorausströmung und Kompression. Auch der Beginn der Einströmung auf beiden Seiten hängt nach wie vor von den Kanten C und D ab. Aber der Augenblick, in dem die Einströmung abgeschlossen wird, also die Expansion beginnt, wird von den Kanten E und F des Expansionsschiebers bestimmt.

Auf Bild 356 sind vier Stellungen der Grundschieber- und Expansionsschieberkurbeln sowie die zugehörigen Stellungen der beiden Schieber dargestellt. Auf Teilbild 1 steht der Grundschieber in der Mitte, der Expansionsschieber in seiner äußersten rechten Stellung. Wenn die Maschine sich nun weiter dreht, wandert der Grundschieber weiter nach rechts, während der Expansionsschieber bereits nach links geht.

Solange der Expansionsschieber eine zusammenhängende Platte ist, bleibt auch bei seinem Vorhandensein der Füllungsgrad der Maschine immer der gleiche. Beliebige Einstellung wird erst möglich, wenn man ihn in zwei verstellbare Platten teilt. Das ist auf Bild 355 geschehen. Der Abstand der beiden Innenkanten des geteilten Expansionsschiebers ist gleichgültig, sie haben keinen Einfluß auf die Dampfverteilung. Wohl aber wirken die Außenkanten entscheidend mit. Je weiter sie auseinander gerückt werden, desto kleiner wird die Füllung, je geringer ihre Entfernung voneinander ist, desto größer wird der Füllungsgrad, weil der Abschluß der Grundschieberkanäle dann immer später erfolgt.

Die Expansionsschieberstange ist nun mit zwei gegenläufigen Gewinden versehen. Dreht man an dem Handrad links in der Einen Richtung, so rücken die Platten zusammen, beim Drehen in der anderen Richtung werden sie auseinandergeschoben. Der Füllungsgrad ist also mittels des Handrads einstellbar, und die Veränderung kann auch während des Gangs der Maschine vorgenommen werden, da die Bewegungen der Expansionsschieberstange und damit des Handrads nicht allzu schnell und kurz sind.

Die Schieberanordnung dieser Art ist 1842 dem Besitzer einer Maschinenfabrik zu Mülhausen im Elsaß, dem Ingenieur J. Meyer, patentiert worden; sie führt daher den Namen Meyer-Steuerung (Bild 355).

Nun ist es aber natürlich höchst wünschenswert, daß die Einstellung des Füllungsgrads bei Änderung der Maschinenbelastung nicht von Hand vorgenommen werden muß, sondern von der Maschine selbsttätig besorgt wird. Nur in diesem Fall ist die Aufrechterhaltung der immer gleichen Umdrehungszahl gewährleistet. Bei Vornahme der Veränderung durch den Wärter würde es wohl oft geschehen, daß dieser erst beträchtliche Zeit nach dem Abschalten oder Zuschalten einer Last die Neueinstellung ausführte. Jede Maschine besitzt einen Regler, der alle Belastungsänderungen viel früher empfindet, als ein Beaufsichtiger sie merken würde. Gelingt es, den Regler so mit dem Expansionsschieber zu verbinden, daß er ihn in sinnvoller Weise zu bedienen vermag, dann paßt die Maschine von selbst ihre Leistung den Erfordernissen an, die Zahl ihrer Umdrehungen bleibt immer die gleiche.

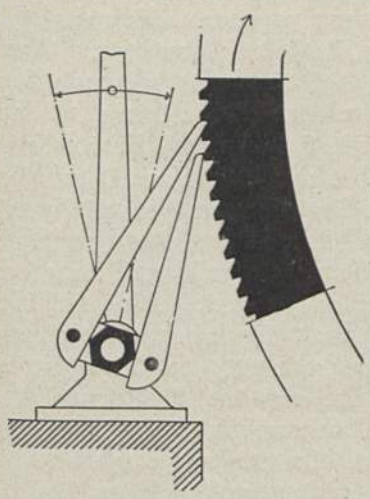
Die Meyer-Steuerung ist nun nicht geeignet, durch den Regler beeinflußt zu werden, da dieser nur verhältnismäßig schwache Kräfte zu äußern vermag, während die Drehung der Gewinde in den langen Muttern der beiden Expansionsschieberteile einen erheblichen Kraftaufwand erfordert.

Dem amerikanischen Ingenieur George Henry Corliß gelang es als erstem, selbsttätige Füllungseinstellung an einer Maschine einzurichten. Er ging bei der Konstruktion seiner Steuerung ganz neue Wege, hierbei freilich an Altes anknüpfend. Denn bei der Corliß-Steuerung finden wir wieder, wie einst an Watts Maschinen, vier Regelungsorgane, auf jeder Zylinderseite eins oben für die Einströmung und eins unten für die Ausströmung. Es werden aber nicht Ventile benutzt, sondern Schieber besonderer Art.

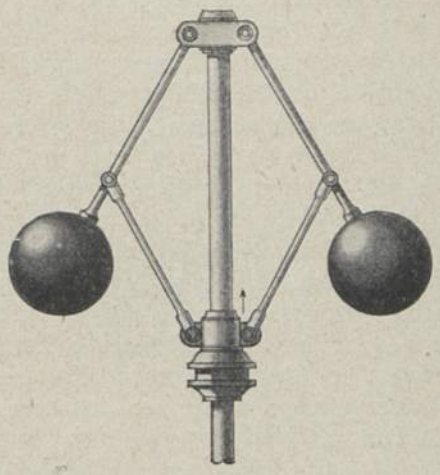
Zylindrische Flächen lassen sich bequemer und genauer bearbeiten als ebene. Deshalb ist es erwünscht, Schieber zu haben, die bei ihrer Arbeit nicht eine hin und her gehende, sondern eine Drehbewegung ausführen. Bei dem Schnitt durch den Zylinder einer Corliß-Maschine auf Bild 357 sehen wir vier Rundschieber in die vier Ecken des Zylinders, wenn man so sagen darf, eingesetzt. Sie werden durch Drehung je einer Welle bewegt, die bei der Darstellung links senkrecht zur Papierfläche steht. Der Einströmkanal links ist offen, der Ausströmkanal darunter geschlossen. Auf der rechten Seite ist das Umgekehrte dargestellt.

Das nächste Bild zeigt uns, wie die Steuerwellen angetrieben werden. Dies geschieht durch das Hin- und Herbewegen einer Steuerscheibe mittels einer Exzenterstange. Vier Lenker sind an der Steuerscheibe angebracht; die beiden unteren bewegen die Auslaßschieber ohne weiteres mittels Winkelhebeln. Bei den Einlaßschiebern aber ist noch je eine besondere Vorrichtung eingeschaltet, die auf Bild 358a nicht gezeichnet ist. Bei den Dampfeinlässen geschieht nur das Öffnen durch die Lenker, das Schließen wird durch Gewichte besorgt. Der Abschluß und damit der Beginn der Expansion tritt ein, sobald der Lenker von dem Winkelhebel abgedrückt wird, der die Steuerwelle seines Einlaßschiebers bedient. Corliß gelang es nun, diesen Augenblick der Abdrückung, also der Freigabe des Einlaßschiebers für das Schließen, vom Regler abhängig zu machen.

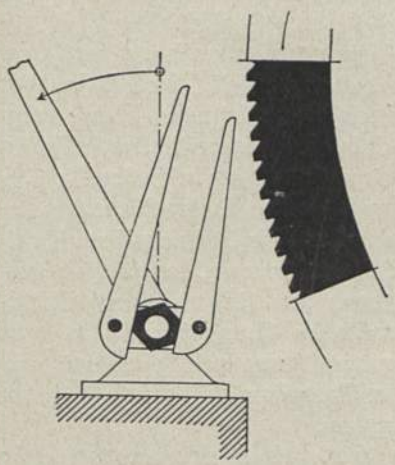
Auf Bild 358b, das nur die rechte Zylinderseite darstellt, ist das Arbeiten der Einlaßsteuerung genau zu erkennen. A ist die Steuerscheibe, B der Exzenterarm, der sie hin und her bewegt. Bei C sitzt die Steuerwelle für den Einlaßschieber, die mittels des Winkelhebels D bewegt werden kann. Dieser Winkelhebel trägt einen senkrecht zur Papierfläche hinausragenden Zapfen E, gegen den sich der Lenker F mit einem Ansatz G legt. Das Öffnen des Einlaßschiebers geht zunächst gerade so vor sich, als wenn der Winkelhebel D mit dem Lenker F fest verbunden wäre. Bei der Öffnungsbewegung, d. h. bei der Drehung der Steuerscheibe in der Pfeilrichtung, hebt der Lenker aber auch eine Stange H an, die hierbei gegen den Keil J stößt. Die Höhe, zu welcher der Lenker beim Gang der Steuerscheibe in der Pfeilrichtung aufsteigen kann, ist hierdurch begrenzt. Der Lenker drückt durch den Ansatz G den Zapfen E des Winkelhebels immer höher, bis der Ansatz schließlich von dem Zapfen abschnappt. Nun wird der Winkelhebel D durch ein Gewicht, das an der Stange K hängt, hinabgezogen,



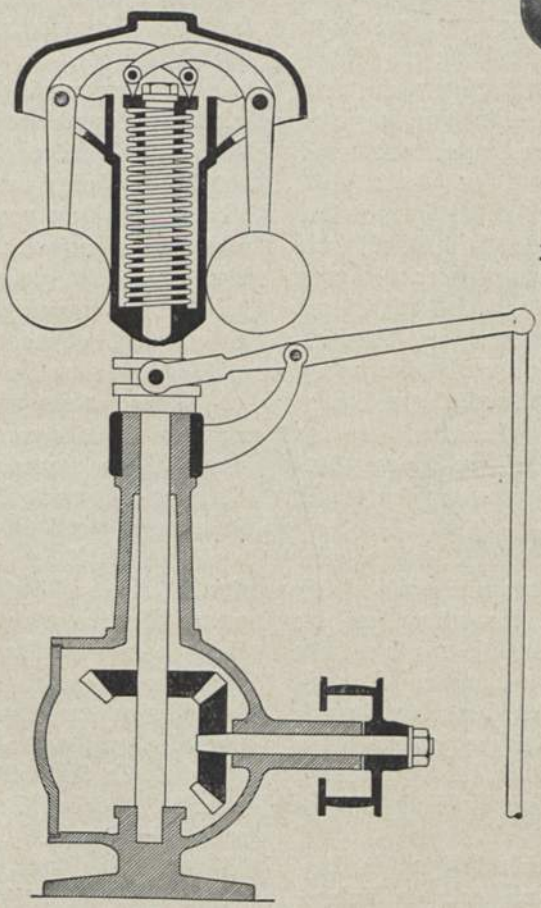
379a. Andrehvorrichtung Eingriffstellung des linken Schaltarmes



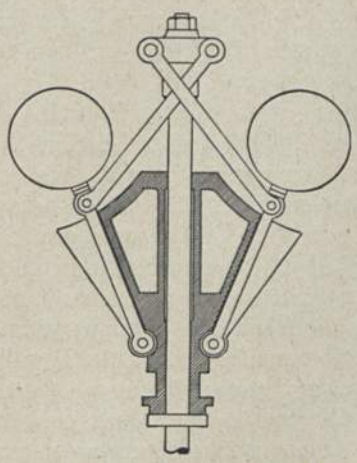
380. Einfacher Schwungkugelregler, wie ihn bereits Watt benutzte



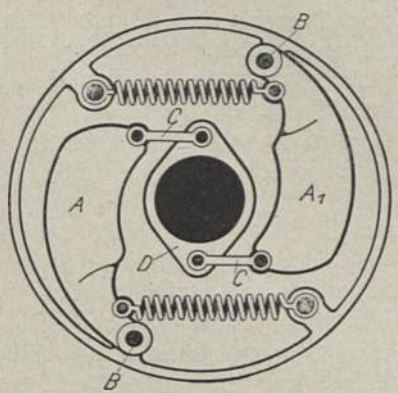
379b. Andrehvorrichtung Freistellung



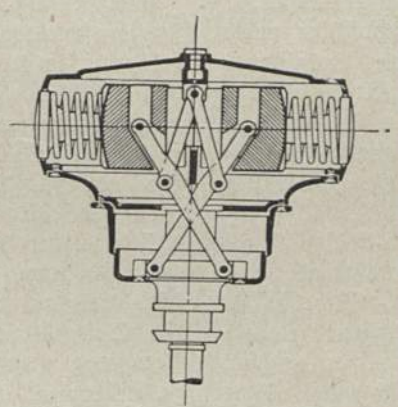
381. Schwungkugelregler mit zylindrischer Spannfeder



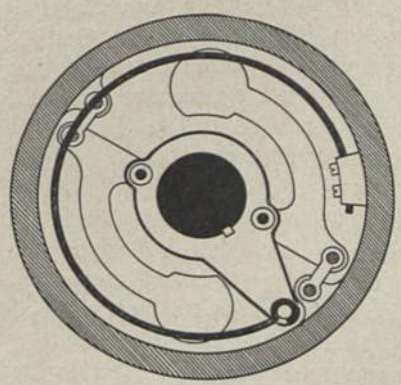
382. Schwungkugelregler mit Gegengewicht




383. Flachregler mit zwei Federn, sogenannter Achsenregler



384. Regler mit zylindrischen Federn von Steinle und Hartung



385. Lentz-Beharrungsregler mit kreisförmiger Biegungsfeder

der Drehschieber schließt ab. Durch die Feder L, die sich beim Abschnappen des Lenkers spannt, wird dieser beim Rückgang des Exzenters und damit der Scheibe A rasch wieder in die gezeichnete Stellung zurückgeführt.

Offenbar ist die Abschnappstelle und damit das Abschließen der Einströmung abhängig von der Stellung des Keils J. Je weiter dieser nach rechts verschoben wird, desto früher endet die Einströmung. Corliß brachte nun die Stange M, auf welcher der Keil befestigt ist, in Verbindung mit dem Regler. Sobald die Maschine entlastet wurde und rascher zu laufen begann, schob der Regler den Keil nach rechts, die Maschine erhielt geringere Füllung und ging wieder auf die normale Drehzahl zurück. Beim Ansteigen der Belastung, wenn also die Maschine langsamer zu laufen begann, wurde der Keil vom Regler weiter nach links verlegt.

Um ein allzu geschwindes, stoßartiges Schließen des Einlaßschiebers zu verhindern, war das Belastungsgewicht des Winkelhebels D zylindrisch, als Kolben, ausgebildet und in einen Zylinder gesetzt. Beim Aufsteigen saugte das Gewicht durch die kleine Öffnung N, deren Querschnitt durch eine Schraube verändert werden konnte, Luft an, die beim Niedergehen als Puffer wirkte, weil sie sich nur langsam hinausdrängen ließ.

Durch diese Einrichtung war eine Wunderwirkung erreicht. Die Maschine maß sich selbst, als besäße sie Überlegung, die Kraft zu, die der von ihr verlangten Arbeit angepaßt war.

„Die ihren Gang selbsttätig regelnde Dampfmaschine gewann", so schreibt Matschoß, „naturgemäß für solche Fabrikationszweige zunächst die größte Bedeutung, wo die Ungleichmäßigkeit des Gangs einen Einfluß auf die Güte der mit ihrer Hilfe erzeugten Waren ausübte. Das ist der Fall bei Spinnereien und Webereien, deren Erzeugnisse ihrem Wert nach von dem mehr oder weniger großen Gleichgang der Maschinen abhängig sind. Es war daher für Corliß äußerst vorteilhaft, daß die Textilindustrie in seiner nächsten Umgebung große Bedeutung hatte.

„Aber wie es einst Watt bei den Grubenbesitzern in England ergangen war, so erging es hier Corliß mit den Spinnereibesitzern, die zwar schon längst sich eine gleichmäßig gehende Betriebsmaschine sehnlichst gewünscht hatten, der neuen Maschine aber nicht trauten, da sie so sehr viel komplizierter war als ihre Vorgängerinnen. Um sie einzuführen, mußte Corliß ebenso wie Watt seine Verbesserungen zuerst kostenlos anbringen und sich aus der Kohlenersparnis, die sich durch seine Expansionssteuerung erreichen ließ, bezahlt machen.

„Im Februar 1850 kam die erste Corliß-Maschine unter derartigen Bedingungen in Betrieb. Andere Ausführungen folgten bald nach, die alle an Regelmäßigkeit des Gangs und geringem Kohlenverbrauch das bis dahin Erreichte bei weitem übertrafen. Diese Erfolge, durch einwandfreie Fachleute festgestellt, begründeten den Ruf der neuen Maschinen und ihres Erfinders.

„Das glänzende Geschäft, das durch die allseitige Nachfrage nach den Corliß-Maschinen in Aussicht stand, veranlaßte auch hier, wie seinerzeit bei Watt, Eingriffe in die Patentrechte. Viele suchten die Corliß-Maschinen einfach nachzubauen oder das Patent mehr oder weniger geschickt zu umgehen. Aber wie Watt in Boulton ein scharfsichtiger Geldmann zur Seite stand, so Corliß in seinem Teilhaber Nightingale. Nachdem die Firma Corliß & Nightingale über 100 000 Dollar für Patentprozesse ausgegeben hatte, war der Schutz des Patents vor unbefugten Übergriffen endgültig erreicht. Von da an entwickelte sich die von Corliß und Nightingale 1844 in Providence gegründete Maschinenfabrik zu ungeahnter Größe. Jede Ausstellung brachte neue Anerkennungen und sorgte dafür, daß die damals fast unglaublich klingenden Resultate immer weiteren Kreisen bekannt wurden.

„Die größte und berühmteste Präzisionsmaschine, die Corliß selbst noch erbaute — er hat nur Balanciermaschinen hergestellt — lief 1876 auf der Ausstellung zu Philadelphia und erregte durch ihre riesigen Abmessungen, ihre gewaltigen Leistungen und ihren ruhigen, gleichmäßigen Gang die staunende Bewunderung der ganzen Welt. Diese prächtige Corliß-Maschine, der Mittelpunkt der ganzen Ausstellung, war für eine normale Leistung von 1200 bis 1400 Pferdestärken bestimmt, wurde aber auf der Ausstellung zum Antrieb der ausgestellten Arbeitsmaschinen mit nur etwa 600 Pferdestärken ausgenutzt. Am Eröffnungstag wurde die mächtige Maschine vom Präsidenten der Vereinigten Staaten durch Druck auf einen Knopf ‚elektrisch' in Bewegung gesetzt, was nicht geringes Aufsehen erregte, sich aber nach Jahren als harmloses Vergnügen herausstellte. Das Ingangsetzen der Maschine war durch wohlgeschulte Maschinisten erfolgt, die unten im Fundament, den Blicken der staunenden Menge verborgen, ihres Amts walteten, sobald sie von dem Staatsoberhaupt auf elektrischem Weg das Signal hierzu erhalten hatten."

Derartige fromme Täuschungen sollen wohl auch noch heute vorkommen, wenn es sich darum handelt, einen äußerlichen, technischen Effekt der hierfür sehr empfänglichen Menge vorzuführen. Solche Mätzchen sind aber verwerflich, weil sie den inneren Wert des gezeigten Gegenstandes arg beschatten. Bild 360 zeigt eine moderne Dampfmaschine mit Corliß-Steuerung.

Eine vorzügliche, durch ihre Einfachheit überraschende Verbesserung der Meyer-Schiebersteuerung, welche diese leicht einstellbar machte, wurde dann von Rider (sprich Reider) ersonnen. Er läßt die Kanäle im Grundschieber nicht mehr senkrecht zu dessen Bewegungsrichtung nach oben austreten, sondern legt sie schräg. Der Expansionsschieber erhält die auf Bild 361 dargestellte Trapezform.

Nach wie vor wird er durch seinen Exzenter von rechts nach links und umgekehrt bewegt. Es ist aber offenbar, daß der Füllungsgrad immer kleiner wird, je mehr man den Expansionsschieber nach oben hinauf rückt. Denn dann kommen die steuernden Kanten den Kanälen im Grundschieber immer näher und überdecken diese früher. Hinabrücken des Trapezes vergrößert den Füllungsgrad.

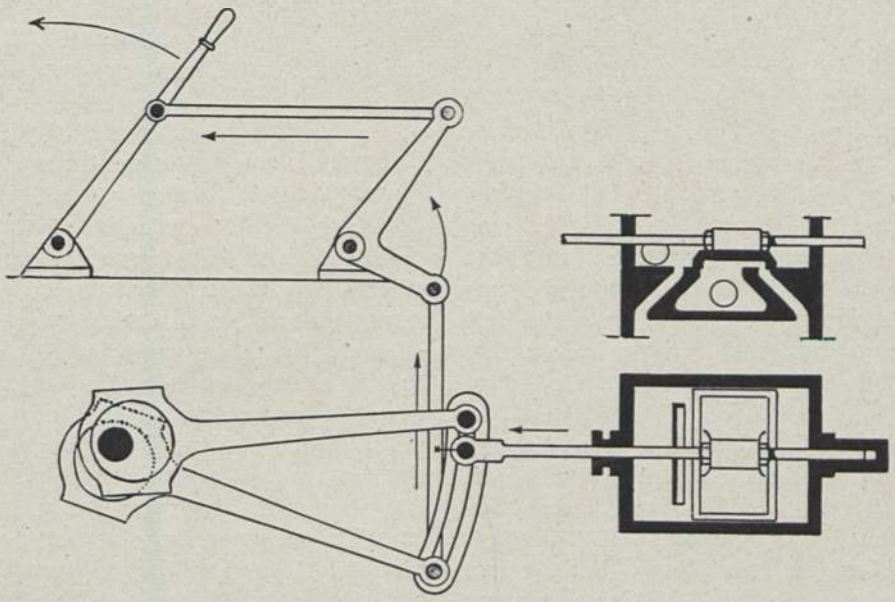
Ganz besonders bequem wird diese Einstellung des Expansionsschiebers, wenn die Oberseite des Grundschiebers, auf der er gleitet, nicht mehr eben, sondern gerundet ist. Um Änderung des Füllungsgrads zu bewirken, braucht man alsdann nur die Antriebstange des Expansionsschiebers um ihre eigene Achse zu drehen, so wie es der gekrümmte Pfeil auf Bild 362 anzeigt. Diese Bewegung kann leicht durch den Regler besorgt werden.

Alle bisher besprochenen Schieber, einschließlich der sich drehenden von Corliß, haben den Nachteil, daß sie einseitig belastet sind. Der Frischdampf preßt sie stark auf den Spiegel nieder. Hierdurch wird die Reibung bei der Bewegung sehr stark, die Exzenter haben mehr Arbeit zu leisten, als an sich nötig wäre. Schwierige Umführungen des Dampfs, die seinen Druck auch von unten her wirken lassen sollten, sind früher versucht worden.

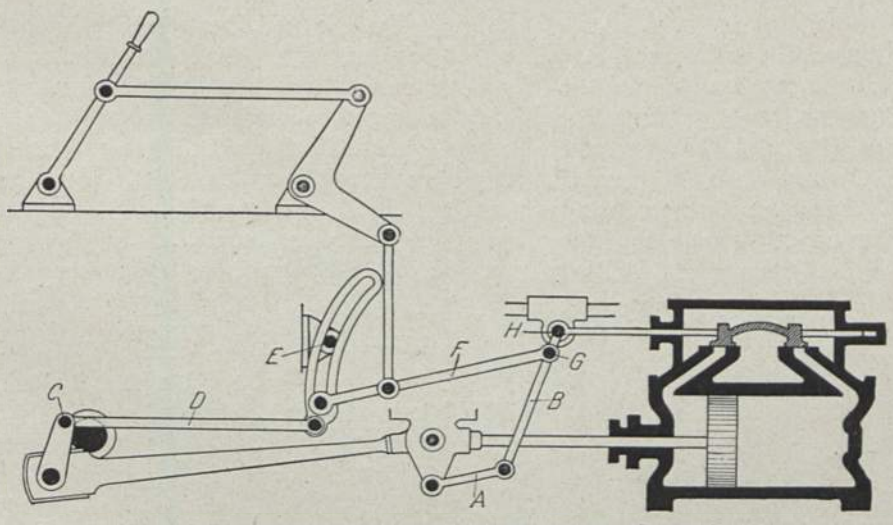
Die einseitige Belastung verschwindet jedoch am gründlichsten, wenn man an Stelle der Platte einen Kolben aus-

bildet. Den Kolbenschieber (Bild 363) kann man sich dadurch entstanden denken, daß die Querschnittform des einfachen Muschelschiebers um eine Achse herumgedreht ist, die der Bewegungsrichtung des Schiebers parallel liegt. Wenn nun auch die drei Kanäle im Zylinderrücken kreisförmig herumgeführt sind, so hat sich doch für die Leitung des Dampfs nichts geändert. Alle Drücke wirken aber jetzt allseitig auf den Schieber, er wird in keiner Richtung stärker gegen das Gehäuse gepreßt als in einer anderen.

Besonders günstig wirkt die Kolbenform des Schiebers bei Betrieb der Maschine mit sehr hoch erhitztem Dampf. Dieser verursacht, wieder infolge der einseitigen Berührung, leicht ein Verziehen der Körper von Flachschiebern, während die Dehnung der Kolbenschieber gleichmäßig ist. Um den Heißdampf von den Stopfbüchsen des Schieberkastens möglichst fernzuhalten, trifft man bei Heißdampfmaschinen die Anordnung meist so, daß die Lagen der Ein- und Ausströmrohre gegenüber ihrer bisherigen Anordnung vertauscht sind (Bild 364, innere Einströmung im Gegensatz zur äußeren, mit der wir es bislang zu tun hatten). Der Frischdampf tritt also nicht vor den beiden Stirnflächen des Kolbenschiebers ein, sondern zwischen den steuernden Ringen. An den Stopfbüchsen vorbei geht der kältere expandierte Dampf. Selbstverständlich muß jetzt die Exzenterkurbel eine andere Lage zur Hauptkurbel haben als früher. Kolbenschieber werden besonders häufig zur Steuerung von Lokomotiven und Lokomobilen benutzt. Eine neuzeitliche Kolbenschieber-Dampfmaschine ist in Bild 365 dargestellt.



386. Umsteuerung nach Stephenson




387. Umsteuerung von Heusinger von Waldegg

In den letzten Jahrzehnten des vorigen Jahrhunderts ist die Technik der Dampfmaschinensteuerung zu dem Gerät zurückgekehrt, das sie in ihrer frühesten Jugend bevorzugt hat. Gerade die stärksten Maschinen und solche, von denen hohe Gleichmäßigkeit des Gangs verlangt wird, werden nun wieder mit Ventilen als Dampfverteilungsorganen ausgerüstet. Was zu Watts Zeiten ein Notbehelf gewesen war, ist jetzt bestwirkendes Werkzeug. Man hat gelernt, die Ventile und ihre Antriebe so zu bauen, daß mit ihrer Hilfe eine äußerst genau arbeitende Steuerung entsteht. Sie mißt der Maschine in jedem Augenblick aufs sorgfältigste die Dampfmenge zu, die sie gerade braucht, denn dem Regler ist bei der Ventilsteuerung eine besonders rasche und tiefgreifende Einwirkung möglich. Bei jeder Umdrehung der Maschine beinahe bestimmt er den geeigneten Füllungsgrad. Durch diese Genauigkeit der Einregelung ist die Dampfverteilung mittels Ventilen allen anderen Steuerungsarten überlegen. Nur sie allein stellt eine Präzisionssteuerung dar.

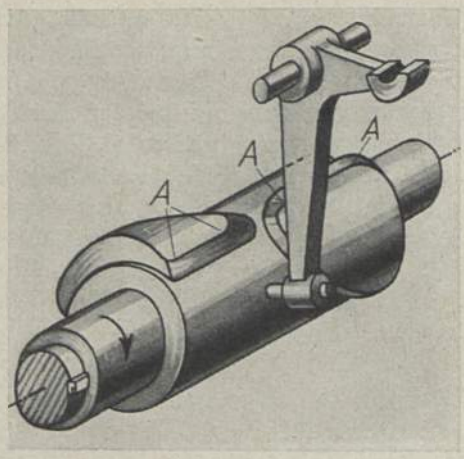
Das Ventil vermag nur einen Durchgang zu öffnen oder zu schließen, es kann nicht Dampfwege umlegen. Aus diesem Grund gehören zur Bedienung eines doppeltwirkenden Zylinders stets vier Ventile. Oben und unten wird je eines angebracht, die oberen sind die Einlaß-, die unteren die Auslaßwerkzeuge. Da jedes der Ventile unabhängig von dem anderen bewegt werden kann, so ergibt sich ohne weiteres die Möglichkeit, die Füllung der Maschine beliebig zu ändern, ohne daß hierdurch die anderen Diagrammpunkte beeinflußt werden.

Günstig ist es, daß die Verschlüsse ganz dicht am Arbeitsraum des Zylinders liegen können. Es fällt hierdurch die Vergrößerung des „schädlichen Raums" weg, die bei der Schiebersteuerung durch die niemals ganz kurzen, zum Schieberspiegel laufenden Kanäle entsteht. Ferner sind die Dichtungsstellen einer nur geringen Abnutzung unterworfen, sie brauchen nicht geschmiert zu werden und schließen vollkommen ab, während es bei Schiebern doch leicht vorkommen kann, daß kleine Dampfmengen verbotene Wege wandern.

Es ist aber für die Betätigung der Ventilsteuerung fast stets ein recht verwickeltes Getriebe notwendig, eine Vielzahl von Exzenterstangen, Stänglein und Klinken, deren Anblick verwirrend genug ist, wenn man sie zum ersten Mal an einer laufenden Maschine durcheinanderarbeiten sieht. Erst in neuster Zeit ist man auch hier zu wohltuender Vereinfachung gelangt.

Eine Vielteiligkeit des Antriebs ergibt sich schon durch die Einzelbedienung jedes der vier Ventile. Dann aber ist weiter dafür zu sorgen, daß sie sehr geschwind öffnen

und schließen und doch langsam angehoben und vorsichtig niedergesetzt werden. Würden sich auch der Beginn und das Ende der Ventilbewegung schnell vollziehen, dann entstünden durch die rasche Beschleunigung und Verzögerung der Ventilkörpermassen harte Stöße, die rasche Zerstörung verursachen würden. Der Antrieb muß folglich so durchgebildet sein, daß er jede Bewegung sacht anfängt und sacht beendet, während er sich dazwischen äußerst geschwind bewegt.




388. Umsteuerung für durch Nocken gesteuerte Ventile

Bedenkt man, daß Ventile bei schnell laufenden Maschinen in der Minute 120 oder 150 mal angehoben und niedergesetzt werden, so ist es klar, daß ihre richtige Bedienung nicht ganz einfach zu bewirken ist. Außerdem muß das Gestänge dem Regler gestatten, den Augenblick des Schließens der Einlaßventile und damit den Beginn der Expansion bald früher, bald später zu legen, während der Beginn der Einströmung, also die Voreinströmung, stets bei derselben Kolbenstellung zu erfolgen hat.

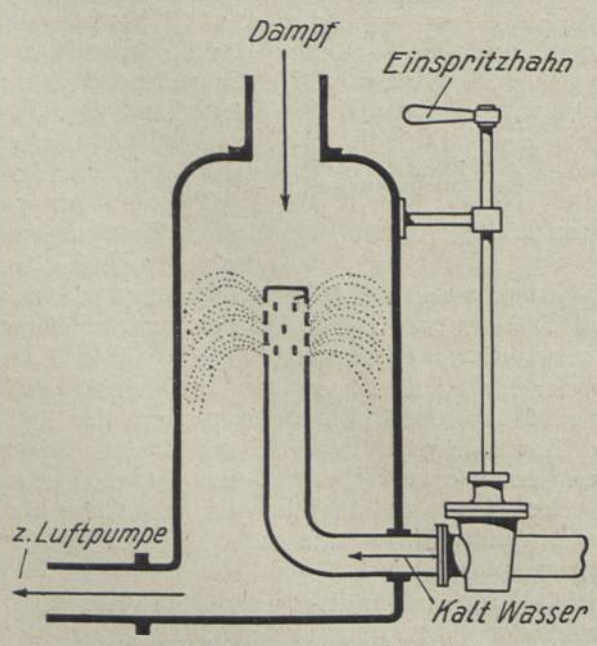
Es ist die Aufgabe jedes Einlaßventils, den Arbeitsraum des Zylinders im gegebenen Augenblick mit dem Frischdampfraum in Verbindung zu bringen, in den das vom Kessel herkommende Rohr mündet. Die Auslaßventile haben zu passender Zeit dem Dampf den Austritt freizugeben. Man verwendet heute fast stets Rohrventile mit mehreren Sitzen. Sie sind aus hartem Gußeisen gebildet.

Das ursprüngliche Rohrventil von Hornblower ist auf Bild 346, Seite 198, dargestellt, die heute meist übliche Form mit zwei Sitzen zeigt Bild 366. Das geöffnete Ventil gibt dem Dampf einen breiten Weg frei, da er sowohl durch das Innere des Rohrs strömen kann, in dem sich nur einige schmale Stützarme oder Rippen befinden, wie auch um das Rohr herumzugehen vermag. Es kann also bei geringer Hubhöhe rasch eine große Dampfmenge hindurchtreten, was bei den heutigen hohen Umdrehungszahlen dringend notwendig ist. Die Durchströmungs-Querschnitte sind beim Gebrauch viersitziger Ventile (Bild 367), also bei Anwendung zweier übereinanderliegender Organe, noch weiter. Sie werden zur Steuerung ganz großer Maschinen angewendet.

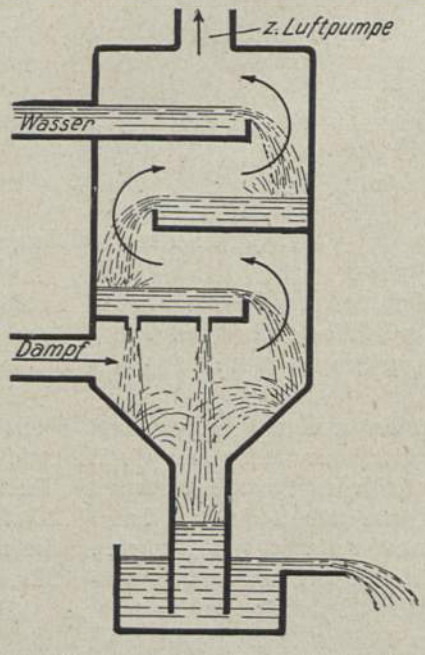
Sowohl die einlassenden wie die auslassenden Organe öffnen nach oben. Die ersten bewegen sich also beim Aufgehen vom Zylinderinnenraum fort, die anderen gegen diesen hin. Hierdurch wird erzielt, daß beide Male der höhere Dampfdruck schließend wirkt. Außerdem haben kräftige Federn stets das Bestreben, die Ventile auf ihre Sitze niederzudrücken.

Während die Auslaßventile vom Antrieb sowohl angehoben wie niedergesetzt werden, so daß jede ihrer Bewegungen von der Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine abhängt, kommt es bei den Einlaßventilen häufig vor, daß sie unter dem Druck ihrer Federn frei niederfallen. Eine Puffervorrichtung, ein kleiner Zylinder, in dem der niedergehende Kolben eingedrungene Luft oder eingesaugtes Öl nur langsam verdrängen kann, bewirkt Minderung des Stoßes beim Auftreffen auf den Sitz. Bei solcher Anordnung ist dafür zu sorgen, daß der hebende Gestängeteil rechtzeitig vom Ventilkörper abschnappt. Den Augenblick dieser Freigabe bestimmt der Regler, der auf diese Art die Füllungsdauer beeinflußt.

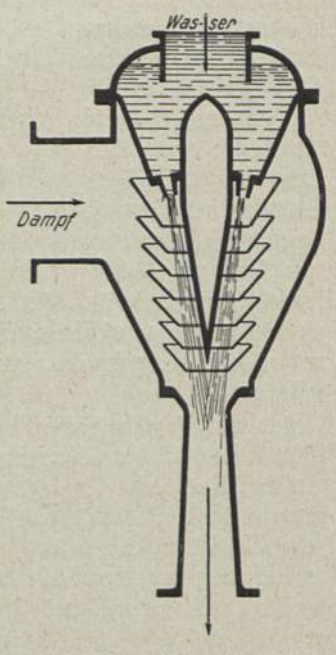
Beinahe jede Dampfmaschinenfabrik benutzt einen Antrieb besonderer Art für die Bedienung der Ventile. Ein übergroßer Segen von Einzelkonstruktionen, die alle besondere Vorzüge haben sollen, ist auf dieses Gebiet niedergegangen. Gleichartig bei allen ist die Ableitung der Gestängebewegung von der Hauptwelle der Maschine. Eine dünnere Welle liegt rechtwinklig zu dieser neben dem Zylinder und parallel zu dessen Achse. Ein Kegelrad, das auf der Hauptwelle sitzt, greift in ein zweites Kegelrad am Kopf der




389. Einfacher Einspritz-Kondensator



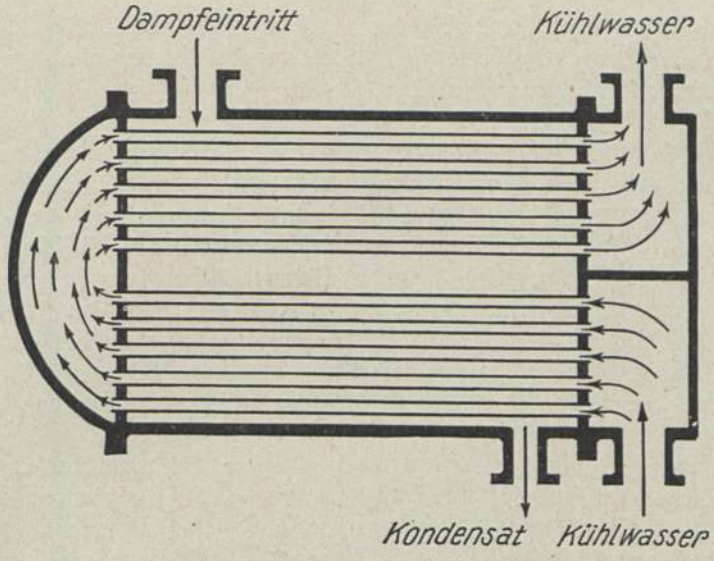

390. Einspritz-Kondensator mit Kaskaden




391. Strahlkondensator

Steuerwelle ein, die sich also mitdrehen muß. Exzenter oder unrunde Scheiben auf der Steuerwelle wandeln deren Drehbewegung in hin und her gehende, wie das Ventilgestänge sie braucht (Bild 368).

In der Hauptsache sind drei Antriebarten für Ventilsteuerungen zu unterscheiden, und zwar danach, ob die Einlaßventile völlig frei niedergehen, ob sie vom Antrieb auch beim Niedergang geführt werden, ohne mit ihm in fester Verbindung zu stehen, oder ob sie mit diesem dauernd fest verbunden sind. Im ersten Fall spricht man von Ausklink- oder Freifall-Steuerungen, im zweiten von halbzwangläufigen, die dritte Gattung wird zwangläufige Steuerung genannt. Die folgenden vier Beispiele werden eine ausreichende Anschauung über die verschiedenen Möglichkeiten des Ventilantriebs geben.

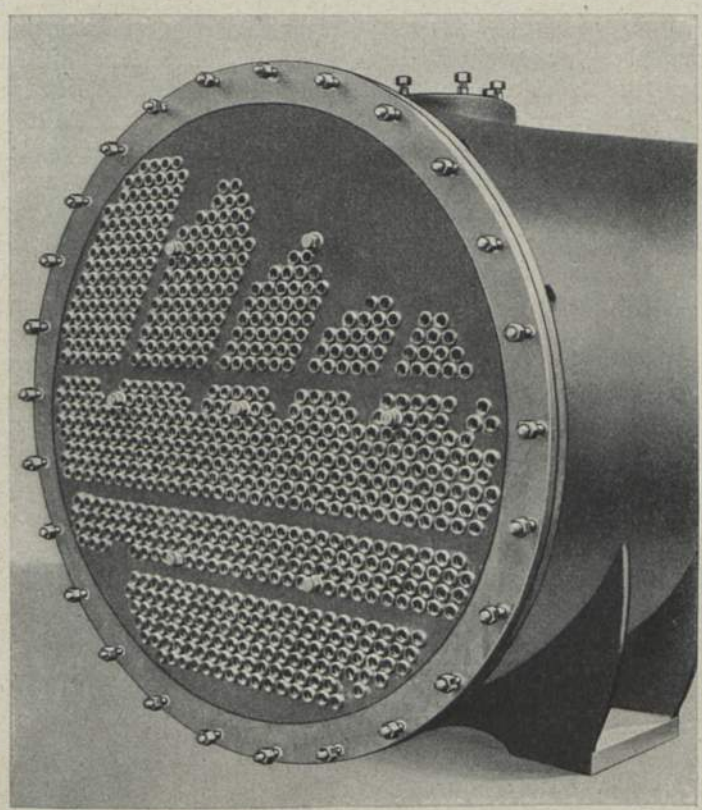



392. Schnitt durch einen Oberflächen-Kondensator

Wir besprechen zuerst eine Ausklink-Steuerung, die in der bedeutenden Dampfmaschinenfabrik von Gebrüder Sulzer zu Winterthur in der Schweiz entwickelt worden ist. Sie heißt daher Sulzer-Steuerung (Bild 368).

Wir haben auf Bild 369 einen Schnitt durch den Zylinder, der einen Dampfmantel besitzt, und durch die Ventile der einen Zylinderseite vor uns. Die eigentlichen Ventilkörper sitzen in sogenannten Ventilkörben, von deren unteren Teilen Zugänge zu dem Zylinderinneren führen. Bild 368 stellt die Sulzersteuerung schematisch dar. Rechts, gegenüber der Zylindermitte, erscheint die Steuerwelle als ein schraffierter Kreis. Darauf sitzen ein Exzenter und eine unrunde Scheibe, deren Form punktiert hinter dem Exzenter angegeben ist. Wenn die Steuerwelle sich dreht, hat die unrunde oder Nocken-Scheibe das Auslaßventil stets geöffnet, sowie sie in eine Stellung gelangt, die zu der gezeichneten um 180 Grad versetzt ist. Alsdann wurde nämlich die Stange A, an deren oberem Ende sich eine Rolle befindet, niedergedrückt und mit ihr der rechte Arm des Winkelhebels B. Das Schließen des Auslaßventils erfolgt bei weiterer Drehung unter Federdruck durch Entlanggleiten der Hebelrolle an der Wange der Nockenscheibe. Hierdurch wird die Geschwindigkeit der Ventilbewegung am Auslaß in jedem Augenblick bestimmt. Das Exzenter bewegt zunächst die Stange C, deren oberes Ende hierbei um den Zapfen 1 schwingt, mit dem es durch D verbunden ist. Die Klinke E, die gleich dem Ende der Stange C auf dem Zapfen 2 sitzt, macht die Bewegung mit. Das linke Ende dieser Klinke wird aber vom Exzenter noch besonders durch die Stange F angetrieben. Die Bewegung der Klinke E erfolgt so, daß ihre Unterkante stets während eines Teils der Exzenterbewegung, wenn nämlich die Stangen C und F abwärts gehen, mit dem Hebel G in Verbindung ist, der um den Zapfen 1 gedreht werden kann. Der linke Arm des Hebels G wird gehoben und öffnet das Ventil. Der Zapfen 3 kann vom Regler um die eigene Achse geschwenkt werden. Er bewegt alsdann den Stangenzug H J K, also auch die Stange F, und bestimmt so die Zeit, während der die Klinke E mit dem Winkelhebel G in Verbindung bleibt. Läuft die Maschine zu rasch, dann rückt das Gestänge H J K nach links, der untere Arm der Klinke E wird weiter nach rechts gedreht, sie schnappt früher von dem Winkelhebel G ab, das Ventil kann zeitiger durch seine Feder niedergedrückt werden, die Füllung ist kleiner.

Die Collmann-Steuerung, die in ihrer vortrefflichen Ausbildung durch die Görlitzer Maschinenbau-Anstalt weite Verbreitung erlangt hat, ist halbzwangläufig. Das Einlaßventil wird vom Gestänge gehoben, es geht alsdann, und zwar unter Federdruck, nieder, aber die Geschwindigkeit dieser Bewegung wird vom Gestänge bestimmt. Hierdurch ist es möglich, eine sehr kräftige Schließfeder anzuwenden, während diese bei freifallenden Ventilen nicht allzu stark sein darf, damit nicht trotz des Puffers der Aufstoß auf den Sitz zu hart wird.



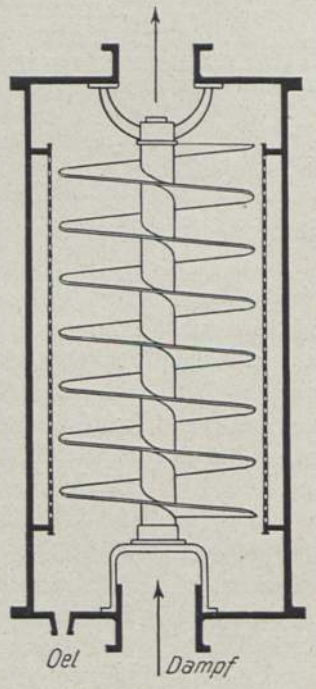
393. Oberflächen-Kondensator mit abgenommenem Deckel
Brown, Boveri & Cie, Mannheim

Auf Bild 370 sehen wir, daß die Bewegung des Auslaßventils, das selbst nicht dargestellt ist, unmittelbar vom Exzenter durch die Stange A abgeleitet wird. Die nach oben gerichtete Exzenterstange B wirkt durch den fest an ihr angebrachten Zapfen C auf den zweiarmigen Hebel C D E. Dessen Endpunkt E bewegt durch den Kniehebel E F G den Hebel G F, dessen obere Fläche gewölbt ist. E F G hebt beim Aufwärtsgehen mittels des Hebels $G F_1$, der um $F_1$ schwingt, die Stange H J, die sich um den Zapfen H dreht und bei J das Ventil aufstößt.

Wenn die Exzenterstange B nach oben geht, senkt sich der Arm D E und damit auch E F G. Das Ende G des Hebels G $F_1$ geht gleichfalls hinunter. Die Feder drückt jetzt das Ventil zu, kann aber nicht geschwinder wirken, als G F es gestattet. Da der Rücken von G $F_1$ gewölbt ist, so schiebt sich während des Niedergangs der Berührungspunkt zwischen H J und G $F_1$ immer näher an $F_1$ heran. Wenn das Ventil dem Sitz nahe kommt, ist der wirkende Teil von H J dicht an F gerückt, also sehr kurz, das Ventil wird sanft niedergesetzt. Aus dem gleichen Grund erfolgt langsames Öffnen, während beim weiteren Aufwärtsgehen von E F die Geschwindigkeit des Anhebens sich steigert.

Der Punkt G würde sich stets ebenso bewegen wie der Punkt E, wenn E F G eine starre Stange wäre. Es greift aber bei F auch die Stange K F an, die gleichfalls von der Exzenterstange B bewegt wird. Sie drückt das Gelenk bei F mehr oder weniger stark nach links durch, und zwar richtet sich die Größe des Knickwinkels nach dem Stand der Muffe, in die der Zapfen K eingelassen ist. Diese Muffe kann auf der Exzenterstange B auf und nieder gleiten. Die seitliche Bewegung von K F und damit die Durchdrückung von E F G ist sehr groß, wenn die Muffe weit oben steht, klein, wenn die Muffe unten ist. Bei hochstehender Muffe wird H J hoch emporgehoben, bei untenstehender Muffe ist der Anhub geringer. Hierdurch wird der Füllungsgrad verändert.

Die Stellung der Muffe ist nun vom Regler abhängig. Dieser schwenkt mittels der Stange L den Hebel M N und damit auch den Hebel N O. Die Stange O P schiebt nach dem Stand des Reglers die Muffe auf der Exzenterstange B hinauf und hinab.



394. Ölabscheider

Wälzungsflächen bewirken auch bei der zwangläufigen Radovanovic-Steuerung sanftes Anheben und Aufsetzen der Ventile sowie schnelle Mittelbewegungen. Hier stehen die Flächen jedoch fest (Bild 371). Das Exzenter bewegt wieder unmittelbar durch die Stange A das Auslaßventil. Der Hebel B schwingt hierbei auf der Wälzungsfläche, und der Auflagepunkt liegt beim Anheben und Aufsetzen unweit der Ventilspindel, während er dazwischen weiter von der Mittellinie des Ventils entfernt ist.

In den Exzenterbügel ist eine Scheibe C eingelagert, die um den Zapfen D schwingt.

Wir nehmen zunächst an, daß das Gleitstück, oder wie man sagt, der Stein, in dem der Zapfen D liegt, fest steht, und die Lage des Schlitzes in der Scheibe C unverändert bleibt. Dann macht das rechte Ende der Exzenterstange stets die gleiche auf und nieder gehende Bewegung, die sich auf die Stange E überträgt. Das Ventil wird mittels des Hebels F, der die Wälzungsfläche berührt, geöffnet und geschlossen. Die Hubhöhe des Exzenterstangenendes und damit der Stange E ändert sich, wenn entweder das Gleitstück mit dem Zapfen D verschoben oder die Scheibe C gedreht wird, so daß die Lage ihres Schlitzes eine andere wird. Die eine oder die andere dieser Bewegungen wird vom Regler beeinflußt, wodurch die Hubhöhe des Ventils und hierdurch der Füllungsgrad der Maschine sich ändert.

In neuerer Zeit werden sehr viele Maschinen mit der Lentz-Steuerung ausgerüstet, die sich durch ihre Einfachheit auszeichnet. Die Zahl der Einzelteile in ihrem Antriebgestänge ist verhältnismäßig sehr gering, was ihr eine bedeutende Überlegenheit gegen die älteren Anordnungen gibt.

Einlaß- und Auslaßventile jeder Zylinderseite werden in gleicher Art zwangläufig durch zwei Exzenter bewegt. An den Ventilspindeln sind Rollen befestigt, die von Winkeldaumen emporgepreßt werden. Der Wechsel der Ventilgeschwindigkeiten wird allein durch die Form der obersten Daumenflächen bewirkt. Aus Bild 372 ist ohne weiteres zu erkennen, daß die Hubgeschwindigkeit wachsen muß, wenn der stärker gewölbte Teil der Daumenflächen zur Anlage an die Rollen kommt. Die Bestimmung des Füllungsgrads durch den Regler geschieht mittels Änderung der Exzentrizität des Exzenters für das Einlaßventil. Der Exzenterstein ist als Gleitstück ausgebildet, das sich unter dem Einfluß des Reglers verschieben kann, und so wird bewirkt, daß der Abstand der Exzentermitte von der Steuerwellenmitte bald größer, bald kleiner ist. Bild 373 stellt eine moderne Einzylinder-Dampfmaschine mit Lentz-Steuerung dar.

*

In neuester Zeit ist, wie schon erwähnt, Professor Stumpf, Lehrer an der technischen Hochschule, Berlin, mit Erfolg bemüht, dem Tellerventil wieder Eingang in den Dampfmaschinenbau zu verschaffen. Dieses ist dem gebräuchlichen Zweisitzventil an Dichtigkeit, besonders bei hohen Drücken und Temperaturen, weitaus überlegen und wird deshalb im Verbrennungsmaschinenbau durchweg verwandt. Das Tellerventil kann jedoch nicht durch eine der üblichen Dampfmaschinensteuerungen betätigt werden, da es nicht genügend Querschnitt für den Durchtritt des Dampfes freigeben würde; denn es steht ja, im Gegensatz zum Doppelsitzventil (Bild 366), nur eine Sitzfläche zur Verfügung. Das Tellerventil erfordert vielmehr eine Steuerung, die es, zumal bei kleinen Füllungen, besonders schnell und hoch anhebt. Professor Stumpf löste diese Aufgabe mit der interessanten Steuerung mit verdoppelter Drehzahl (Bild 375). Auf der Steuerwelle sitzt, wie bei der Lentz-Steuerung, ein durch einen Achsenregler beeinflußtes Exzenter, das die Bewegung aber nicht direkt auf das Ventil, sondern auf einen Doppelhebel weiterleitet, in dessen Mitte ein Zwischenexzenter angreift, das durch ein Zahnräderpaar mit doppelter Drehzahl, wie die Steuerwelle, gedreht wird. Von hier aus wird die Bewegung über den anderen Arm des Doppelhebels auf das Ventil übertragen. Durch dieses eigenartige Zusammenwirken beider Exzenter wird in der Tat ein besonders schneller und hoher Anhub des Tellerventiles erzielt. Bild 374 zeigt einen Zylinder mit dieser Steuerung. Eine Dampfmaschine dieser Art ist auf den Leuna-Werken bei Merseburg seit Jahren im Betrieb.

*

Es ist der Kolben-Dampfmaschine schon oft nachgesagt worden, daß sie am Ende ihrer Entwicklung angelangt sei. Man behauptete das bereits in der Zeit, als Corliß

die Balanciermaschine vortrefflich durchgearbeitet hatte, und war davon noch fester überzeugt, als die Ventilsteuerung ihre Präzisionsarbeit mit vielarmigen Zuckungen begonnen hatte. Die derbe, treue, tapfere Kolbenmaschine ist aber trotz ihres hohen Alters, und obgleich neue Stämme sie rings umstehen, immer noch kein absterbender Baum. Zu Beginn dieses Jahrhunderts ließ sie plötzlich ihre Säfte wieder steigen und setzte einen neuen Zweig an.

Professor Stumpf erfand die Gleichstrom-Dampfmaschine, die eine bedeutende Verbesserung des thermischen Wirkungsgrads bei gleichzeitiger Vereinfachung des Baus herbeiführte.

Alle bisher beschriebenen Steuerungsarten zwingen den Dampf, eine Umkehrbewegung im Zylinder zu machen. Er tritt an beiden Seiten in der Nähe des Deckels ein, strömt, dem vorwärtsgehenden Kolben folgend, durch den Zylinderraum und muß dann wieder in der Nähe des Deckels entweichen. Bei der Schiebersteuerung benutzt der ausströmende Dampf sogar denselben Durchlaß wie der einströmende. So kommt es, daß der Frischdampf beim Eintritt in den Zylinder stets einen Raum mit niedrigerer Temperatur antrifft. Denn der abgehende Dampf ist ja expandiert, womit eine Hinabsetzung seines Wärmeinhalts verbunden ist.

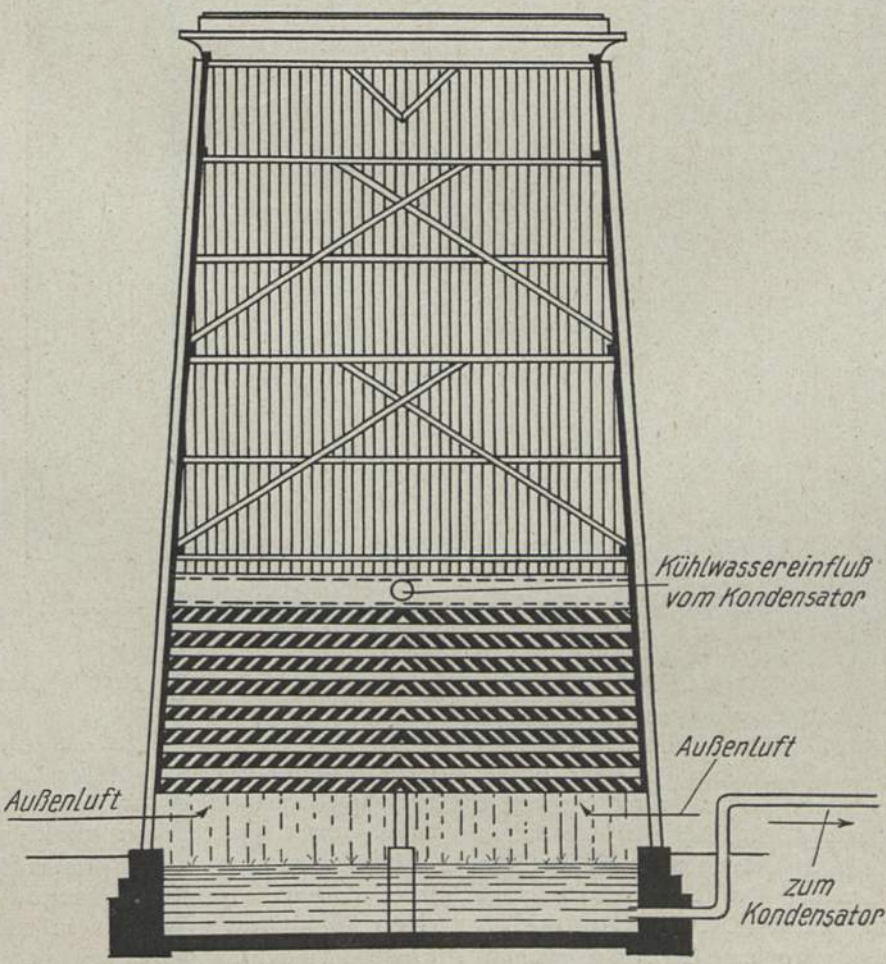
Durch die Berührung mit den Wandungen, an denen eben der kältere Abdampf vorübergegangen ist, büßt der Frischdampf stets etwas von seinem Arbeitsvermögen ein. Da die Einströmung in einer Stunde mehrere tausend Mal erfolgt, so ist der Gesamtverlust, der in dieser Zeit durch Wärmeraub stattfindet, nicht gering.

Stumpf vermindert ihn bedeutend, indem er den expandierten Dampf nicht mehr an den Zylinderenden, sondern in der Mitte entweichen läßt. Er durchbricht zu diesem Zweck im Mittelabschnitt des Zylinders die Wandung durch eine Reihe länglicher Schlitze, die sich alle zu einem umlaufenden Ringkanal öffnen. An diesen schließt das Kondensatorrohr an. Das seltsamste bei dieser Einrichtung ist, daß für die Steuerung des Auslasses kein besonderes Organ mehr erforderlich ist, daß vielmehr der Kolben der Maschine selbst die rechtzeitige Freigabe und Abschließung des Auslasses besorgt.

Der Dampfeintritt erfolgt nach wie vor auf jeder der beiden Seiten durch ein Ventil (Bild 376). Es liegt im Zylinderdeckel, der jetzt doppelwandig ausgeführt ist. Das Einströmrohr mündet unten in den Deckelkasten, das aufschlagende Einströmventil läßt ihn in den Zylinderraum eintreten. Der Kolben wird vorwärtsgeschoben, und wenn er in der Nähe seines Hubendes angelangt ist, gibt er die Auslaß-Schlitze frei. Der Dampf kann nun, ohne seine Bewegung umzukehren, in den Kondensator strömen, und zwar sehr geschwind, da die Gesamtheit der freigelegten Schlitze einen Ausgangquerschnitt von einer Weite eröffnet, der bei keiner anderen Steuerungsart auch nur entfernt zu erreichen ist. Es erfolgt daher eine genügende Entleerung in der kurzen Zeit, die der Kolben braucht, um seine Bewegung umzukehren und wieder so weit zurückzulaufen, daß die Schlitze abgedeckt sind.

Damit er in der gewünschten Art zu arbeiten vermag, muß der Kolben sehr lang sein; der Abstand seiner Stirnflächen voneinander ist gleich der Hubhöhe abzüglich der Breite der Auslaß-Schlitze. Das erfordert eine Verlängerung des Zylinders gegenüber den sonstigen Maschinen um die zusätzliche Kolbenlänge.

Der Teil des Zylinderraums, in den der Frischdampf zunächst gelangt, bleibt jetzt stets sehr warm, da der Abdampfstrom hier nicht hindurchgeht. Es kommt hinzu, daß die Kompression sehr hoch getrieben wird, weil der rückkehrende Kolben den Auslaß früh verschließt. Wenn das Einlaßventil sich öffnet, befindet sich im schädlichen Raum Dampf von fast der gleichen Pressung, wie sie im Kessel herrscht. Der schädliche Raum fällt aber auch kleiner aus als bei allen anderen Maschinen, da jede zusätzliche Höhlung für die Anbringung eines besonderen Auslasses wegfällt. Die ganze Zylinderausrüstung ist bestechend einfach, und das alles trägt dazu bei, die Dampfausnützung in der neuen Maschine zu erhöhen. Bild 377 läßt die Einfachheit der Steuerung deutlich erkennen.



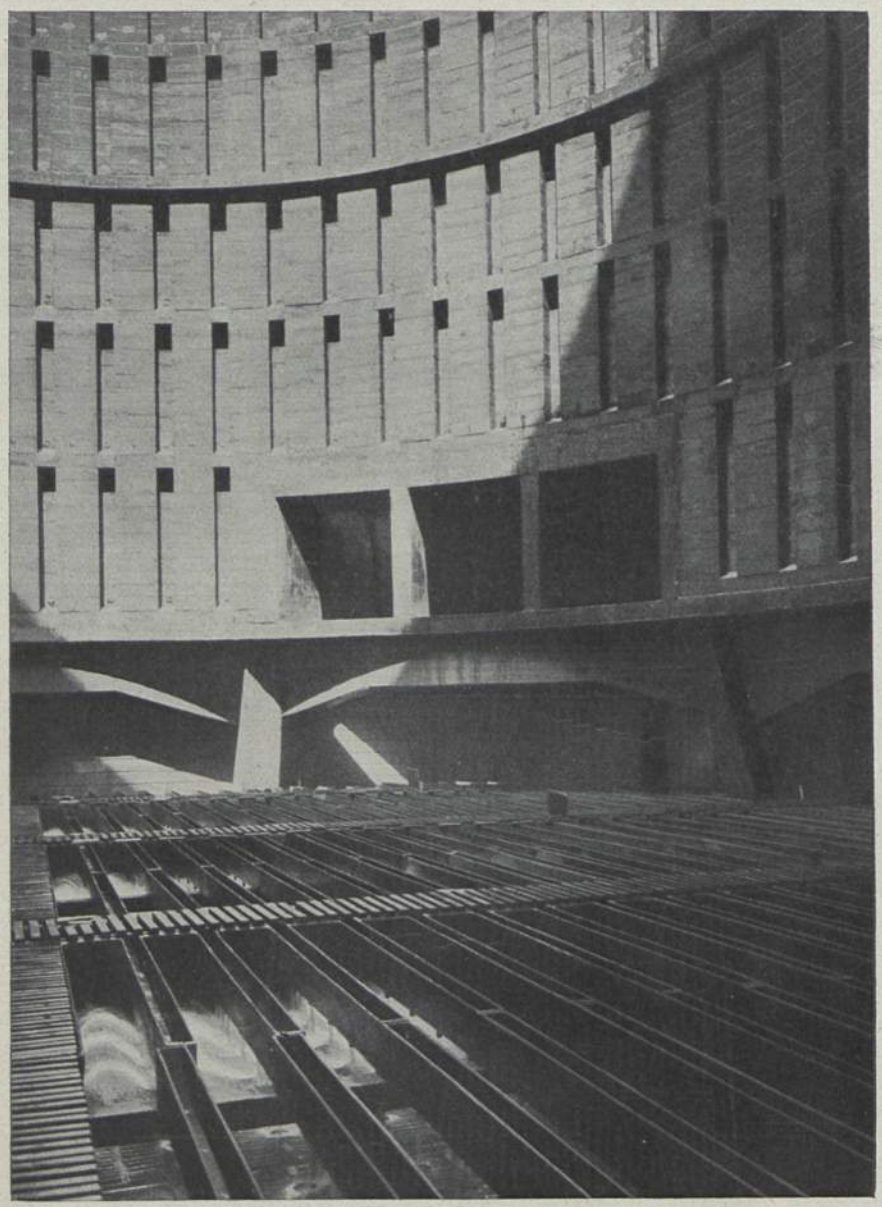

395. Schematischer Schnitt durch einen Kühlturm

Sie gestattet Leistungen mit Einem Zylinder hervorzubringen, für die sonst die Anwendung mehrerer Zylinder notwendig ist. Während die Einzylindermaschine sonst nur einige hundert Pferdestärken zu leisten vermag, wenn der Dampfverbrauch nur einigermaßen günstig sein soll, kann sie in dieser Gestalt selbst zum Antrieb von Walzenstraßen verwendet werden, die 6000 bis 7000 Pferdestärken erfordern. Auf Bild 378 sehen wir eine 2000-pferdige Gleichstrom-Walzenzugmaschine. Die Bezeich-

nung Gleichstrommaschine hat mit dem elektrischen Strom nichts zu tun; sie wurde vom Erfinder gewählt, weil der Dampf den Zylinder stets in der gleichen Richtung durchströmt.

*

Fast an allen Orten, wo die Dampfmaschine ihren Dienst als Antreiber versieht, wird Gleichmäßigkeit der Arbeit von ihr verlangt. Sie soll möglichst in jeder Minute dieselbe Zahl von Umdrehungen machen. Die Stähle von Drehbänken zum Beispiel können nur eine bestimmte Schnittgeschwindigkeit leisten. Sie werden zu sehr erhitzt und brechen ab, wenn das zu bearbeitende Eisen zu schnell gegen ihre Spitze bewegt wird. Die Güte der Erzeugnisse von Spinnereimaschinen ist unmittelbar von der gleichmäßigen Drehung der Spindeln abhängig, da der Faden sonst Verschiedenheiten zeigt, die ihn unbrauchbar machen. Wenn eine Dynamo-Maschine bald schneller, bald langsamer läuft, so entstehen in dem angeschlossenen Leistungskreis Spannungsschwankungen, die ein sehr unangenehmes Zucken des Lichts in den Lampen hervorrufen. Es ist daher eine der wichtigsten Aufgaben des Dampfmaschinenbaus, dafür zu sorgen, daß die festgesetzte Umdrehungszahl der Maschine stets aufrechterhalten wird. Das kann allein durch selbsttätig wirkende Vorrichtungen erzielt werden.



396. Blick auf den obersten Rieselboden des Kühlturms in Trattendorf
Phot. Berliner Bildbericht

Drei feindliche Einflüsse drohen unausgesetzt, den gleichmäßigen Lauf der Maschine zu stören.

Infolge der Expansion des Dampfs wechselt die auf den Kolben ausgeübte Kraft während eines Hubs fortwährend. Die Drehkraft der Schubstange schwillt in der gleichen Zeit von Null zu einem Maximum an, um wieder zu Null hinabzusinken (Seite 207). Das sind die beiden inneren Ursachen, die eine Ungleichförmigkeit in die Drehung der Maschine bringen können. Der dritte Feind greift von draußen an. Wenn die Arbeiter in einer Fabrik, deren Saal-Transmissionen von einer Dampfmaschine angetrieben werden, zahlreiche Arbeitsmaschinen zugleich stillsetzen, so sinkt die Belastung der Antriebmaschine plötzlich. Wenn zehn Straßenbahnwagen gleichzeitig ihre Fahrt beginnen, so wird die Dampfmaschine, welche die netzspeisende Dynamo dreht, auf jähe Art höher beansprucht. Im ersten Fall hat sie eine sehr starke Neigung, geschwinder zu laufen, im zweiten Fall will sie nicht mehr so rasch durchziehen wie bisher.

Es befinden sich nun an jeder Kolben-Dampfmaschine zwei Einrichtungen, die den Ungleichmäßigkeiten des Gangs vorbeugen. Die eine wirkt gegen den inneren, die andere wider den äußeren Feind.

Wenn während eines Hubs die Drehkraft an der Kurbel infolge kräftigen Dampfdrucks auf den Kolben und günstiger Stellung der Schubstange sehr hoch ist, dann will die Maschine ihre Drehzahl steigern. Sie wird aber daran gehindert, weil die Masse des Schwungrads auf der Hauptwelle nicht so geschwind beschleunigt werden kann. Dieses Zusatzgerät speichert jetzt die überschüssige Kraft als potentielle Energie auf und gibt sie durch Rückwandlung in kinetische Energie (Seite 94 f.) in Augenblicken wieder ab, wo die Drehkraft an der Kurbel unter das Mittelmaß gesunken ist. Je höheres Gewicht das Schwungrad hat, desto kräftiger tritt seine ausgleichende Wirkung hervor. Das Gewicht des Rads darf aber auch nicht übermäßig hoch genommen werden. Die Maschine könnte dann schließlich nicht mehr in Gang gesetzt werden, weil sie die Beschleunigungsarbeit für das gewaltige Schwungrad nicht zu leisten vermöchte. Es wären auch der Durchmesser der Kurbelwelle, die das Rad trägt, und die Abmessungen der Lager zu vergrößern, wodurch die Maschine gezwungen würde, ständig ein Mehr an verlorener innerer Arbeit zu leisten.

Einzylindermaschinen sind wegen der Totlagen, die bei jeder Umdrehung zweimal auftreten, ohne Schwungrad von einem bestimmten, nicht geringen Gewicht unmöglich, während Mehrzylindermaschinen mit versetzten Kurbeln nur leichtere Schwungräder nötig haben, ja sogar ohne ein solches

397. Kühlturm aus Eisenbeton des Kraftwerks Trattendorf
Phot. Berliner Bildbericht

auszukommen vermögen. Denn wenn bei ihnen die eine Kurbel sich in der Totlage befindet, greifen die andere oder die anderen stets so an der Kurbel an, daß Treibkraft auf die Welle ausgeübt wird. Der Ungleichförmigkeitsgrad ist bei den Mehrzylindermaschinen infolge ihrer baulichen Gestaltung gering.

Die regelnde Masse des Schwungrads befindet sich hauptsächlich im Kranz. Die lebendige Kraft der Arme und der Nabe spielt fast gar keine Rolle, da der Hebelarm, mit dem ihre Massen angreifen, zu kurz ist. Der Rücken des Schwungrads wird häufig dazu benutzt, gleich den Treibriemen oder die Seile zu tragen, mit denen die Maschinenkraft abgenommen wird. Man setzt auch die Erregermagnete von Dynamomaschinen darauf, weil diese bei dem großen Durchmesser des Schwungrads alsdann die gewünschte rasche Bewegung erhalten (Bild 373).

Einzylindermaschinen haben die Ungezogenheit, öfter in der Totlage oder in deren Nähe stehenzubleiben. Sie springen alsdann beim Einlassen von Dampf nicht an, weil kein oder nur ein ganz geringes Drehmoment auf die Kurbel ausgeübt werden kann. Deshalb müssen Andrehvorrichtungen vorgesehen sein.

Man benutzt für ihren Angriff den Rücken des Schwungrads, weil hierdurch der Hebelarm, mit dem die Drehkraft an der Kurbelwelle angreift, am längsten wird. Der Rücken des Schwungrads erhält Zähne in der Art, wie Bild 379 sie zeigt. Ist der Rücken durch einen aufliegenden Riemen oder in anderer Weise in Anspruch genommen, so wird der Zahnkranz nicht in der Mitte, sondern seitlich angebracht. In die Zähne greift ein Hebelwerk ein, das meist von Hand bewegt werden kann.

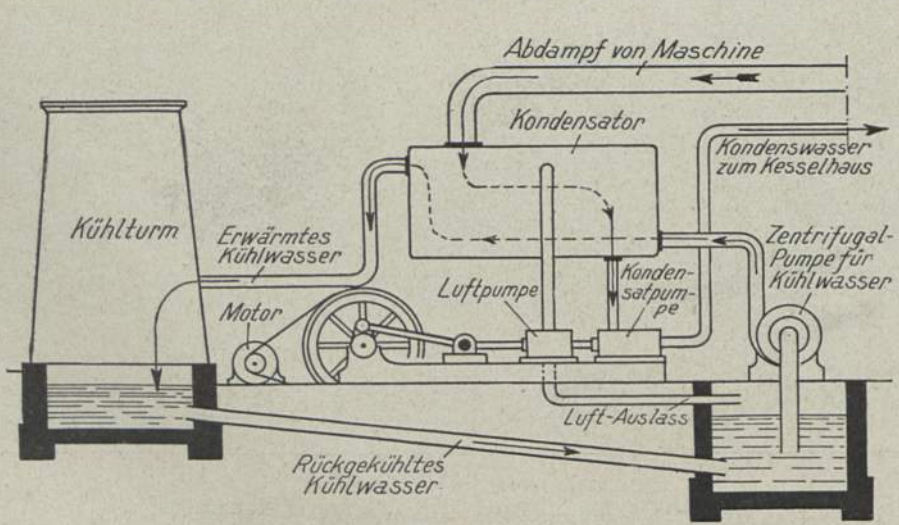
Wenn der Wärter beim Anlassen der Maschine den Handhebel zum Schwungrad hin bewegt, dann hebt sich der längere Arm des Schaltwerks und dreht das Schwungrad. Indessen geht der kürzere Arm hinunter, und er sitzt gerade unter einem Zahn, wenn der andere die Höchstlage erreicht hat. Hierdurch wird ein Rückgang des Schwungrads und damit der Maschine unmöglich gemacht, es entsteht auch bei der Rückbewegung des Hebels vorwärtstreibende Kraftwirkung. Sobald die Maschine läuft, gleiten die Zähne schadlos an den Hebelenden vorbei. Die ganze Vorrichtung wird unmittelbar darauf so weit zurückgelegt, daß keine Berührung mit dem Schwungrad mehr stattfindet.

Bei sehr großen Maschinen wird die Bewegung der Andrehvorrichtung auch mittels einer kleinen Sonderdampfmaschine oder durch einen Elektromotor bewirkt. Mehrkurbelmaschinen bedürfen keines Anwerfens, da hier infolge der Versetzung der Kurbeln gegeneinander eine vollständige Totlage nicht eintreten kann. Man versieht aber auch sie mit Andrehvorrichtungen, weil es bei Ausbesserungsarbeiten oft erwünscht ist, das Maschinengetriebe in eine bestimmte Stellung zu bringen. Das Schwungrad ist seiner ganzen Natur nach nur imstande, kurz dauernde Ungleichförmigkeits-Quellen unschädlich zu machen. Sobald aber der äußere Feind, nämlich eine lang andauernde Belastungsänderung, angreift, vergrößert es sogar die störende Einwirkung. Wir nehmen an, daß die Maschine mit ihrer normalen Drehzahl läuft. Jetzt wird plötzlich eine beträchtliche Last abgeschaltet. Sofort verwendet die Maschine die überschießende Kraft, um das Schwungrad zu beschleunigen; dieses läuft bald geschwinder, da jetzt genügende Zeit für seine Beschleunigung zur Verfügung steht. Die Maschine leistet nun mehr Arbeit als vorher, da ja Arbeit das Produkt von Kraft und Weg ist, und der Kolben sich nun geschwinder bewegt als vorher. Die gesteigerte Arbeitsleistung dient weiter zur Beschleunigung des Schwungrads, es dreht sich rascher und rascher, die Maschine „geht durch". Das Schwungrad kann in derartigen Fällen eine so hohe Umdrehungsgeschwindigkeit erhalten, daß die Fliehkraft den Kranz zersprengt. Schwungrad-Explosionen gehören zu den furchtbarsten Ereignissen im Dampfmaschinenbetrieb.

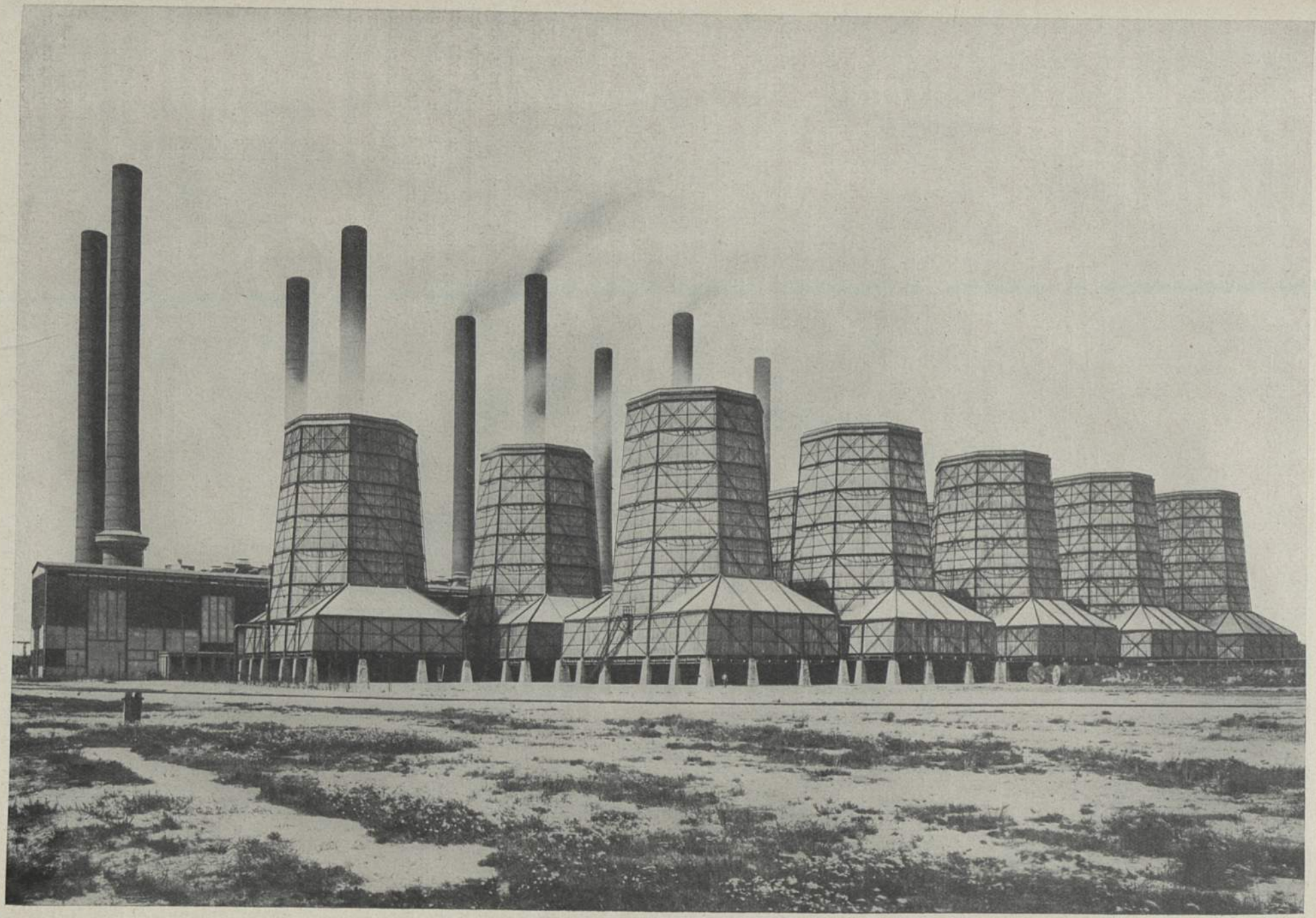
Wenn die Belastung der normal laufenden Maschine dauernd erhöht wird, so sträubt sich das Schwungrad zunächst gegen eine Verlangsamung seines Laufs, indem es einen Teil der in ihm gespeicherten Arbeit an das Getriebe abgibt. Seine Bewegungsenergie ist nun aber gemindert, von der Maschine wird ihm keine neue Arbeit zugeführt, es kann sich also nur noch verlangsamt drehen. Die gleichzeitig verringerte Kolbengeschwindigkeit bewirkt, daß die Arbeitsleistung der Maschine sinkt. Nun gibt das Schwungrad wieder Arbeit ab, seine Umlaufgeschwindigkeit wird von neuem erniedrigt, die Drehzahl der Maschine sinkt immer weiter, bis sie schließlich stehen bleibt.

Um das Durchgehen und das Stillsetzen der Maschine bei Belastungsänderung zu vermeiden, muß daher eine weitere Vorrichtung angebracht werden, die imstande ist, die Kraftzufuhr in entsprechender Weise zu ändern. Hierfür wird überall der Fliehkraftregler benutzt.

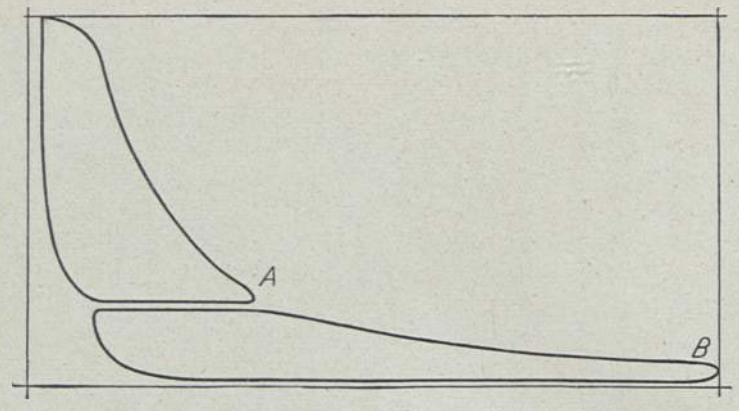
Nur wenige Kolbenmaschinen kommen ohne ihn aus. Hierzu gehören die Lokomotiven und Schiffsmaschinen, bei denen kleine Geschwindigkeitsänderungen nicht viel ausmachen. Größere werden durch die Wärter oder Führer von Hand ausgeglichen. Fördermaschinen in Bergwerken und Antreiber von Walzen mit fortwährend kehrendem Lauf müssen sogar dauernd mit verschiedenen Geschwindigkeiten laufen können; die Regelung ihrer Drehzahl liegt dann ganz in der Hand des bedienenden Manns. Auch Maschinen, die Pumpen oder Kompressoren bedienen, erhalten keine selbsttätige Umlaufregelung, da man bei ihnen imstande sein will, durch Veränderung der Drehzahl die Leistung entsprechend den wechselnden Mengen des zugeführten Wassers oder Gases zu verändern.




398. Gesamtanordnung einer Kondensationsanlage



399. Kühlturm-Anlage des Kraftwerks Golpa-Zschornewitz




400. Dampf-Diagramm einer Verbundmaschine

Der Fliehkraft- oder Schwungkugelregler ist ein altes Hilfsgerät der Maschinentechnik. Er wurde schon vor sehr langer Zeit an Wassermühlen benutzt. Watt brachte dann die Vorrichtung bei seinen Dampfmaschinen an. Sie hatte dort die bereits auf Bild 314 schematisch und hier auf Bild 380 noch einmal körperlich dargestellte Form.

Von der Kurbelwelle aus wurde eine senkrechte Welle getrieben, welche die Pendelarme mit den Schwungkugeln drehte. Mittels Lenker wurde die seitliche Bewegung der Pendel — wenn die Kugeln bei Steigerung der Drehzahl auseinandergingen, bei sinkender Geschwindigkeit sich der Drehachse näherten — auf eine Muffe übertragen, die sich in der Senkrechten verschieben konnte. Ein Gestänge übermittelte bei den Watt-Maschinen diese Bewegung zu einer Drosselklappe im Dampfzuführungsrohr. Begann die Maschine zu schnell zu laufen, dann wurde die Drosselklappe so eingestellt, daß der Dampf sich durch einen schmalen Raum zwängen mußte. Hierdurch verlor er an Arbeitskraft, die Maschine ging langsamer.

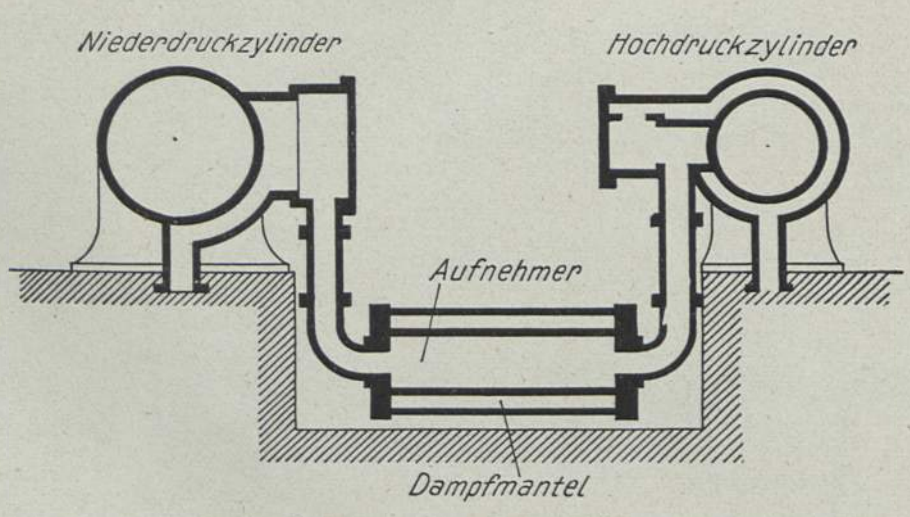
Die Regelung durch Drosselung des Dampfs blieb bis über die Mitte des vorigen Jahrhunderts das Übliche. Dann endlich hatte Corliß die erste Steuerung geschaffen, an der mittels des Reglers leicht eine Änderung der Einströmungsdauer hervorgerufen werden konnte. Diese Maßnahme ist allein durchgreifend und in ihrer Wirkung bedeutend günstiger, weil sie den Dampfverbrauch vermindert, wenn die Maschine weniger zu leisten hat. Die Drosselklappe dagegen raubte dem Dampf nur Arbeitsvermögen, ohne den Verbrauch daran einzuschränken. Durch Betrachtung der Bilder 359, 362 und 370 veranschaulichen wir uns noch einmal, wie das auf und nieder gehende Gestänge des Reglers zum Beispiel auf eine Corliß-, eine Rider- oder eine Ventilsteuerung wirkt.

Der Watt-Regler mußte sehr langsam laufen, damit die Arme nicht schon beim gewöhnlichen Gang der Maschine sehr weit auseinanderflogen. Durch geeignete Bemessung der Antriebübersetzung kann jede beliebige Reglergeschwindigkeit von der Maschine abgeleitet werden. Ein langsam laufender Regler besitzt aber nur eine sehr geringe Stellkraft. Porter brachte daher ein Gegengewicht an, das beim Auseinandergehen der Arme mitgehoben werden mußte (Bild 382). Jetzt konnte der Regler sich rascher drehen, seine Stellkraft bei Geschwindigkeitsänderungen war größer. Die Gegenkraft, die von der Fliehkraft überwunden werden muß, wird heute meist nicht mehr durch Belastung des Reglers mit einem Gewicht, sondern durch Spannung starker Stahlfedern hervorgerufen.

Bei der auf Bild 381 im Schnitt wiedergegebenen Bauart drücken die Reglerarme, wenn sie auseinandergehen, durch Schneiden, die an bogenförmigen Armverlängerungen angebracht sind, eine Muffe hinunter und spannten hierdurch eine zylindrische Feder. Solch ein Schwungkugelregler scheint ein einfaches Ding. Man meint auf den ersten Blick, es genüge, die Maschine mit einem solchen Hilfswerkzeug in irgendeiner Bauart auszurüsten, damit es in richtiger Weise den Füllungsgrad einstellt, d. h. die Einströmung bei jedem Hub länger dauern läßt, wenn die Maschine stark belastet ist, den Dampfzufluß bei geringer Belastung verkürzt, so daß immer dieselbe vorgeschriebene Drehzahl eingehalten wird. Der Regler muß aber nicht nur rein mechanisch angefertigt, sondern auch für jeden Einzelfall sehr genau durchgerechnet werden.

Die Bilder 383 bis 385 zeigen verschiedene Reglerbauarten; es gibt deren eine sehr große Zahl. Die offen umlaufenden Schwungkugeln sind immerhin nicht ganz ungefährlich, Kapselung ist auch hier wie bei allen anderen bewegten Maschinenteilen wünschenswert, die keine vollkommen glatte runde Oberfläche haben. Der Apparat auf Bild 384 gehört zu denen, die außen nur geschlossene Ringflächen zeigen. Bei diesem Regler machen die Schwungmassen nicht mehr eine Bewegung im Kreisbogen, sondern gleiten hin und her, indem sie Federn zusammenpressen. Auch für den inneren Aufbau erspriessen hieraus mancherlei Vorteile.

Ein Regler, der, auf hoher senkrechter Welle sitzend, alle anderen Teile turmartig überragt, ist heute bei Maschinen mit Ventilsteuerung vielfach nicht mehr zu finden. Bei ihnen wird ein Gerät verwendet, das unmittelbar auf der Steuerwelle sitzt, bei Einzylindermaschinen stets zwischen den Antrieben für die beiden Einlaßventile. Die pendelnden Schwungmassen A haben ungefähr die auf Bild 383 dargestellte Form. Sie schwingen um Zapfen B am Gehäuse des Achsenreglers, das mit der Steuerwelle umläuft, und bewegen sich in der Drehebene des Reglers, während das Schwingen der Kugeln bei der älteren Bauart in einer senkrecht hierzu stehenden Ebene stattfand. Federkraft verursacht auch hier die Gegenwirkung. Durch die Schwungkörper wird ein Gestänge C verstellt, das an einer Muffe angreift. An dieser ist eine Hülse D befestigt, welche die Steuerwelle konzentrisch umfaßt und nach beiden Seiten hin zu



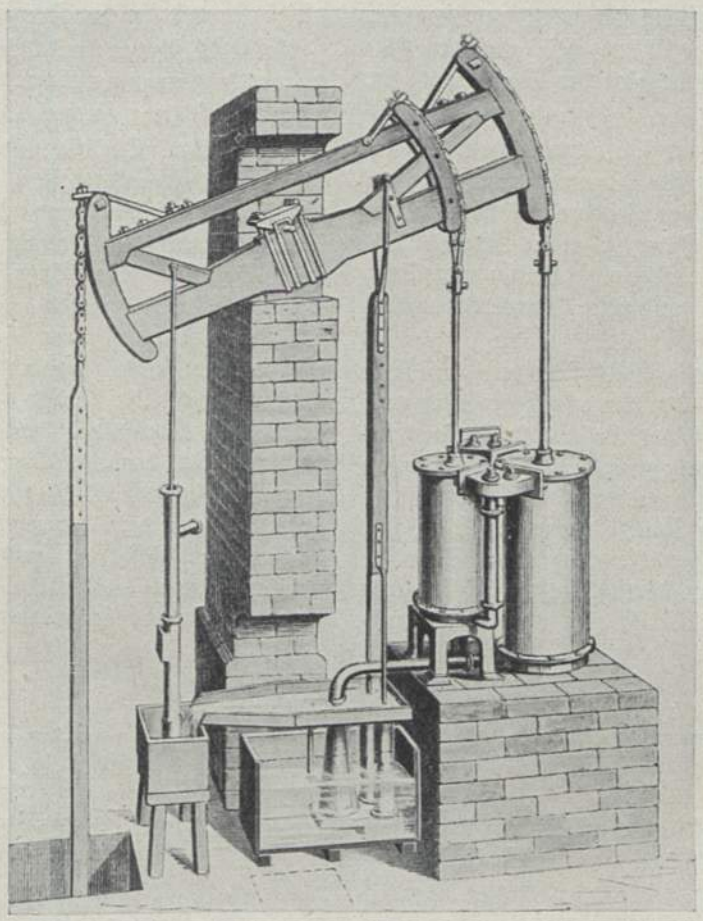

401. Schematische Darstellung der Verbundmaschine

den Steuergestängen der Einlaßventile läuft. Die Stellung der Hülse entspricht stets dem Ausschlag der Schwungmassen. Ihre Enden beeinflussen die Stellung der zu regelnden Steuerorgane.

Durch einen ausgezeichneten Gedanken ist in letzter Zeit die Empfindlichkeit dieser Achsen- oder Flachregler bedeutend gesteigert, und damit die Präzisionswirkung der Ventilsteuerung noch verbessert worden. Das Gehäuse des Achsenreglers ist jetzt nicht mehr ein zusammenhängendes Stück, der Umfassungsring wird vielmehr von den zu seiner Achsrichtung senkrecht stehenden Seitenwänden baulich gesondert. Der Ring erhält eine sehr beträchtliche Wandstärke, so daß er einen kraftvollen Schwungkörper bildet. Er ist nur durch eine kreisförmig gebogene Feder mit den anderen Reglerteilen in Verbindung (Bild 385).

Erhöht die Maschine ihre Geschwindigkeit, so bleibt der Schwungring hinter der nun gleichfalls vermehrten Umdrehungsgeschwindigkeit der Steuerwelle zurück. Diese Verschiebung wirkt über die Kreisfeder gerade so auf die Hülse, die zu den Steuerungsgestängen läuft, wie die auch jetzt vorhandenen ausschwingenden Pendel. Während diese aber nicht sofort eingreifen können, wirkt die Beharrung des Schwungrings augenblicklich, so daß bei derartig ausgerüsteten Maschinen die Drehzahlschwankungen ganz besonders gering bleiben. Zur Steuerung von Lentz gehört stets ein von demselben Konstrukteur ausgebildeter Beharrungs-Achsenregler mit Schwungring.

*



402. Erste Zweifach-Expansionsmaschine von Jonathan Hornblower aus dem Jahre 1781
Deutsches Museum, München

Betriebsdampfmaschinen, das sind solche, die für allgemeine gewerbliche Zwecke, nicht für eine Sonderaufgabe gebaut werden, laufen stets in der gleichen Richtung. Viele andere Maschinen aber müssen imstande sein, leicht und schnell ihre Drehrichtung umzukehren: Lokomotiv- und Schiffsmaschinen, Fördermaschinen für Bergwerksaufzüge und Antriebsmaschinen für Umkehr-Walzenstraßen, bei denen der zu bearbeitende Eisenblock bald in der einen, bald in der anderen Richtung durchgezogen wird. Das Kehren wird durch besondere Vorrichtungen an der Steuerung bewirkt, die im übrigen unverändert in einer der geschilderten Arten gebaut ist.

Die Steuerorgane müssen während des Laufs der Maschine so verstellt werden können, daß die Dampfzuführung plötzlich die Zylinderseite wechselt. Während zum Beispiel der Betriebsdampf im Verlauf eines Kolbenhubs links in den Zylinder eintritt, den Kolben nach rechts drängt und die rechte Zylinderseite mit dem Kondensator in Verbindung steht, wird nun der linke Zylinderraum mit dem Kondensator verbunden, der Dampf tritt von rechts ein. Sofort geht der Kolben nach links, die Maschine hat ihre Drehrichtung gewechselt.

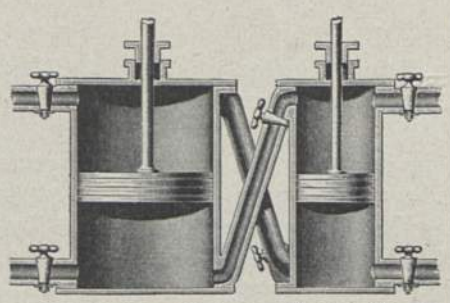
Die Umsteuerung ist aber praktisch nur möglich, wenn die Maschine mindestens zwei Zylinder besitzt, deren Schubstangen an versetzten Kurbeln angreifen. Einzylindermaschinen würden ihren Lauf in der einen Richtung zu oft bei Totlage des Gestänges beenden und alsdann nicht in der anderen Richtung anspringen. Bei Mehrzylindermaschinen mit versetzten Kurbeln kann jedoch eine Totlage sämtlicher Getriebe zu gleicher Zeit nicht eintreten.

Die Umsteuerwirkung läßt sich besonders einfach bei Anwendung eines Muschelschiebers erzielen, der nach Bild 351, aber mit ganz kurzen Überdeckungen, gebaut ist. Beim Vorhandensein einer solchen Steuerung braucht man nur den Frischdampf in den Mittelkanal eintreten, ihn seitlich wieder austreten zu lassen, um die Drehung zu kehren. Das Umlegen der Rohranschlüsse ist unschwer zu bewirken. Die Anordnung wird jedoch nur bei kleinen Maschinen verwendet, da ja wegen der geringen Überdeckungen nahezu mit Volldruck gearbeitet werden muß, wodurch eine erhebliche Dampfverschwendung entsteht. Für das Umlegen der Muschelschieber mit Überdeckungen gewöhnlicher Größe sind die Kulissensteuerungen weit verbreitet, deren erste Stephenson für die Lokomotive geschaffen hat (Bild 386).

Auf die Kurbelwelle sind zwei Exzenter gesetzt, die verschiedene Stellungen zur Hauptkurbel haben. Der Voreilwinkel des einen Exzenters hat die rechte Größe für Expansionsbetrieb, 90 Grad plus einem kleinen Zusatz (Seite 202), wenn die Maschine sich in der einen Richtung dreht. Das andere Exzenter eilt genau so weit bei der entgegengesetzten Drehrichtung vor. Die Enden der beiden Exzenterstangen sind nun durch eine Kulisse oder Schwinge, die keinen festen Drehpunkt hat, miteinander verbunden. Die Bewegung, die das obere Kulissenende macht, steht unter der Herrschaft des einen Exzenters, das andere Kulissenende wird von dem zweiten Exzenter gesteuert. In einem Schlitz der Kulisse liegt ein Gleitstück, Stein genannt, obgleich es selbstverständlich aus Stahl gefertigt ist, an welches das Ende der Schieberstange angelenkt ist. Die Kulisse kann mittels eines Handhebels mit anschließendem Gestänge gehoben und gesenkt werden.

Befindet sich die Kulisse in der gezeichneten untersten Stellung, so geschieht die Bewegung des Schiebers über-

wiegend unter dem Einfluß des oberen Exzenters; ist die Kulisse gehoben, so wird der Schieber hauptsächlich durch das untere Exzenter bewegt. Die Verschiedenheit der Voreilwinkel bewirkt, daß das eine Exzenter die Steuerung so einstellt, daß die Maschine vorwärts läuft, während das andere sie rückwärts laufen läßt. Die Umsteuerung wird also durch Verstellung der Kulisse bewirkt. Diese braucht nicht stets ihre oberste oder unterste Endlage zu haben. Die Zwischenstellungen ergeben Veränderungen der Füllung. Diese wird immer geringer, je näher der Stein der Kulissenmitte rückt. Mit dem Umsteuerhebel kann der Wärter also auch den Füllungsgrad und damit die Geschwindigkeit der Maschine regeln.



403. Verbundmaschine von Arthur Woolf, 1804

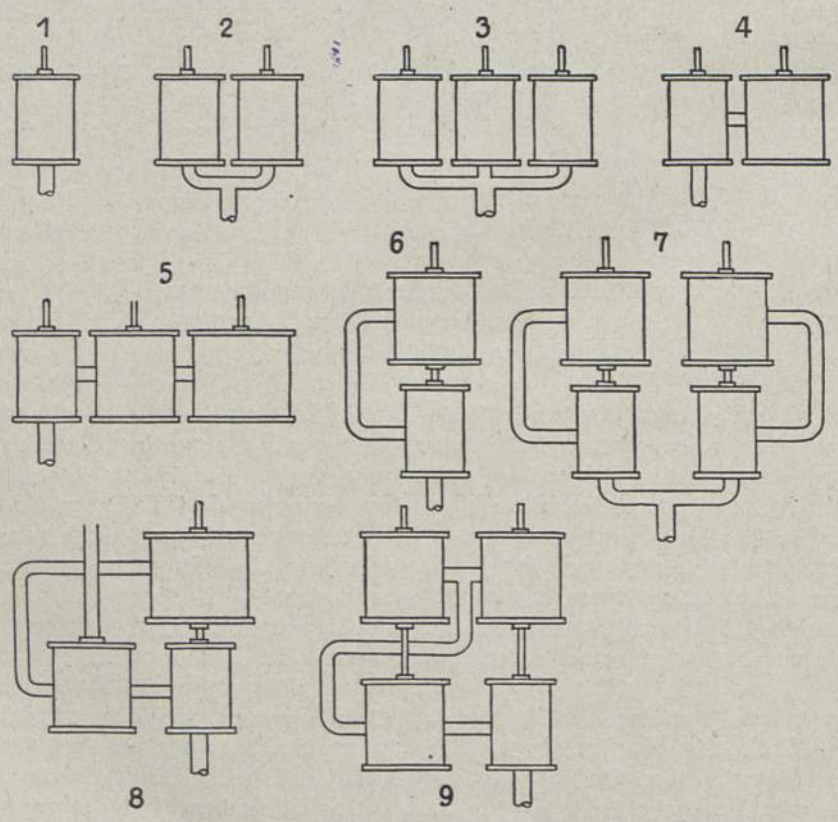
Bei der Umsteuerung von Gooch wird nicht die Kulisse, sondern der Stein verschoben; die Vorrichtung von Allan und Trick läßt beide Bauteile sich gegeneinander bewegen. Sehr häufig angewendet wird insbesondere bei Lokomotiven die Umsteuerung von Heusinger von Waldegg. Ihr Aufbau erscheint in der Schilderung ziemlich verwickelt, er ist aber tatsächlich einfach, da das zweite Exzenter hier durch das Hauptgetriebe ersetzt wird.

Auf Bild 387 ist die Heusinger-Umsteuerung an einer Lokomotiv-Maschine dargestellt. Der Kreuzkopf ist durch zwei Hebel, A und B, mit der Schieberstange verbunden, die in einem Gleitblock, einem zweiten Kreuzkopf, gelagert ist. Auf den Zapfen der Hauptkurbel ist eine zweite kleine Kurbel C gesetzt, die mittels des Hebels D die Kulisse antreibt. Diese hat jetzt bei E einen festen Drehpunkt. Liegt der Stein in der Mitte der Kulisse, also an deren Drehpunkt, so steht die Stange F still, der Punkt G ist nun ein fester Drehpunkt der Hebelverbindung AB, und der Schieber bewegt sich jetzt ausschließlich unter der Einwirkung des Kreuzkopfs, und zwar infolge der Zweiarmigkeit des Übertragungsgestänges stets in entgegengesetzter Richtung und mit geringerem Hub, weil der Hebelarm GH ja bedeutend kürzer ist als der Arm GA. Wird der Stein in der Kulisse mittels des Winkelhebels verschoben, so erhält das Hebelwerk AB eine zusätzliche Bewegung. Diese bewirkt bei Lage des Steins in der oberen Kulissenhälfte Schieberstellungen, welche die Maschine vorwärts laufen lassen; befindet sich der Stein in der unteren Kulissenhälfte, so geht die Maschine rückwärts.

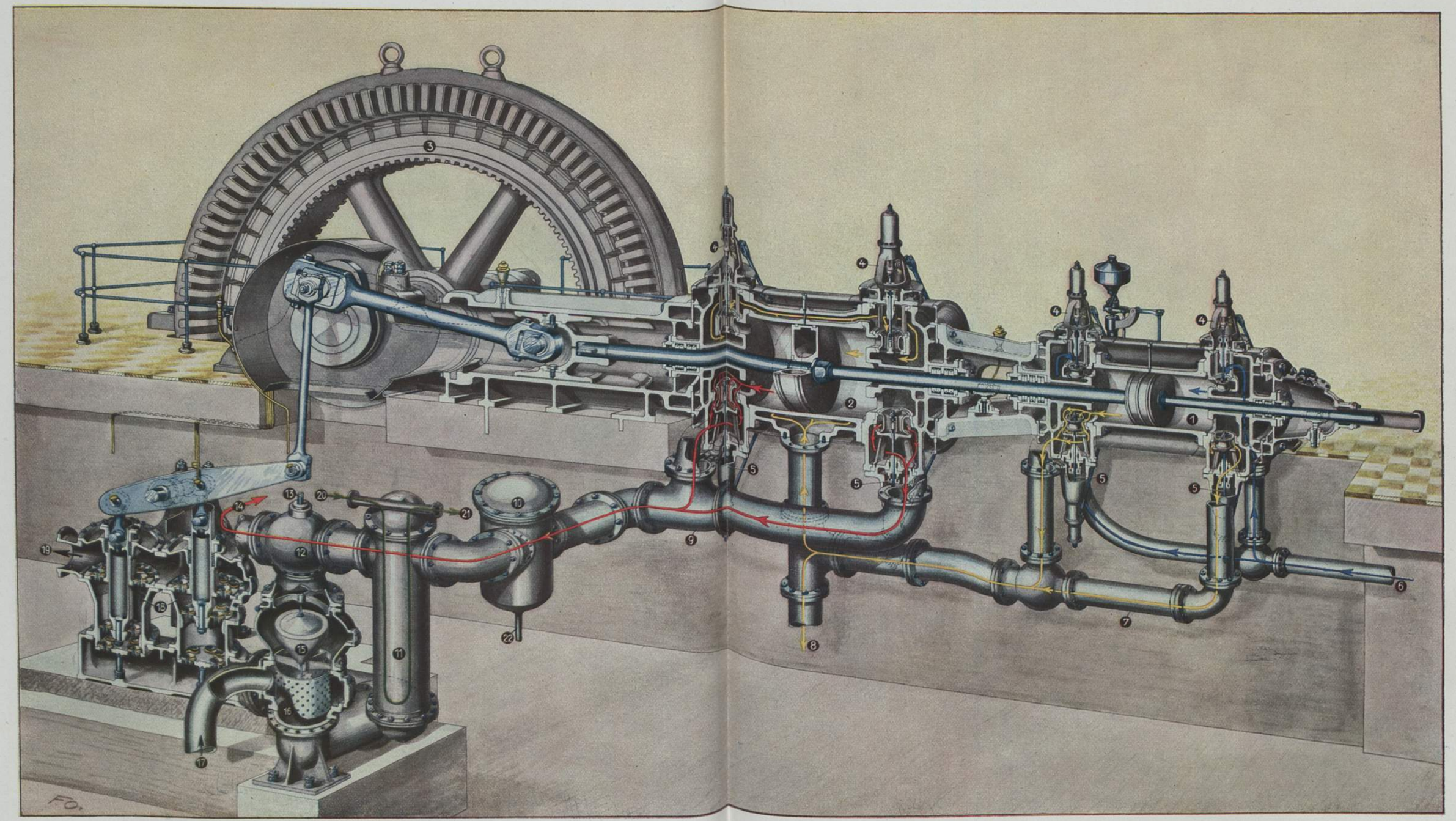
Bei Lokomotiven wird der Winkelhebel mittels einer langen Stange (13 auf Bild 371 in Band II), vom Führer durch das dort auf Bild 370 dargestellte Kurbelwerk bewegt. Neben der Umschaltung der Fahrtrichtung gestattet die Kurbel auch Einstellung des Füllungsgrads, indem der Stein eine Zwischenstellung im oberen oder unteren Kulissenteil erhält. Während der große Reglerhebel im Führerstand der Lokomotive, der den Dampfeinlaß zu den Zylindern öffnet und schließt, zum Grobregeln benutzt wird, wendet der Führer die Umsteuerkurbel zur Feineinstellung des Lokomotivgangs an.

Auch Maschinen mit Ventilsteuerung können ihre Bewegungsrichtung umkehren. Wir wollen nur eine ganz einfache Einrichtung solcher Art betrachten.

Die beiden Einlaß- und die beiden Auslaßventile an einem der Zylinder einer Fördermaschine werden mittels vier Nocken auf der Steuerwelle bewegt (Bild 388). Die Nocken bewirken durch die Formen ihrer Oberflächen das Öffnen und Schließen der Ventile auf die rechte Art, indem sie Winkelhebel anheben, die sich unter Federdruck wieder schließen. Nun ist aber neben jeden dieser Nocken noch ein anderer gesetzt, der die gleiche Form, aber eine andere Stellung hat. Die Punkte A auf jedem der beiden Nocken, bei deren Berührung mit dem Winkelhebel das Ventil aufzuschlagen beginnt, liegen so zueinander, wie die Exzenterkurbeln auf Bild 386. Die Nocken sitzen nicht unmittelbar auf der Steuerwelle, sondern auf einer darübergeschobenen Hülse, die mitgedreht wird, aber Bewegungen nach rechts und links ausführen kann. Wird die Hülse nach links verschoben, so werden die Ventile von der zweiten Nockenserie bedient. Das Einlaßventil der linken Seite schlägt jetzt auf, wenn früher das rechte sich öffnete und umgekehrt, mit den Auslaßventilen geschieht das gleiche. Füllungsänderung wird bei dieser Nockensteuerung dadurch bewirkt, daß die Rücken der Einlaßnocken schräg zur Steuerwellenachse liegen, daß also, je nach der Stellung der Hülse, die Winkelhebel früher oder später von den Nocken hinuntergleiten und die Einlaßventile schließen. Die Maschine läuft nun anders herum. Die seitliche Verschiebung der Nockenhülse kann leicht mittels eines Handhebels bewirkt werden oder durch eine Kurbel, wie sie zum Umsteuern der Lokomotive benutzt wird.




404. Übersicht der verschiedenen bei Dampfmaschinen üblichen Anordnungen der Zylinder



Schnitt durch eine moderne Heißdampf-Verbundmaschine mit Kondensation und Einrichtung für Zwischendampfentnahme

1. Hochdruckzylinder
2. Niederdruckzylinder
3. Schwungrad-Generator (Wechselstrom, 500 Touren)
4. Dampf-Einlaßventile
5. Dampf-Auslaßventile
6. Frischdampfleitung (Hochdruck)
7. Niederdruck-Aufnehmerleitung
8. Anschluß für Zwischendampfentnahme
9. Abdampfleitung
10. Abdampf-Entöler
11. Speisewasser-Vorwärmer durch Abdampf
12. Wechselventil
13. Zum Handrad des Wechselventils
14. Freier Auspuff
15. Schwimmer-Ventil
16. Vorkondensator
17. Einspritzleitung
18. Luftpumpe
19. Warmwasser-Abfluß
20. Speisewasser-Eintritt
21. Speisewasser-Austritt
22. Öl-Entnahmeleitung

Nachdem der Frischdampf (blauer Pfeil) im Hochdruckzylinder (1) einen großen Teil seiner Energie abgegeben hat, wird er (gelber Pfeil) teils zu Heizzwecken (8) verwendet, teils dem Niederdruckzylinder (2) zu weiterer Arbeitsleistung zugeführt. Von hier geht der Abdampf (roter Pfeil) durch den Speisewasser-Vorwärmer (11) in den Kondensator (16) bzw. zum Auspuff (14). Grüner Pfeil: Weg des Kessel-Speisewassers (20, 21) durch den Vorwärmer (11)

Vom Kondensator haben wir lange nicht mehr gesprochen. Wir erinnern uns, daß seine Abtrennung vom Arbeitszylinder die grundlegende Tat James Watts gewesen ist (Seite 179). Solange es nur Maschinen mit ganz geringer Dampfspannung gab, war die Niederschlagung des Dampfs ganz unentbehrlich. Die Dampfmaschine dieser Art hatte den Kondensator nicht weniger nötig als den Kessel. Denn nur wenn auf der Gegenseite des Kolbens ein Unterdruck erzeugt wurde, konnte der Dampf von nicht mehr als Atmosphärenspannung auf der anderen Seite den Kolben vorwärtstreiben.

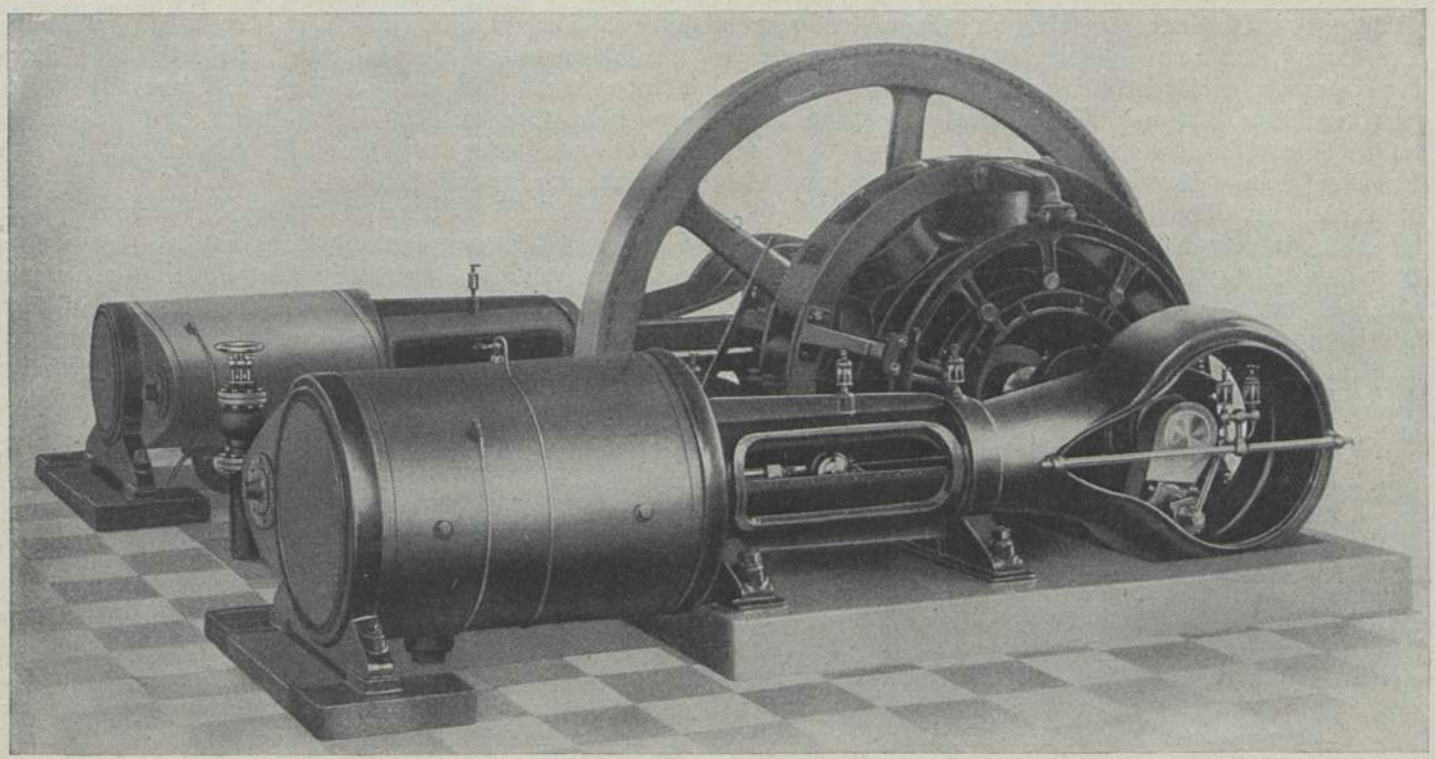
Heute, wo Dampfspannungen unter 6 Atmosphären nur noch selten angewendet werden, liegen die Dinge anders. Man kann sowohl mit Kondensation wie mit Auspuff arbeiten. Auf die Niederschlagung des Dampfs wird — abgesehen von den Fällen, in denen man ihn außerhalb der Maschine weiter verwenden will — verzichtet, wo die Kosten für den Betrieb der Kondensationsanlage deren Nutzen überwiegen.

Dieser besteht bei einer Maschine, die mit hochgespanntem Dampf betrieben wird, darin, daß der Dampf kräftiger gegen den Kolben wirkt, wenn auf dessen anderer Seite nahezu Vakuum herrscht, als wenn der Gegendruck der Atmosphäre darauf lastet. Die Luftleere hilft gewissermaßen saugend mit. Es ist jedesmal zu berechnen, ob diese Hilfe nicht mit dem Betrieb vieler Pumpen, den Kosten für Bedienung und Ausbesserung der Kondensationsanlage und so manches andere, was dazu gehört, zu teuer bezahlt ist.

Bei kleinen Maschinen, unter 25 Pferdestärken, ist für gewöhnlich Auspuffbetrieb vorteilhafter. Diesen wird man auch stets anwenden, wenn das Kühlwasser auf große Höhe gefördert oder nur von weit her mit hohen Kosten herangeholt werden kann.

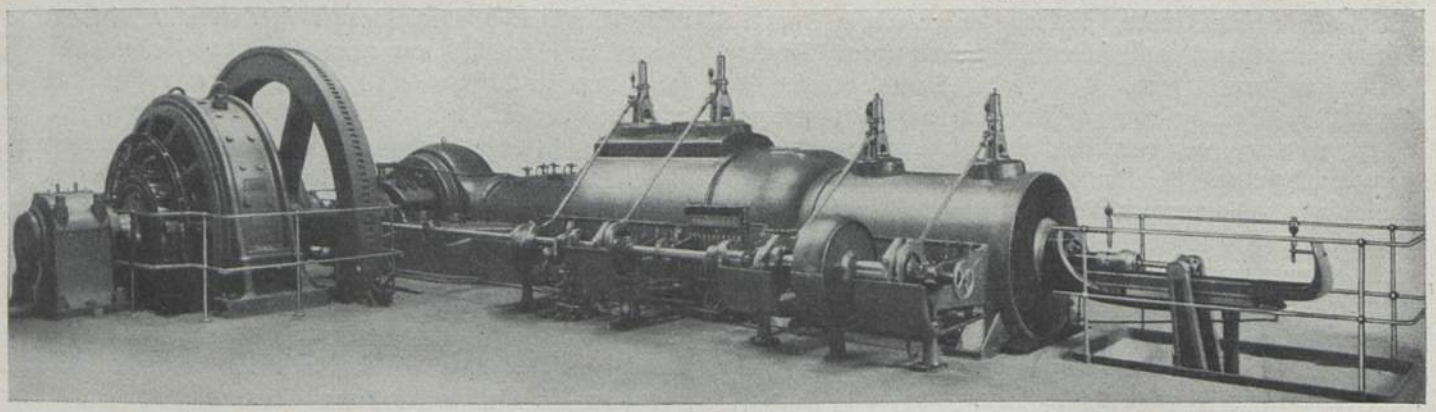
Der Kondensator ist ein allseitig geschlossener Raum, in dem der Dampf, der aus dem Arbeitszylinder kommt, rasch und möglichst vollständig zu Wasser verdichtet wird. Wasser nimmt durchschnittlich nur etwa $^1/_{2000}$ des Raums ein, den der Dampf in Anspruch nimmt, aus dem es entsteht. Wenn keine Luft von außen in das Gefäß treten kann, muß sich also durch die Niederschlagung ein Raum mit Unterdruck ausbilden. Wir hörten bereits, daß sich das Vakuum bis auf 0,15 Atmosphären, ja bis zu $^1/_{10}$ des Atmosphärendrucks bringen läßt.

Die Kühlung des Dampfs kann auf zwei Arten erfolgen. Entweder wird kaltes Wasser in den Kondensatorraum so eingespritzt, daß es sich gründlich mit dem Dampf mischt, oder man läßt einen kühlenden Strom außen an den Gefäßwänden vorübergehen. Sowohl die Einspritz- wie die Oberflächen-Kondensation sind uns grundsätzlich bereits bekannt (Seiten 172 und 180).



405. Zweizylinder-Verbundmaschine mit zwei Kurbeln
Leistung: 200 PS. A. Borsig, Tegel

Welche der beiden Niederschlagungsarten angewendet werden soll, ist heute hauptsächlich davon abhängig, ob man das Kondensat als Kesselspeisewasser wieder verwenden will oder nicht. Der Oberflächen-Kondensator liefert eine treffliche Kesselnahrung, da sich in ihm — abgesehen von der Verunreinigung durch Öltröpfchen, die von der Schmierung der Maschine herstammen — nur das aus dem Dampf gewonnene, also chemisch reines Wasser befindet. Bei der Einspritzmethode wird das Kondensat mit dem Kühlwasser gemischt; dieses ist nur in Ausnahmefällen von Zusätzen frei, die im Kessel durch Steinbildung oder dadurch, daß sie die Wandungen anfressen, störend wirken. Steht aber gutes Kesselspeisewasser in ausreichender Menge zur Verfügung, so wird man stets die Einspritz- oder Misch-Kondensation anwenden, weil dann sehr viel weniger Kühlwasser erforderlich ist, die Betriebskosten geringer sind, die ganze Anlage einfacher und billiger wird. Es ist jedoch mehr Wasser aus dem Vakuum herauszusaugen als bei der anderen Methode.



406. Zweizylinder-Verbundmaschine mit einer Kurbel: Tandem-Anordnung
Leistung: 1200 PS. Wumag, Görlitz

Bild 389 zeigt einen ganz einfachen Einspritzkondensator. Der Dampf, der vom Zylinder herkommt, tritt oben ein, von unten her wird das Kühlwasser zugeführt. Es dringt durch ein Rohr, das mit vielen Löchern versehen ist, und verspritzt in dünnen Strahlen, ähnlich denen, die aus der Brause einer Gießkanne dringen. Dadurch wird eine gründliche Vermischung mit dem Dampf erzielt. Für die Zuführung des Kühlwassers braucht man keine Pumpe, wenn der Behälter, aus dem es stammt, nicht mehr als 6 Meter unter dem Kondensator liegt. Denn die Luft von Atmosphärendruck ist imstande, Wasser gegen ein vollständiges Vakuum 10 Meter hoch zu heben. Da im Kondensator stets ein nur ganz geringer Druck über 0 herrscht, so werden 6 Meter Steighöhe durch die Pressung der freien Luft stets leicht überwunden.

Das Kühl- sowie das Niederschlagwasser, ferner ein Rest nicht verdichteten Dampfs, der immer übrig bleibt, sowie die Luft, die sich in dem Raum mit niedrigem Druck aus dem stets lufthaltigen Kühlwasser abscheidet, werden am unteren Ende des Kondensators fortgeschafft. Hierzu dient eine Pumpe irgendwelcher Bauart, die Luftpumpe genannt wird, obgleich ihre Hauptarbeit in der Wasserförderung besteht. Die Benennung ist dadurch entstanden, daß die Wirkung des Kondensators ja schließlich nur dadurch entsteht, daß er einen luftleeren Raum schafft.

Noch besser ist die Durchmischung von Dampf und Kühlwasser in dem Kaskaden-Kondensator, wo das oben eindringende Wasser von einer Platte auf die andere fällt, hierbei verspritzt und in dünne Rinnsale aufgelöst wird. Der Kondensator auf Bild 390 ist nach dem Gegenstromprinzip gebaut. Der unten zugeführte Dampf dringt nach oben, und auf diesem Weg läuft er den abfallenden Wasserstrahlen entgegen. Das erwärmte Wasser wird unten abgesaugt, droben müssen die Luft und ein Rest nicht verdichteten Dampfs besonders abgeführt werden. Jetzt nennt man die drunten arbeitende Fördereinrichtung Naßluftpumpe, die obere Trockenluftpumpe.

Es gibt auch Einspritzvorrichtungen, die völlig ohne Pumpe zu arbeiten vermögen. Sie heißen Strahlkondensatoren und sind besonders von der Firma Gebrüder Körting in Hannover ausgebildet worden. Das oben angesaugte Wasser tritt durch viele im Kreis angeordnete Düsen ein, von denen in der Schnittdarstellung auf Bild 391 nur zwei zu sehen sind. Der links zugeführte Dampf wird durch eine Reihe kegelförmiger, untereinander liegender Kanäle gleichfalls in viele dünne Strahlen zerspalten und so dem Wasser gründlich beigemischt. Der Dampf verschwindet in diesem fast vollständig und steigert infolge seiner Zuführungsrichtung die Geschwindigkeit der abfallenden Wasserstrahlen. Deren lebendige Kraft ist groß genug, um das erwärmte Wasser gegen die Saugwirkung des Vakuums nach außen zu fördern und sogar noch die Luft mitzureißen, die sich vielleicht abgeschieden hat.

Bei der Einspritz-Kondensation braucht man je nach dem Wärmegrad des zugeführten Kühlwassers 25—35 mal so viel davon, wie das Gewicht des niederzuschlagenden Dampfs beträgt. Die Oberflächen-Kondensation erfordert etwa die doppelte Kühlwassermenge, weil hier keine Durchmischung des Wassers mit dem Dampf eintritt, die Kühlung vielmehr durch trennende Metallwände hindurch ausgeübt werden muß. Der Bau der Anlage ist auch teurer, weil viele Rohre dicht in Querwände eingesetzt werden müssen.

Der Oberflächen-Kondensator besteht grundsätzlich aus einem stehenden oder liegenden zylindrischen Gefäß, das von einer großen Zahl paralleler Rohre durchzogen wird. Durch diese geht das Kühlwasser hindurch, meist in umkehrendem Lauf, wie es auf Bild 392 durch die Pfeile dargestellt ist. Der Dampf füllt das Gefäß, umspült die Rohre also von außen. Der Betrieb kann hier nur bei Anwendung von mindestens zwei Pumpen aufrecht erhalten werden. Das Kühlwasser muß stets unter Druck durch die Rohre getrieben werden, da eine darauf wirkende Saugkraft ja nicht vorhanden ist. Zu der Zirkulationspumpe für das Kühlwasser tritt stets die Luftpumpe, manchmal werden sogar eine Naß- und Trockenluftpumpe vorgesehen, so daß dann gar drei Fördereinrichtungen vorhanden sind. Bild 393 zeigt einen Oberflächen-Kondensator mit abgenommenem Deckel.

Trotzdem wird, wie bereits gesagt, dem Oberflächen-Kondensator stets der Vorzug gegeben, wenn das Kesselspeisewasser, das von draußen genommen wird, erst auf kostspielige Art gereinigt werden muß. Seeschiffe insbesondere haben stets Niederschlageinrichtungen dieser Art, weil ihnen Seewasser als Kühlwasser in unbegrenzten Mengen zur Verfügung steht, die Speisewasserbereitung aber besonders unbequem und teuer ist. Denn die geringste Beimengung von Salz im Speisewasser bringt den hier angewendeten, empfindlichen Kesseln Schaden.

Das aus dem Kondensator von Kolben-Dampfmaschinen gewonnene Kesselspeisewasser muß stets von dem im Zylinder aufgenommenen Öl befreit werden. Dieses wird in einem besonderen Gefäß abgeschieden, in dem das Kondenswasser zum Beispiel durch eiserne Latten, die in seinem Weg stehen, gezwungen ist, immer wieder seine Geschwindigkeit zu verlang-

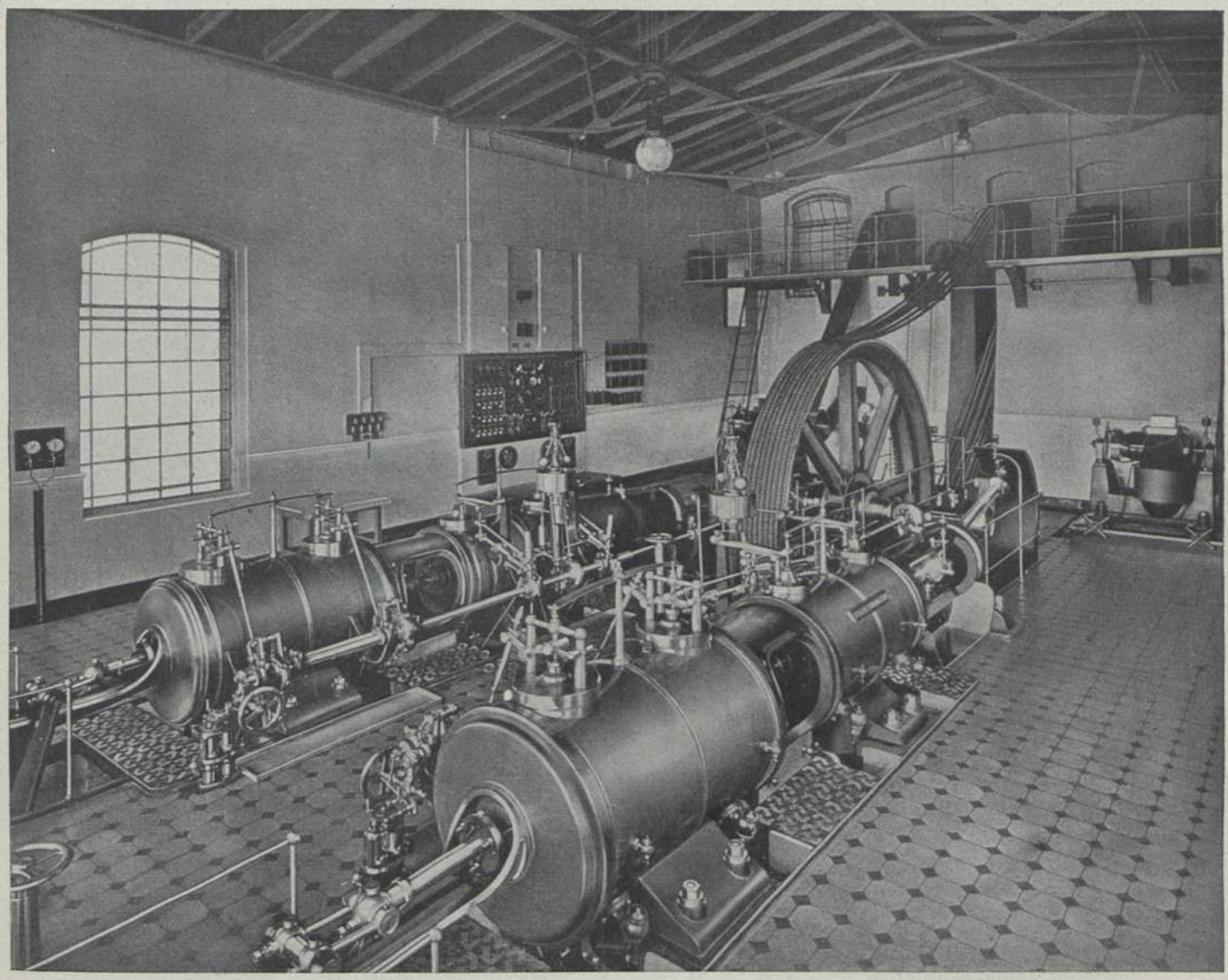
samen. Hierbei bleiben die Öltröpfchen an den Eisen haften und sinken auf den Boden des Gefäßes, von dem eine besondere Ölpumpe die Flüssigkeit absaugt. Bei einer anderen Bauart des Ölabscheiders durchzieht der Wasserstrom mehrere Koksschichten von abnehmender Korngröße und wird hierbei gereinigt. Bei der Konstruktion auf Bild 394 wird das Kondenswasser durch die Schnecke zu einer kreisenden Bewegung gezwungen. Die schweren Öltröpfchen fliegen hierbei durch ein Siebblech in einen äußeren Zylinder, aus dem die Flüssigkeit abgezogen werden kann. Das Öl kann nach Filterung wieder zum Schmieren der Maschine verwendet werden.

Da der Dampf in Turbinen nicht mit geölten Flächen in Berührung kommt, das Kondensat bei diesen Maschinen also besonders rein ist, haben diese Anlagen ausnahmslos Oberflächen-Kondensation. Der Antrieb der Kondensatorpumpen erfolgt entweder von der Hauptkurbel der Maschine aus, deren Zapfen verlängert ist und eine nach unten führende Schubstange bewegt (Tafel XIV), oder durch den zweiten Kreuzkopf der verlängerten Kolbenstange (Bild 406). Häufig erhalten die Pumpen aber auch einen gesonderten Antrieb durch eine kleine Turbine oder einen Elektromotor, der eine allen gemeinschaftliche Welle dreht.

Wo viele Maschinen arbeiten, ist es häufig von Vorteil, eine einzige große, allen gemeinsame Kondensations-Anlage zu betreiben. Hierbei ist sehr sorgfältig darauf zu achten, daß die oft ziemlich langen Dampfzuführungsleitungen durchaus luftdicht bleiben. Häufig kehrende Maschinen, die mit zahlreichen Betriebspausen arbeiten, finden beim Anschluß an eine Zentralkondensation beim Anspringen stets ein gutes Vakuum vor, das sie sich immer erst wieder mühsam erzeugen müßten, wenn jede von ihnen einen Einzelkondensator mit Schubstangenantrieb hätte. Es könnte alsdann, wenn die Betriebspausen länger sind als die Arbeitszeiten, wie zum Beispiel bei Fördermaschinen in Bergwerken, geschehen, daß der Vorteil der Kondensation überhaupt wegfällt, weil es infolge des langen Stillstands der Pumpen niemals zur Ausbildung eines gründlichen Vakuums kommt.

Große Dampfmaschinenanlagen mit 30 000, 40 000, 60 000 Pferdestärken und darüber können nur dort betrieben werden, wo Kühlwasser für die Kondensation in sehr großen Mengen zur Verfügung ist. Die Auswahl des Errichtungsorts für große Elektrizitätswerke, die ja Konzentrationsstellen gewaltiger Kräfte sind, ist sehr oft allein hiervon abhängig. Selbst ein großer See oder ein wasserreicher Fluß sind manchmal keine ausreichende Kühlwasserquelle.

Es ist ein naheliegender Gedanke, das in den Werkbereich herangepumpte Kühlwasser nicht wieder in den See



407. Vierzylinder-Verbundmaschine mit zwei Kurbeln: Zwillings-Tandem-Anordnung
Leistung: 350 PS. Wumag, Görlitz

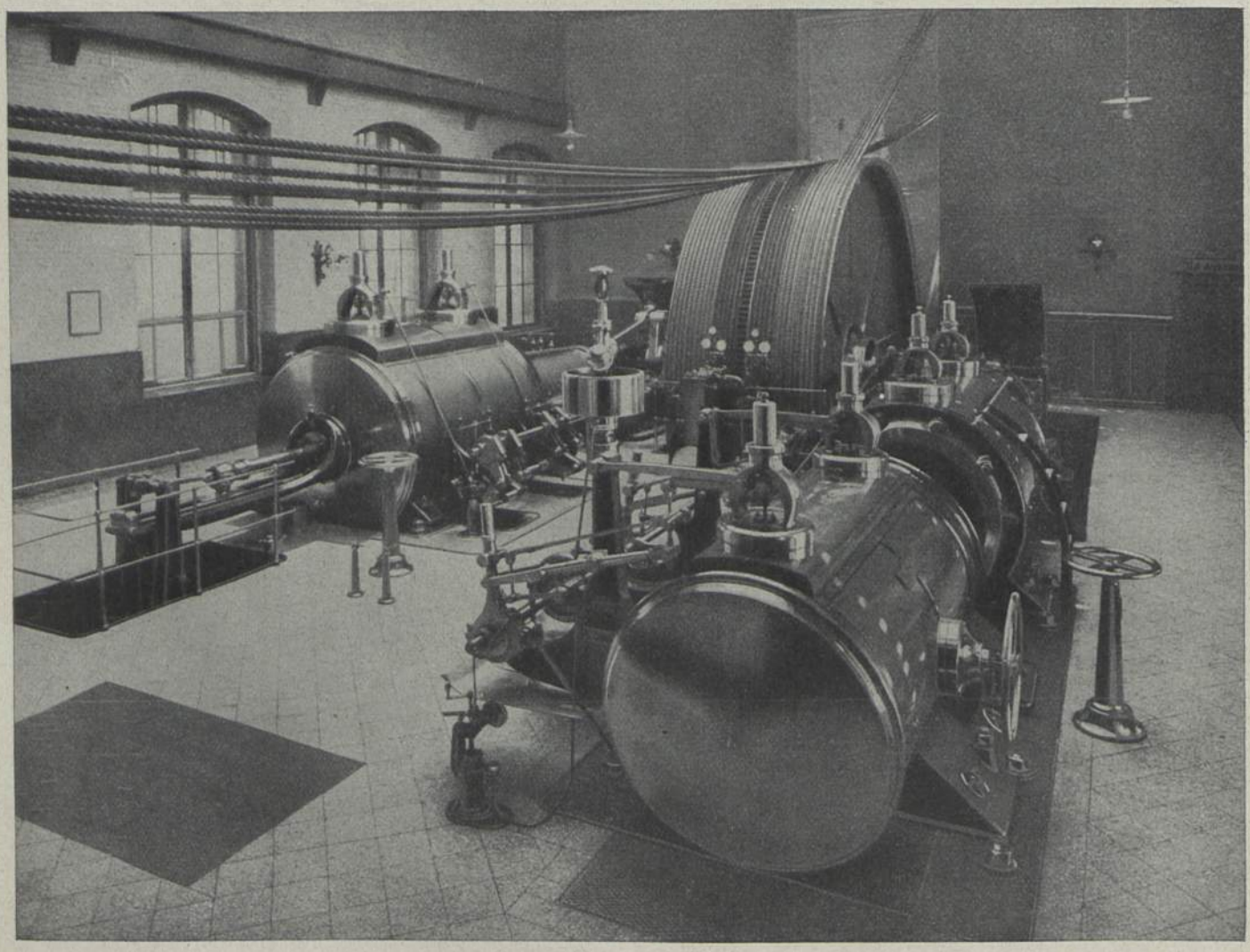
oder Fluß zurücklaufen zu lassen, aus dem es entnommen wurde, sondern es immer wieder zu verwenden. Die Rückgabe ist häufig auch nicht ohne weiteres möglich, weil das in den Kondensatorrohren erwärmte Wasser die Temperatur im See oder Fluß unzulässig steigern würde. Nun verändert sich an dem Kühlwasser, wenn es durch den Kondensator geht, nichts anderes als sein Wärmegehalt. Unmittelbar immer wieder umlaufen kann es jedoch nicht, weil es alsdann keine ausreichende Niederschlagwirkung ausüben würde. Deshalb läßt man bei großen Werken heute fast stets das Kühlwasser auf einem Umweg zurückkehren. Es wird so geleitet, daß es auf einem Teil seines Wegs Gelegenheit hat, gründlich mit der Außenluft in Berührung zu kommen und sich abzukühlen.

Die meisten kennen wohl die hohen kantigen Holzbauten, die neben fast jedem größeren Krafthaus stehen und stets von einer leichten Wolke weißen Dampfs gekrönt sind. Es sind die Rückkühlwerke oder Kühltürme.

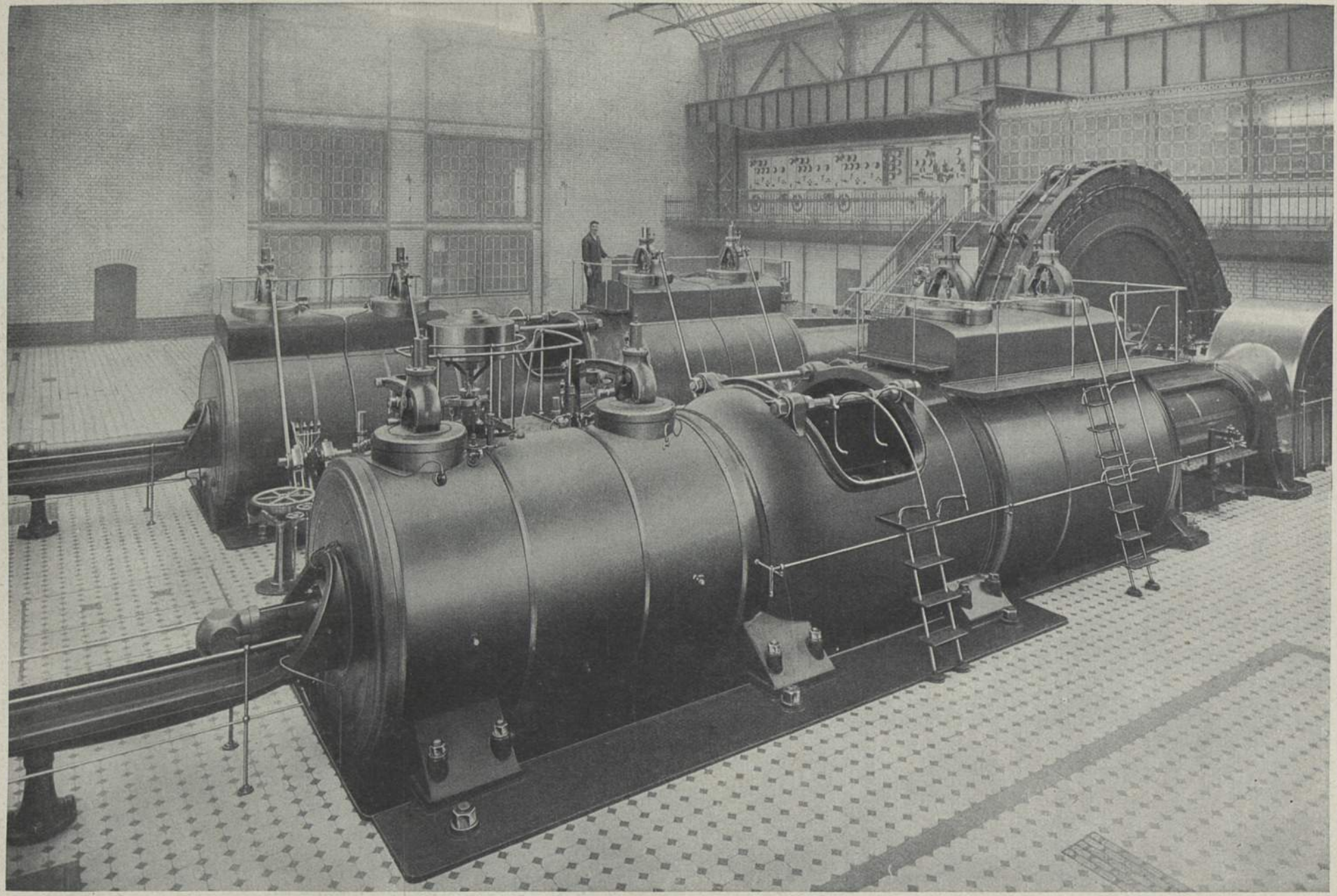
Das aus dem Kondensator kommende, bis in die Nähe der Verdampfungstemperatur erwärmte Kühlwasser wird den Bauten (Bild 395) in etwa einem Drittel ihrer Höhe zugeleitet. Dort strömt es in zahlreichen dünnen Rinnsalen aus und fällt auf die Rieselböden. Es sind das hölzerne Latten oder geneigte steinerne Gerinne. Das Wasser läuft von einer der Latten oder Rinnen auf die nächste darunter liegende, wird beim Aufprallen verspritzt und kommt so mit der kalten Außenluft gründlich in Berührung. Die gekühlte Flüssigkeit wird unten in einem Behälter gesammelt, von wo man sie aufs neue dem Kondensator zuführt. Bild 398 zeigt die Gesamtanordnung einer Kondensationsanlage.

Die Latten oder Gerinnen sollen möglichst so gelegt sein, daß die Luft, die am Turmfuß durch Schlitze eintritt und drinnen sogleich erwärmt wird, in glattem Zug senkrecht nach oben steigen kann, damit möglichst viel Luft an den Wassertröpfchen vorbei streicht. Der hohe, völlig leere Überbau dient als Schornstein, der durch seine Saugwirkung die Luftgeschwindigkeit steigert. Die aufsteigende Luft führt immer einen Teil des Kühlwassers in Form von Dampf empor und hinweg, so daß ständig Ergänzung von draußen her stattfinden muß. Die Kühltürme werden auch öfter in Eisen oder Eisenbeton ausgeführt (Bild 396 und 397).

Eine der größten Rückkühlanlagen (Bild 399) besitzt das Kraftwerk Golpa-Zschornewitz bei Bitterfeld, in dem 220 000 Pferdestärken durch Dampfturbinen erzeugt werden. Die Anlage besteht aus 16 Kühltürmen von je 35 Metern Höhe. Jeder von ihnen hat eine Grundfläche von 22,7 zu 31,9 Metern. Das durch Verdampfung und Verdunstung verlorengehende Kühlwasser wird durch Aufschöpfen aus dem Mulde-Fluß ersetzt, der in einer Entfernung von 7,5 Kilometern vorbeigeht. Täglich laufen durch die 16 Türme 1½ Millionen Kubikmeter, das ist eine Menge, die dem Wasserverbrauch Berlins innerhalb einer ganzen Woche gleichkommt.



408. Zweikurbel-Dreifach-Expansionsmaschine mit drei Zylindern
Leistung: 1000 PS. Wumag, Görlitz



409. Zweikurbel-Dreifach-Expansionsmaschine mit vier Zylindern
Leistung: 7000 PS. Wumag, Görlitz

Die Kondensation des Dampfs bringt, wenn sie in dem hierfür bestimmten Gefäß vor sich geht, der Maschine Nutzen, denn sie erhöht die Wirtschaftlichkeit des Betriebs. Gerade die gegenteilige Wirkung aber tritt auf, wenn der Dampf bereits vor dem Durchschreiten der Auslaßöffnung niedergeschlagen oder auch nur um ein weniges abgekühlt wird.

Die Innenkondensation im Zylinder, der bei oberflächlicher Betrachtung wenig Bedeutung zuzukommen scheint, wurde lange nicht beachtet. Die steigenden Ansprüche an die Wirtschaftlichkeit der Dampfmaschine, die insbesondere durch den Wettbewerb des neu auftretenden Gasmotors erweckt wurden, lenkten jedoch die Aufmerksamkeit auf ältere Arbeiten über die Folgen der Innenkondensation und zwangen dazu, ihren Wirkungen Rechnung zu tragen.

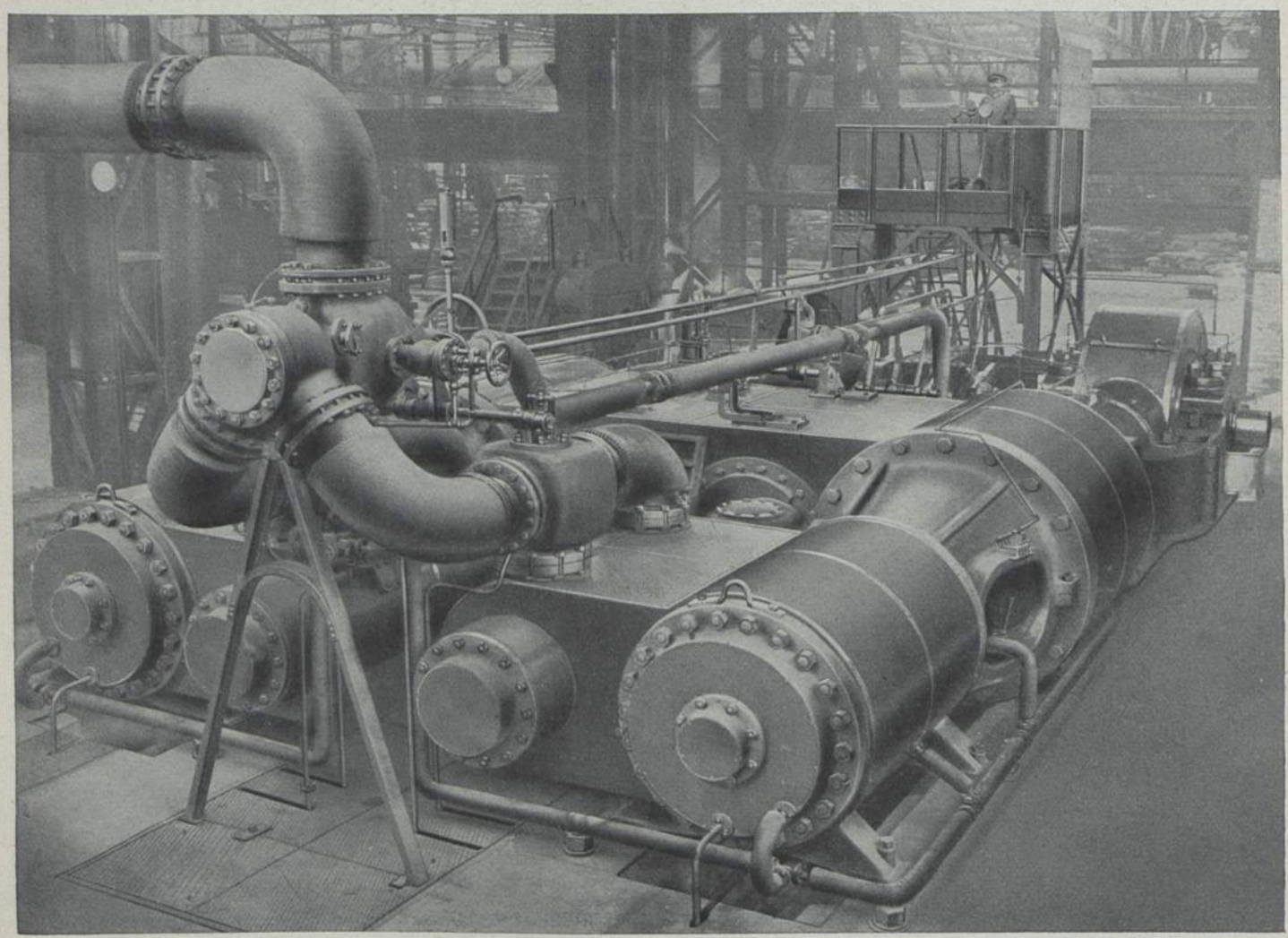
Es war klar geworden, daß jede Abkühlung des Frischdampfs im Zylinder die Kraftausbeute in nicht geringem Maß mindert, und das Streben nach möglichster Beseitigung dieser Schädigung führte zu grundlegenden Neukonstruktionen. Es entstand die Heißdampfmaschine, die Verbundmaschine trat erneut in den Vordergrund. Dazu kam die schon besprochene Gleichstrommaschine.

Wir haben bereits gehört, daß der Dampf, wenn er sich ausdehnt, seinen Wärmeinhalt mindert. Er könnte ja sonst auch keine Arbeit abgeben. Der expandierte Dampf im Zylinder ist also stets kälter als der Frischdampf. Die Folge muß sein, daß die Zylinderwandung und die Kolbenflächen bei der laufenden Maschine die Einstellung auf eine Temperatur anstreben, die zwischen der Wärme des Frischdampfs und der bedeutend geringeren Wärme des am weitesten entspannten Dampfs liegt.

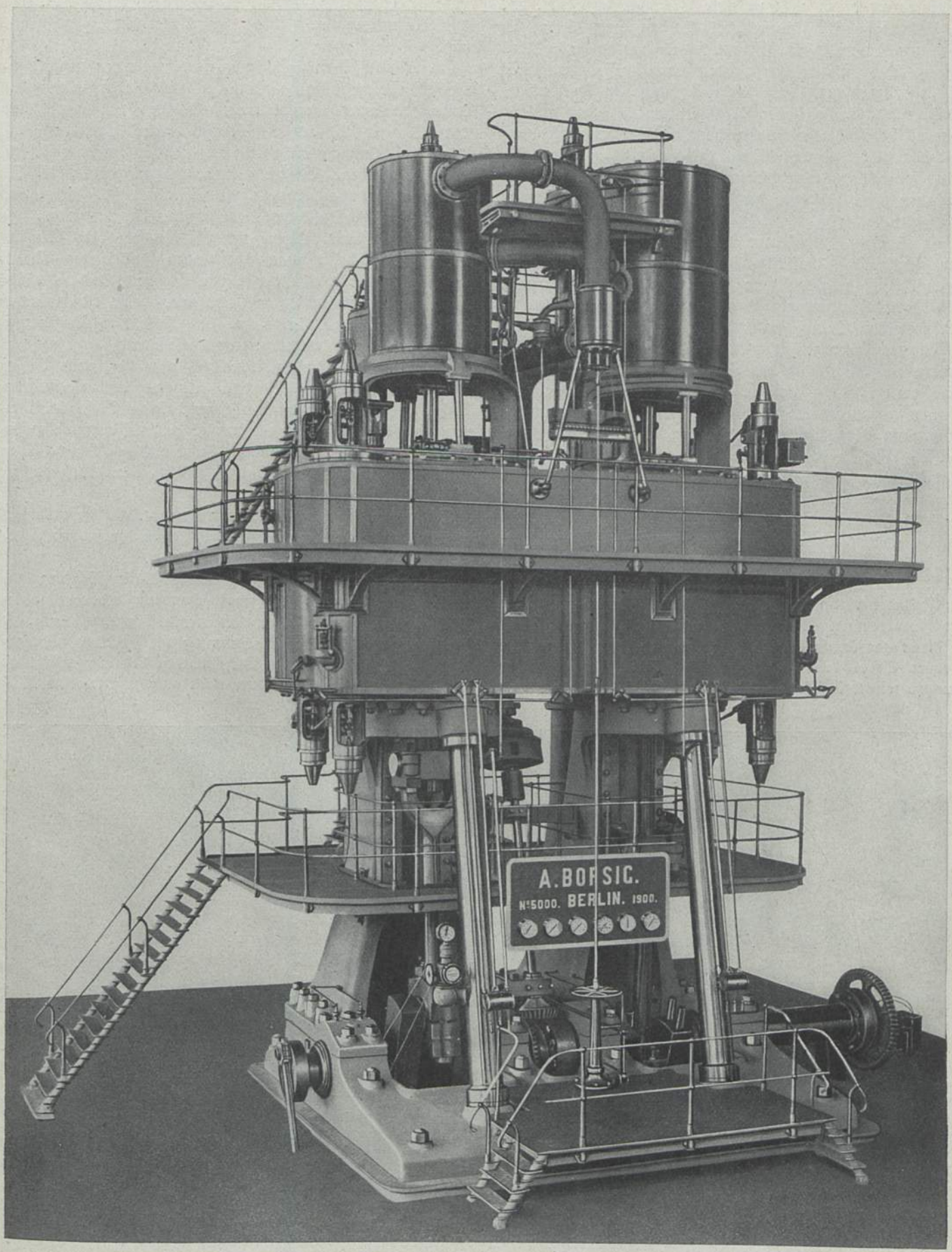
Die Temperatur der Wandung kann etwas höher gehalten werden, wenn man den Zylinder mit einem Dampfmantel umgibt, wie das Watt bereits bei seiner ersten Versuchsmaschine getan hat (Seite 180). Es wird ein zweiter Zylinder mit weiterem lichten Durchmesser herumgelegt (Bild 307, Seite 174) und der Zwischenraum stets neu aus dem Kessel gefüllt. Die Erhöhung des Dampfverbrauchs, die hierdurch verursacht wird — denn der Inhalt des Dampfmantels kondensiert ja ständig, so daß fortwährend Nachfüllung erforderlich ist — wird reichlich wettgemacht durch die Minderung der Innenniederschlagung infolge der Zylinderheizung.

Deren Wirkung aber ist längst nicht weitreichend genug. Die Temperatur des Inneren bleibt bei Expansionsbetrieb trotz des Dampfmantels immer noch so niedrig, daß der Frischdampf bei seinem Eintreten in den Zylinder stets abgekühlt wird und Wasser abscheidet. Die Zylinderwand bedeckt sich mit einer dünnen Wasserhaut, und diese begünstigt den Wärmeaustausch zwischen dem Dampf und dem Eisen.

Der elsässische Gelehrte und Ingenieur Gustav Adolf Hirn hat bereits in den vierziger Jahren des vorigen



410. Große Umkehr-Walzenzugmaschine
Vierzylinder-Verbundmaschine in Zwillings-Tandem-Anordnung. Demag, Duisburg




411. Stehende Dreifach-Expansionsmaschine
Leistung: 3000 PS.

Jahrhunderts durch ausgezeichnete Versuche festgestellt, daß die hierdurch entstehenden Verluste sehr groß sind. Er experimentierte nicht im Laboratorium, sondern suchte Aufklärung über die hier herrschenden Verhältnisse unmittelbar an den Antriebmaschinen seiner Spinnerei in Logelbach zu gewinnen. Die Ergebnisse der Messungen ließen es ihm dringend notwendig erscheinen, der Innenkondensation durch Anwendung besonderer Mittel entgegenzutreten. Im Anschluß an einen älteren Gedanken, der schon Corliß wichtig erschienen war, suchte er der Maschine getrockneten Dampf zuzuführen.

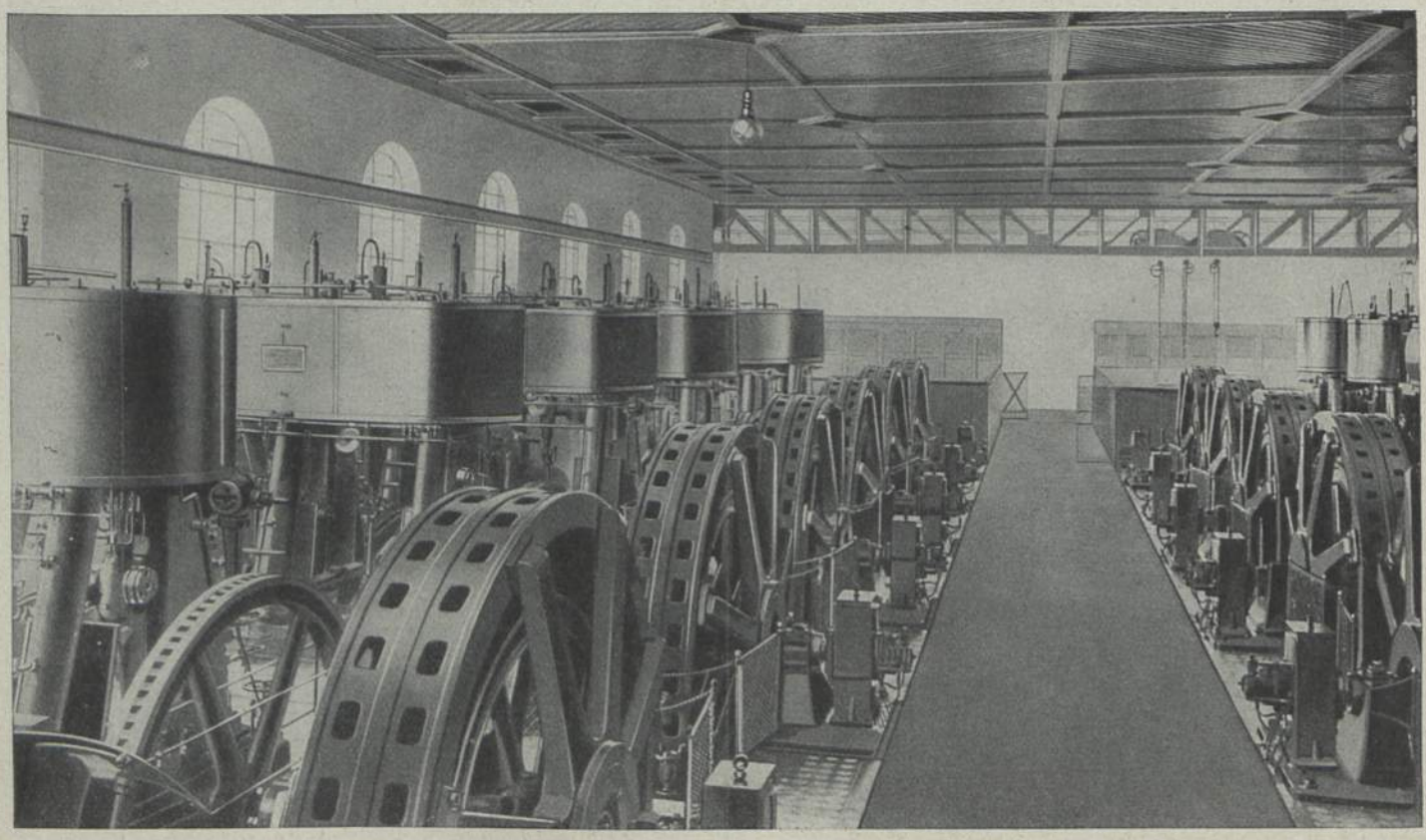
Für gewöhnlich schickt der Kessel Naßdampf in die Rohrleitungen. Die Oberfläche des kochenden Wassers gerät ja im Kessel, gerade wie in jedem gewöhnlichen Kochtopf, in lebhafte Wallungen. Tropfen und Tröpfchen spritzen auf, und der Dampf reißt bei seinem heftigen Fortgang die feinsten hiervon mit. So gelangt nicht nur Dampf, sondern auch Wasser in den Zylinder, das dort nur störend wirkt, weil es nicht arbeitet. Es kann vom Zylinder ferngehalten werden, wenn man den Dampf, nachdem er den Hauptraum des Kessels verlassen hat, durch dünne Rohre streichen läßt, in denen er noch einmal erhitzt wird. Hierbei verdampfen auch die kleinsten Tröpfchen. Zu guter Letzt wird dann noch der Dampf, bevor er in die Maschine eintritt, in einem Blechtopf, dem Wasserabschneider, gezwungen, seine Richtung zu ändern, wodurch etwa noch im Dampf befindliches Wasser zurückgehalten und abgeleitet wird.

Die Trocknung des Dampfs genügt aber noch nicht, um den Zylinder völlig wasserfrei zu halten. Der Dampf, der jetzt hineinkommt, ist zwar nicht mehr naß, aber gesättigt. Er bleibt gasförmig nur so lange, wie er seine Temperatur bewahrt. Sobald diese sinkt, wandelt sich ein Teil des gesättigten Dampfs wieder in Wasser. Daher bildet sich bei Expansionsbetrieb stets eine Wasserhaut an der verhältnismäßig kühlen Zylinderwandung, auch wenn getrockneter Dampf zugeführt wird.

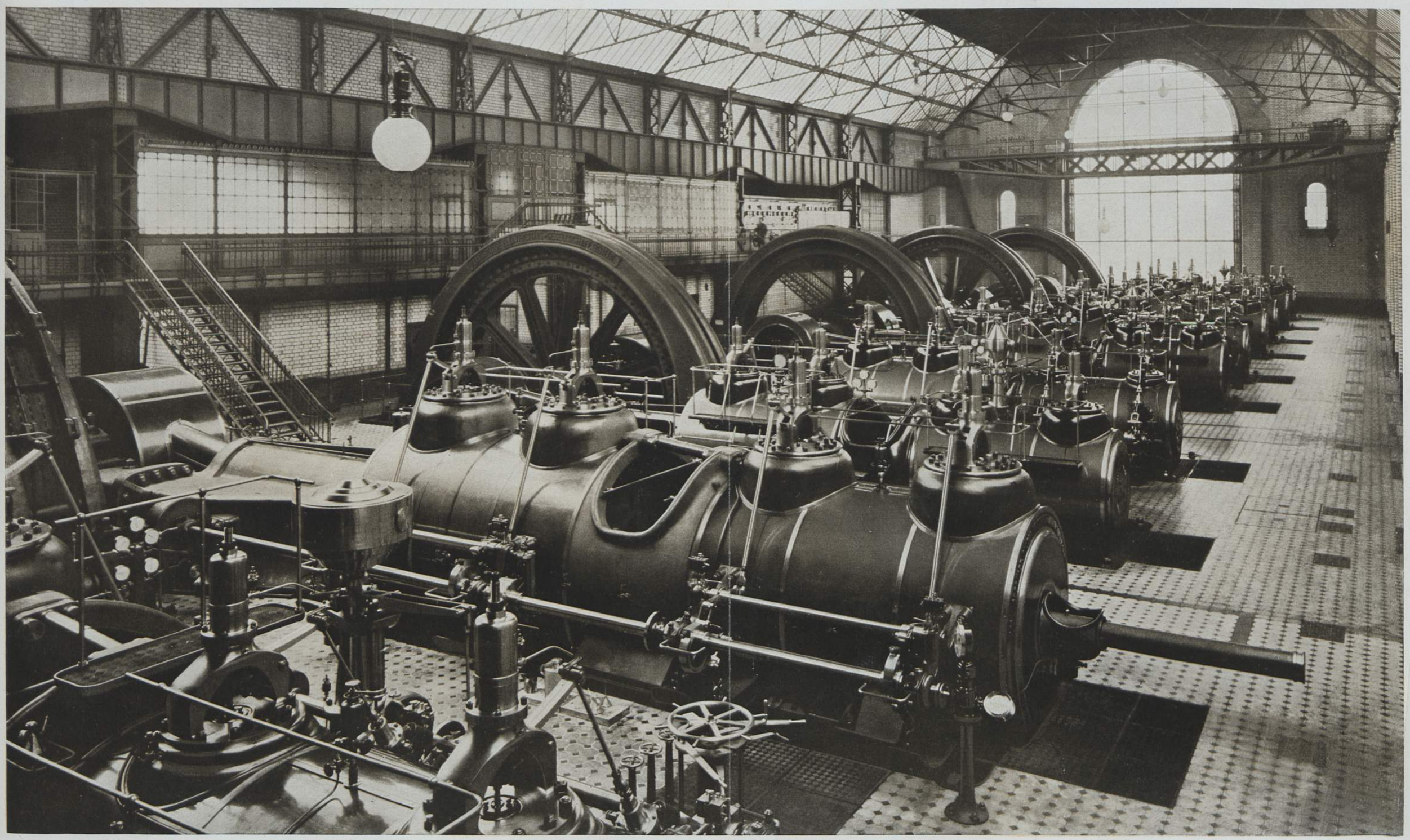
Ein Schüler Hirns, Schwoerer, tat einen entscheidenden Schritt vorwärts, indem er die Nacherhitzung des Dampfs bedeutend weiter trieb. Solange der Dampf mit dem Wasserinhalt des Kessels in breiter Berührung ist, kann seine Temperatur nicht über die Wasserwärme hinaus gesteigert werden. Es wird eben, wie wir schon bei der Erörterung des Papinschen Topfs auf Seite 167 hörten und im nächsten Abschnitt noch weiter ausführen werden, die gesamte zugeführte Wärme zur Verdampfung des Wassers verwendet. Schafft man aber einen gesonderten Raum für den Dampf, in welchem er vom Wasser so gut wie völlig abgetrennt ist, indem er nur noch durch eine dünne Rohrmündung mit dem Hauptraum des Kessels in Verbindung steht, dann kann er bei weiterer Erhitzung auf jede beliebige Temperatur gebracht werden, ohne daß seine Spannung hierbei steigt. Es wird also an den eigentlichen Kessel, zwischen diesen und die Leitung, die zur Maschine führt, eine Rohrschlange gesetzt, an der die heißen Feuergase außen vorbeistreichen. Näheres über die Form und den Einbau dieser Vorrichtung wird im nächsten Abschnitt bei der Besprechung des Kessels mitgeteilt.

Schwoerer steigerte die Dampftemperatur auf diese Art bis zu 250 Grad. Aus dem gesättigten Dampf wurde überhitzter oder Heißdampf.

Der Heißdampf hat die leidenschaftliche Neigung zur Kondensation verloren. Er muß schon sehr bedeutend abgekühlt werden, um sich in Wasser zurückzuverwandeln, so stark, wie es bei seiner Ausdehnung im Zylinder nicht geschieht. Die Folge ist das Verschwinden der Wasserhaut an der Zylinderwandung; hierdurch tritt auch zugleich eine Min-



412. Maschinensaal mit stehenden Dampfmaschinen des Elektrizitätswerks in Petersburg



Ehemaliger Maschinensaal mit liegenden Dampfmaschinen des Kraftwerks Moabit der Berliner Städtischen Elektrizitätswerke A. G.
Heute ist für den Antrieb von Großdynamos die Kolbenmaschine durch die Dampfturbine verdrängt (vgl. Abb. 439, Seite 253)

derung des Wärmeaustauschs zwischen dieser und dem Dampf ein. Er wird nicht mehr in so heftiger Weise gezwungen, immer wieder die mittlere Temperatur der Wandung zu steigern, und dies um so weniger, als die innen liegenden Teile der Füllung gar nicht mehr in Beziehungen zu der Wandung treten. Während nämlich gesättigter Dampf ein vorzüglicher Wärmeleiter ist, kann Heißdampf beinahe als Wärme-Isolator angesehen werden. Die Kühle der Zylinderwandung wird daher nur einer schmalen, ihr unmittelbar benachbarten Heißdampfschicht bemerkbar, die weiter innen liegenden Dampfmassen empfinden sie überhaupt nicht mehr. Das beugt gleichzeitig auch Verlusten in langen Rohrleitungen vor, wo der gesättigte Dampf trotz aller Einhüllungen der Rohre recht lebhaft, der Heißdampf aber fast gar nicht kondensiert, da der außen liegende Dampfring ein Schutzmantel für den Kern ist.

Schwoerers Heißdampfmaschine zeigte sogleich eine bedeutende Verbesserung des thermischen Wirkungsgrads. Sie vermochte jedoch in die Praxis nicht einzudringen, da sehr große äußere Schwierigkeiten auftraten. Die aus tierischen und pflanzlichen Fetten bereiteten Schmieröle für die Zylinder ertrugen die hohen Wärmegrade nicht. Sie verbrannten und übten dann nicht mehr die ihnen obliegende Wirkung. Auch die Hanfpackungen der Stopfbüchsen wurden angegriffen, die gleitenden Flächen an Kolben und Kolbenstange rauhten sich auf und brannten fest. Der treffliche Gedanke schien daher eine Zeitlang nutzlos.

Da überraschte der Ingenieur Wilhelm Schmidt, zunächst in Aschersleben, dann in Kassel, die technische Welt in den neunziger Jahren damit, daß er eine durchaus betriebsfähige Maschine schuf, die mit Heißdampf von sogar 350 Grad betrieben werden konnte. Schmidt hatte damit ein hervorragendes Werk vollbracht, das ihn würdig macht, mit vielen weltberühmten Erfindern in gleicher Reihe zu stehen. Zur Erreichung seines Ziels hatte er sehr viele Einzelteile der Maschine umzugestalten. Seinem Vorgang folgend werden zur Schmierung stets mineralische Öle, zur Dichthaltung der Stopfbüchsen Metalle verwendet.

Die Schmidtsche Heißdampfmaschine hat rasch die Erde erobert. Lokomotiven (Band II, Seite 220) und Lokomobilen werden fast ausschließlich mit überhitztem Dampf betrieben, nachdem die besonderen Schwierigkeiten, die seiner Anwendung gerade bei diesen Maschinen entgegenstanden, von dem Erfinder in ausgezeichneter Weise überwunden worden sind. Auch ortsfeste Dampfmaschinen werden heute in der Regel mit Heißdampf betrieben.

Bei Heißdampfanlagen können Kessel, Zylinder und Kondensator bei gleicher Leistung geringere Abmessungen erhalten, der Dampfverbrauch ist bedeutend vermindert, weil ja nichts von dem Betriebsstoff durch Innenniederschlagung verlorengeht. Der Dampfmantel hat bei Heißdampfmaschinen seine Bedeutung verloren. Es genügt, den Zylinder in wärmeundurchlässige Stoffe einzupacken. Diese werden durch ein übergelegtes Blech nach außen hin abgedeckt.

Die Heißdampfmaschine erfordert freilich eine besonders sorgfältige Herstellung und gute Wartung. Insbesondere darf es niemals vorkommen, daß der Kolben und die Kolbenstange ungeschmiert bleiben. Denn der Sattdampf kann das fehlende Öl für kurze Zeit durch seine Feuchtigkeit ersetzen, während der Heißdampf durchaus trocken ist. Die Überhitzung des Dampfs wird bei ortfesten Maschinen meist nicht über 300 Grad hinausgetrieben.

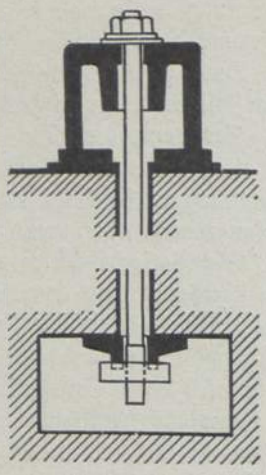
Eine ausreichende Minderung der Verluste durch Innenkondensation ist auch auf eine zweite Art, also ohne Überhitzung des Dampfs, möglich. Die Verfolgung dieser Methode bis zu ihrer äußersten Auswirkung hat zu einer baulichen Ausgestaltung, einer Vergrößerung der Dampfmaschine geführt, die recht erstaunlich ist. Das so geringfügig erscheinende Streben, die Verluste im Zylinder klein zu halten, ward Ursache zur Entstehung der Großdampfmaschine.

Die Kühlheit der Zylinderwände wächst mit dem Umfang der Expansion. Je weiter diese getrieben wird, desto kälter ist der Dampf gegenüber seiner Anfangstemperatur, wenn die Auslaßöffnung freigegeben wird. Diese Tatsache hätte dazu führen können, höhere Dampfdrücke überhaupt nicht anzuwenden, obgleich hierdurch eine Verkleinerung der Zylinderabmessungen möglich ist. Tritt nämlich der Dampf mit etwa 10 Atmosphären Druck in den Zylinder ein, so wird die Expansionslinie sehr lang, bis er sich auf vielleicht 1 Atmosphäre entspannt hat. Soweit mit der Ausdehnung zu gehen, ist für eine gründliche Nutzung des Dampfs notwendig. Man braucht aber hierfür einen sehr langen Zylinder, dementsprechend auch eine lange Gleitbahn für den Kreuzkopf und eine weit ausladende Kurbel. Die Temperaturschwankungen im Zylinder werden außerordentlich groß. Denn Sattdampf von 10 Atmosphären hat eine Temperatur von rund 180 Grad; wenn er auf 1 Atmosphäre niedergespannt ist, beträgt seine Temperatur nur noch rund 100 Grad. Am Ende des Kolbenhubs wäre der Dampf also um 80 Grad kälter als im Anfang, die mittlere Wärme der Zylinderwandung würde sehr tief unter der Temperatur des Frischdampfs liegen.

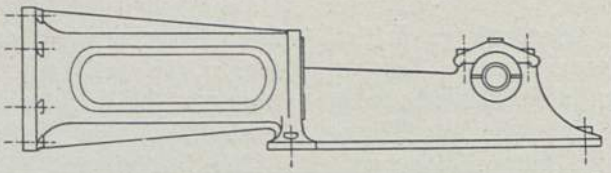
Ein ausgezeichneter Kunstgriff gestattet, über diese Schwierigkeiten hinweg zu kommen; er gibt die Möglichkeit, dennoch hochgespannten Dampf mit Vorteil in den Maschinen zu verwenden. Es wird dazu übergegangen, die Expansion zu zerteilen, sie nicht mehr in Einem, sondern in zwei oder auch mehreren Zylindern von handlicher Länge vor sich gehen zu lassen.

Wenn die Vorgänge, die zur Bildung des sehr langen Diagramms auf Bild 400 führen, sich in einem Zylinder abspielten, so wären die Temperaturverhältnisse darin sehr ungünstig. Offenbar ist dieser Übelstand dadurch zu vermeiden, daß man den Dampf in einem ersten Zylinder sich nur bis A entspannen läßt und die weitere Dehnung bis zum Ende in einen zweiten Zylinder verlegt. Bei einem Anfangsdruck von 10 Atmosphären möge die Dampfspannung bei A noch 4 Atmosphären gleich einer Dampfwärme von 143 Grad betragen. Dann ist der Temperaturabfall im ersten Zylinder nur 37 Grad, im zweiten, wo die Dehnung bis zu 1 Atmosphäre geführt wird, 43 Grad. Die ganze Expansionskraft des Dampfs kann jetzt ausgenutzt werden, ohne daß die Innenkondensation zu arg wird. Für den zweiten Zylinder ist die Höhe der Frischdampf-Temperatur gleichgültig, für ihn bedeutet die Abdampftemperatur des ersten Zylinders den Anfang.

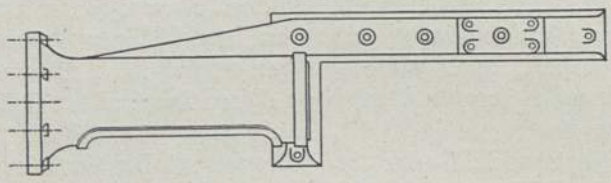
Es ist meist erwünscht, daß die Leistungen der beiden Zylinder, in denen der Dampf nacheinander arbeitet, in denen er also jedesmal einen Kolben vorwärts treibt, gleich sind. Nun hat aber der Dampf, wenn er in den zweiten Zylinder eintritt, eine geringere Spannung, weshalb man dieses Gefäß auch Niederdruckzylinder nennt, im Gegensatz zu dem anderen, das Hochdruckzylinder heißt. Damit der Dampf auf den Kolben des Niederdruckzylinders die gleiche Kraftwirkung üben kann wie auf den Kolben des Hochdruckzylinders, muß die Fläche des ersten entsprechend vergrößert sein. Der Niederdruckzylinder hat daher aus diesem und anderen Gründen stets einen größeren Durchmesser als der Hochdruckzylinder.



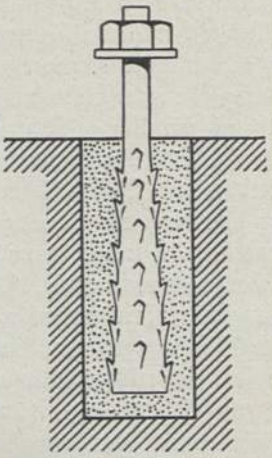
413. Fundament mit durchgehendem Anker



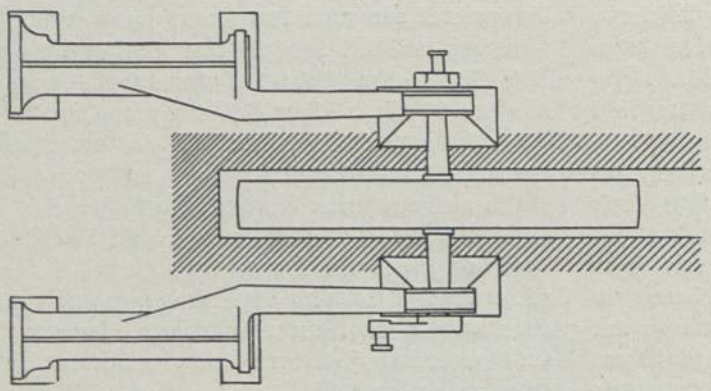
414a. Aufriß eines Bajonettrahmens



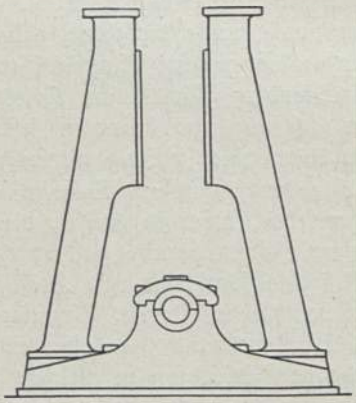
414b. Grundriß eines Bajonettrahmens



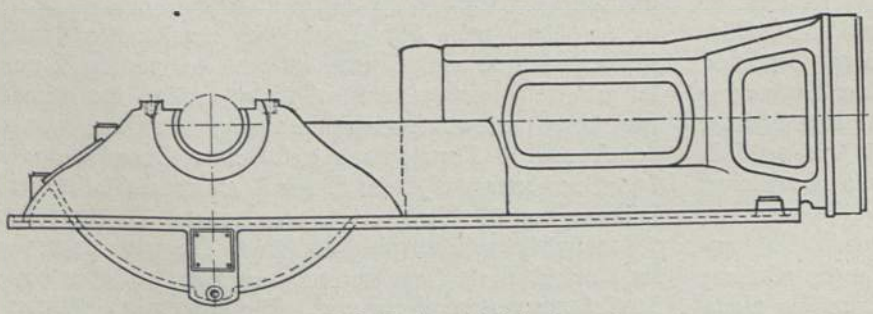
415. Fundament mit Steinschraube



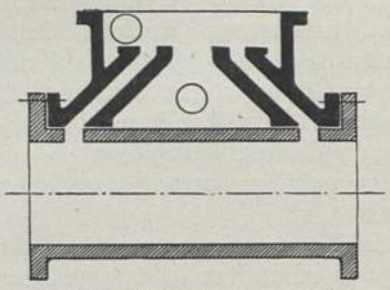
416. Grundriß eines Rahmens für Zweikurbel-Maschinen
Er besteht aus zwei Bajonettrahmen



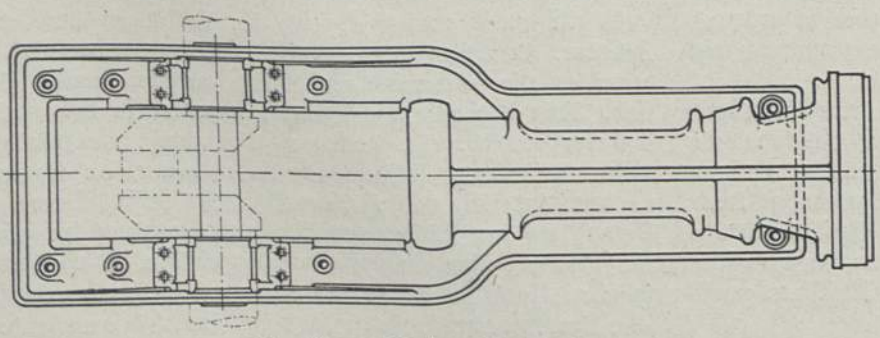
417. Rahmen für stehende Maschinen



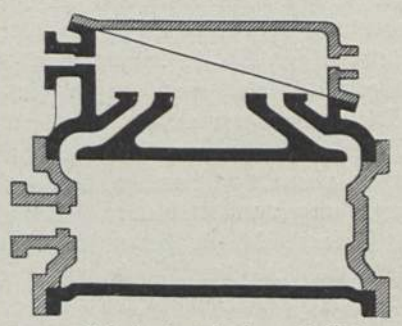
418a. Aufriß eines Gabelrahmens



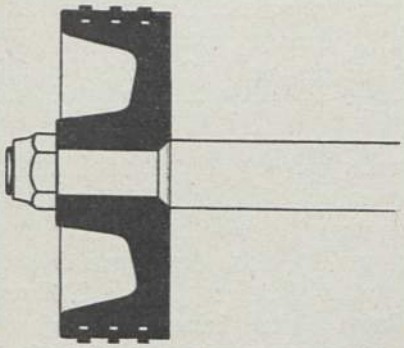
419. Schnitt durch einen Zylinder aus zwei Gußstücken



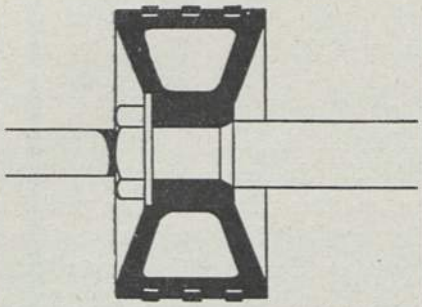
418b. Grundriß eines Gabelrahmens



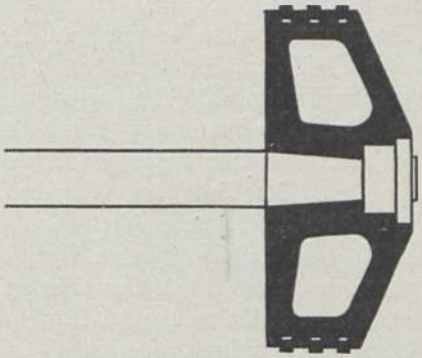
420. Schnitt durch einen Zylinder aus einem Gußstück



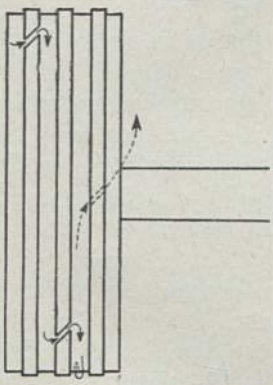
421. Einfacher Kolben für kleinere Maschinen



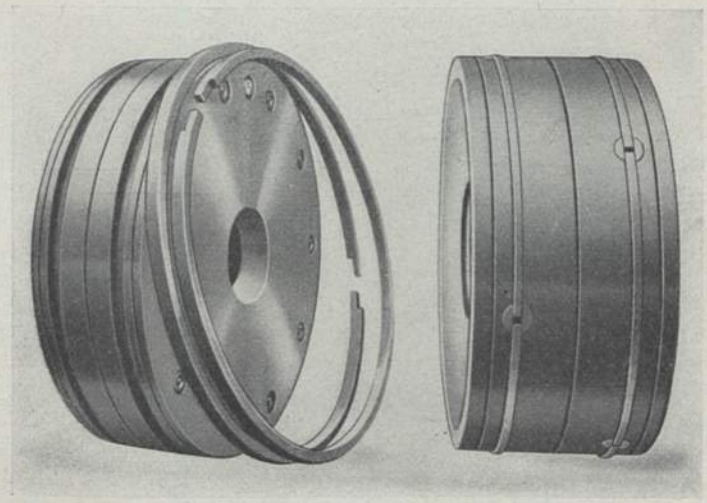
422. Doppelwandiger Kolben für liegende Maschinen



423. Doppelwandiger Kolben für stehende Maschinen

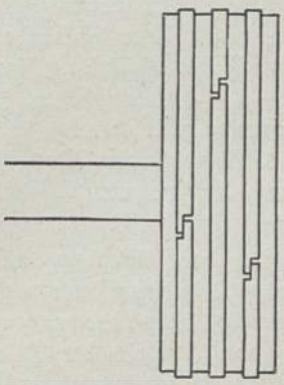


424. Dichtungsringe mit schräger Fuge

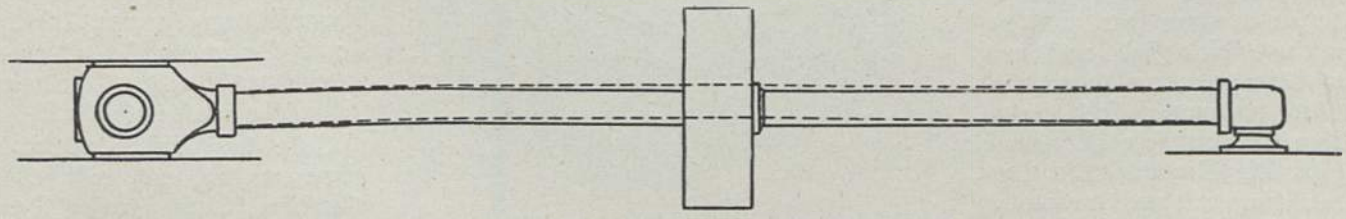


425. Kolben mit Dichtungsringen

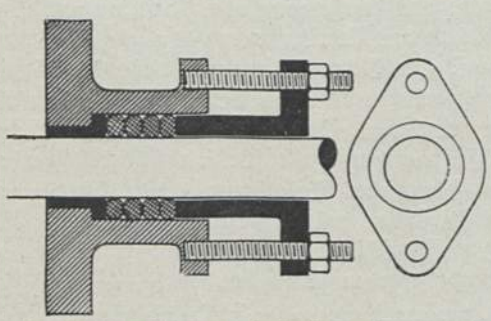
Links: Dichtungsringe mit verblatteter Fuge, Ausführung der Wumag, Görlitz. Rechts: Vierteilige Dichtungsringe mit Zusatzfedern, Ausführung der Hanomag, Hannover-Linden



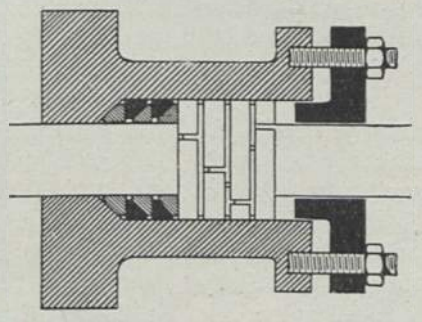
426. Dichtungsringe mit verblatteter Fuge



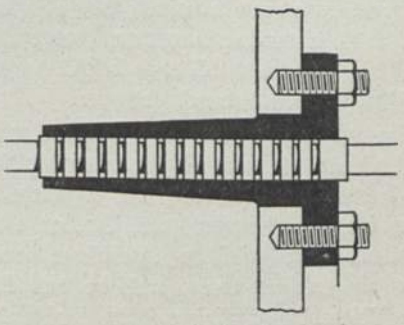
427. Kolbenstange nach Collmann



428. Stopfbüchse mit Weichpackung und Brille



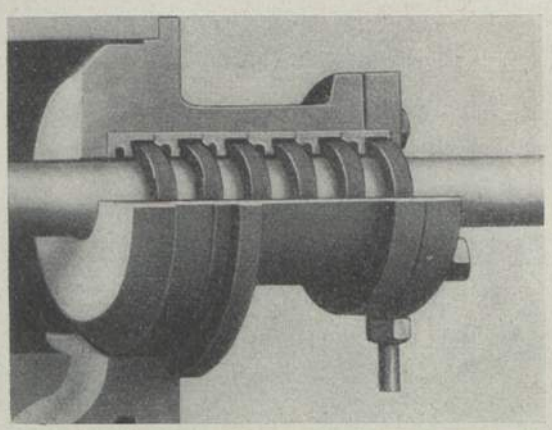
429. Metallstopfbüchse nach Howaldt



430. Labyrinth-Dichtung

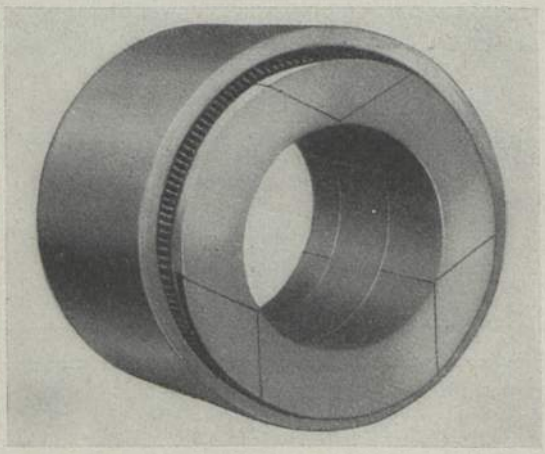
Maschinen, die in der geschilderten Art arbeiten, nennt man in England, wo sie, wie ja nahezu alle Gattungen der Dampfmaschine, entstanden sind, Compound- (sprich Kompaund-) Maschinen. Reuleaux hat hierfür die treffliche Verdeutschung Verbund-Maschine gefunden.

Die Verbund-Anordnung bringt neben dem thermischen Nutzen, von dem wir ausgingen, auch noch Vorteile mechanischer Art. Die Teile des Getriebes, welche die Kolbenkraft auf die Kurbelwelle übertragen, müssen an jeder Maschine stets so kräftig gehalten sein, daß sie dem höchsten auftretenden Druck widerstehen können. Wenn der Dampf sich in Einem Zylinder von 10 Atmosphären Kesseldruck auf 1 Atmosphäre Austrittspannung dehnt, so beträgt der höchste Kolbendruck darin 10 — 1 = 9 Atmosphären. Er tritt dann auf, wenn auf der einen Zylinderseite nach dem Hubbeginn der Einlaß geöffnet ist, während auf der anderen Seite der Dampf ausströmt. Läßt man ihn aber mit 4 Atmosphären abziehen, dann ist der Höchstdruck nur noch 10 — 4 = 6 Atmosphären. Im Niederdruckzylinder beträgt er 4 — 1 = 3 Atmosphären. Das Gestänge kann also bedeutend leichter gehalten sein.



431. Stopfbüchse mit Metallabdichtung System Lentz
Heinrich Lanz, Mannheim

Man darf hiergegen nicht einwenden, daß eine Maschine mit zwei Zylindern, die nebeneinander liegend auf zwei Kurbeln der Hauptwelle arbeiten, ja ein doppeltes Gestänge erfordert. Denn Einzylindermaschinen, von denen wir bisher bei unseren grundsätzlichen Erörterungen ausschließlich gesprochen haben, sind mit Ausnahme der Gleichstrommaschine tatsächlich nur für kleine Leistungen brauchbar. Größere Kraftwirkungen erfordern stets zwei Zylinder, und diese sind auch aus mancherlei anderen bereits erwähnten und noch zusammenfassend darzulegenden Gründen sehr oft unumgänglich. Die Möglichkeit, bei Verbundmaschinen mit zwei Kurbeln die Gestängeabmessungen geringer halten zu können als bei Maschinen, die bei gleichem Anfangsdruck mit einstufiger Expansion arbeiten, übt also voll ihre günstige Wirkung aus. Denn die einzelnen, fortgesetzt hin und her gehenden Massen, die immerwährend beschleunigt und verzögert werden müssen, werden dadurch geringer.



432. Ringe einer Proell-Packung
Demag, Duisburg

Um die Herstellung der Verbundmaschinen zu verbilligen, richtet man es stets so ein, daß die Gestängeteile der Hochdruck- und der Niederdruckseite gleiche Abmessungen erhalten. Nur die Durchmesser von Kolben und Zylindern sind verschieden. Bei gleicher Hublänge auf beiden Seiten, die stets eingerichtet wird, müssen die Durchmesser von Hoch- und Niederdruckzylinder sich zueinander verhalten wie die Dampfmengen, die bei jedem Hub aufgenommen werden. Es ist zu berechnen, wie groß diese Dampfmengen sein müssen, damit beide Kolben zur Erzielung eines gleichmäßigen Gangs der Maschine annähernd gleiche Arbeit leisten. Der bereits weit entspannte Dampf, der in den Niederdruckzylinder tritt, braucht natürlich für dieselbe Menge, genauer gesagt für das gleiche Dampfgewicht, einen weit größeren Raum als der Frischdampf im Hochdruckzylinder.

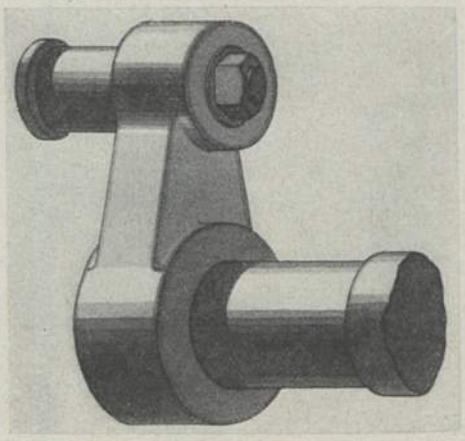
Es ist nun nicht immer möglich, den Dampf aus dem Hochdruckzylinder ohne weiteres in den Niederdruckzylinder strömen zu lassen. Denn wenn die Kurbeln der beiden Seiten, wie es meist geschieht, um 90 Grad gegeneinander versetzt sind, dann haben die Kolben stets verschiedene Stellungen, und der Hochdruckzylinder liefert keineswegs die größte Dampfmenge gerade in dem Augenblick, in dem der Niederdruckzylinder diese haben muß. Wenn der Hochdruckkolben am Ende eines Hubs angelangt ist, dann steht der Niederdruckkolben gerade in der Mitte. Dies ist die Zeit höchsten Dampfbedarfs bei ihm; der Hochdruckzylinder kann aber gerade jetzt fast nichts abgeben. Damit der zweite Zylinder dennoch stets ausreichende Füllung erlangen kann, muß daher in die Verbindungsleitung meist ein Ausgleichgefäß eingeschaltet werden. In diesem befindet sich immer ein Mehrfaches der Dampfmenge, die zur einmaligen Füllung des Niederdruckzylinders ausreicht. Das Gefäß heißt in der englischen Sprache receiver (sprich ressiwer), im Deutschen wird es Aufnehmer (Bild 401) genannt. Der Zwischenbehälter wird häufig mit einem Dampfmantel ausgerüstet, der den Inhalt warm hält.

Die Vorteile, die der Betrieb mit Heißdampf bietet, macht sich auch die Maschine mit zweistufiger Dampfdehnung zunutze. Die Heißdampf-Verbundmaschine ist ein ausgezeichnetes Werkzeug der neuzeitlichen Kraftmaschinentechnik.

In vielen Fabriken werden, wie schon erwähnt, auch außerhalb der Antriebmaschinen große Dampfmengen gebraucht. So in Papier-, Gummi-, Zucker- und chemischen Fabriken, in Brauereien, Färbereien, Trocknungsanlagen, zur Erwärmung von Bottichen und Walzen. Auch die Heizung von Arbeitsräumen erfolgt häufig durch strömenden Dampf. Der Gedanke liegt nun nahe, die für alle solche Zwecke erforderlichen Mengen dem Kessel für die Betriebsmaschine zu entnehmen. Das wäre aber sehr unwirtschaftlich, weil die Kesselspannung heute für solche Zwecke zu hoch ist, und die Drosselung des Frischdampfs eine Vergeudung von Arbeitskraft darstellen würde. Die Spannung des Abdampfs von Auspuffmaschinen aber ist genügend erniedrigt, um sogleich verwendet werden zu können.

Wenn die Nebenverwertungen große Dampfmengen erfordern, etwa die Hälfte des Maschinenabgangs, dann ist es lohnend, auf den Nutzen der Kondensation zu verzichten und die Betriebsmaschine mit Auspuff arbeiten zu lassen. Ist

aber der Dampfbedarf geringer oder unterliegt er starken Schwankungen, dann kann Abdampf nicht mehr mit gutem wirtschaftlichen Nutzen angewendet werden. Es wird jetzt, wenn eine Verbundmaschine zur Verfügung steht, Zwischendampfverwertung eingerichtet. Der Dampf, der im Hochdruckzylinder gearbeitet hat, geht teils zur Verbrauchsstelle, teils zum Niederdruckzylinder, der Dampf, der im Niederdruckzylinder gearbeitet hat, geht zum Kondensator. Die Entnahme erfolgt aus dem Aufnehmer. Nur genaue Berechnungen können nachweisen, daß diese Methode die wirtschaftlichere ist. Es hat sich gezeigt, daß das Arbeiten mit Kondensation, die den Gegendruck im Niederdruckzylinder erniedrigt, billiger ist als die Versorgung der Nebenanlagen mit Auspuffdampf, wenn diese nicht sehr große und wechselnde Dampfmengen gebrauchen.



433. Welle mit aufgeschrumpfter Stirnkurbel

Der Dampf, der dem zweiten Zylinder aus dem Aufnehmer zufließt, hat nun nicht mehr wie bei nicht angezapftem Zwischengefäß stets annähernd die Spannung des Abdampfs aus dem ersten Zylinder. Der Druck im Aufnehmer wechselt mit der Größe der entnommenen Mengen. Eine selbsttätige Vorrichtung regelt die Steuerung des Niederdruckzylinders so ein, daß dessen Kolben trotzdem immer mit ausreichend gleicher Kraft auf die Kurbel arbeitet. Bei starker Entnahme aus dem Zwischenbehälter wird die Füllung des Niederdruckzylinders vergrößert. Wenn die entnommene Dampfmenge so groß wird, daß die zu starke Verringerung des Aufnehmer-Inhalts den geregelten Gang der Maschine gefährden würde, dann läßt ein wiederum selbsttätig arbeitender Apparat dem Zwischenbehälter gedrosselten Frischdampf aus dem Kessel zufließen. Das gleiche geschieht in den Zeiten, in denen die Maschine stillgesetzt ist. Tafel XIV zeigt eine moderne Heißdampf-Verbundmaschine mit Kondensation und Einrichtung für Zwischendampfentnahme. Der Gedanke, die Dampfdehnung auf zwei Gefäße zu verteilen, ist bereits sehr früh entstanden. Schon im Jahre 1781, also zwölf Jahre, nachdem Watt seinen ersten Schutzbrief erhalten hatte, in dem die Expansion nur recht nebensächlich erwähnt wurde, ließ Jonathan Hornblower sich eine Maschine mit zwei Zylindern schützen, in denen der Dampf nacheinander arbeiten sollte. Dieser Mann, den wir bereits als Erfinder des entlasteten Rohrventils kennengelernt haben, entstammte einer Familie, deren Söhne sich sämtlich mit dem Dampfmaschinenbau beschäftigten. Watt hat mit ihnen sehr harte und scharfe Patentkämpfe durchführen müssen.

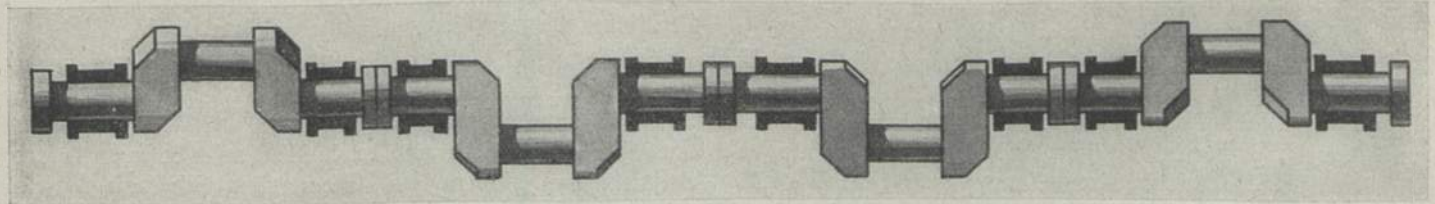
Jonathan Hornblowers Zweifach-Expansionsmaschine konnte keinen Erfolg erringen, weil der Anfangsdruck des zugeführten Dampfs zu gering war, und weil der Erbauer ohne Kondensation arbeiten mußte, die unter Watts Schutzrecht fiel. Die beiden Zylinder standen nebeneinander in der Längsrichtung des Balanciers (Bild 402). Der Hochdruckzylinder hatte den kleineren Hub. In den Jahren 1790 und 1791 führte Hornblower die erste große Maschine nach seinem System aus. Sie diente zur Wasserhaltung auf der Tincroft-Grube in Cornwall.

Erst nachdem der Ablauf von Watts Schutzrecht die Schöpfungen des großen Erfinders hatte Allgemeingut werden lassen und man mutig genug geworden war, höhere Kesseldrücke anzuwenden, konnte die Zweifach-Expansionsmaschine vorteilhaft wirken. Arthur Woolf baute 1804 Hornblowers Maschine doppeltwirkend und mit Wattscher Kondensation für 4 Atmosphären Anfangsdruck aus. Die Kolben mußten, da sie noch ebenso unter dem Balancier angeordnet waren, wie Bild 403 es zeigt, gleichlaufend sein. Für die Dampfüberführung ordnete Woolf daher gekreuzte Rohre an. Beim Hochgehen der Kolben sandte der obere Raum des Hochdruckzylinders Dampf in den Unterraum des Niederdruckzylinders, beim Niedergehen strömte Dampf vom Unterraum des Hochdruckzylinders zum oberen Raum des Niederdruckzylinders. Die Steuerung erfolgte durch Rohrventile, die auf Bild 403 schematisch als Hähne dargestellt sind.

„Woolf hatte", wie Matschoß erzählt, „von der Wirkung der Expansion und den Eigenschaften des Dampfes äußerst unklare und zum Teil falsche Vorstellungen. Seine Maschinen aber waren meisterhaft in der Konstruktion, Anordnung und Ausführung, denn Woolf war nicht nur Ingenieur, sondern auch ein äußerst geschickter Metallarbeiter, von dessen Maschinenausführungen wohl gesagt wurde, sie sähen aus wie Schmuckstücke eines Ausstellungsraums, aber nicht wie Maschinen, die für die Wasserhaltung einer Grube bestimmt seien."

Die erste Maschine dieser Art wurde in einer Brauerei zu London in Betrieb gesetzt. 1806 gründete Woolf gemeinschaftlich mit dem Ingenieur Edwards eine Maschinenfabrik, die er sechs Jahre später in den Grubenbezirk von Cornwall verlegte, weil er mit scharfem Blick erkannt hatte, daß dort die Dampfmaschinen immer noch das größte Ausbreitungsfeld finden würden. Die Woolfsche Maschine ist für die Entwicklung des Dampfmaschinenbaus sehr wichtig geworden.

Die beiden Zylinder wurden später quer zur Längserstreckung des Balanciers nebeneinander gesetzt, so daß sie gleichen Hub machen konnten. Man stellte sie auch auf verschiedene



434. Gekröpfte Welle aus Einzelteilen für Mehrkurbelmaschinen

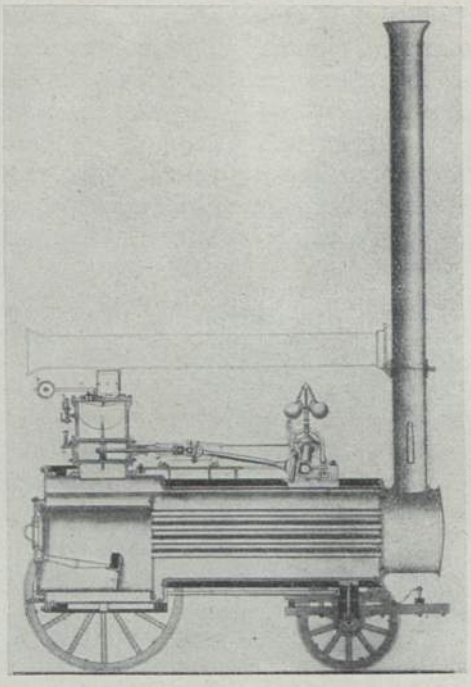
Seiten des Balanciers, so daß die Kolben nun gegenläufig waren, die Kreuzung der Überführungsrohre aufhören konnte.

Große Verdienste um die allgemeine Einführung der Verbundmaschine hat sich dann Gerhard Moritz Roentgen erworben. Er war zu Esens im deutschen Ostfriesland geboren, trat aber als Offizier in die holländische Marine ein und wirkte fortab in den Niederlanden. Auf seiner Werft bei Rotterdam baute er 1828 die ersten Schiffsmaschinen mit Zweifach-Expansion. An ihnen waren die Kurbeln zum erstenmal um 90 Grad gegeneinander versetzt. Die sehr guten wirtschaftlichen Ergebnisse dieser Maschine bewirkten, daß sie auf Schiffen bald allgemein angewendet wurden. Bei den ortsfesten Maschinen ist die Bauart erst gegen Ende der sechziger Jahre häufiger geworden.

In Hochleistungsmaschinen, die mit Dampfdrücken von zwölf und mehr Atmosphären arbeiten, sind auch bei zweifacher Dehnung die Temperaturabfälle in den Zylindern noch zu groß. Hierbei wird alsdann noch ein Mitteldruckzylinder zugefügt, so daß der Dampf dreimal Arbeit leistet. Bei einem Anfangsdruck von 15 Atmosphären expandiert er im Hochdruckzylinder etwa auf 6 Atmosphären, hierauf wird er im Mitteldruckzylinder auf $2^1/_2$ Atmosphären entspannt und erreicht im Niederdruckzylinder die Kondensatorspannung von $^1/_{10}$ Atmosphäre. Bei einer solchen weiten Reise durch die Maschine hat sich jedes Kubikmeter des Frischdampfs auf etwa 20 Kubikmeter vergrößert. Das erste Schiff, das von einer Dreifach-Expansionsmaschine angetrieben wurde, war der älteste Schnelldampfer des Norddeutschen Lloyd, die „Elbe", die im Jahre 1881 in Dienst gestellt wurde und 1895 unterging (Band II, Seite 212).

Bei ganz großen Maschinen wird vierstufige Dehnung angewendet. Der Dampf durchläuft nacheinander den Hochdruck-, den ersten Mitteldruck-, den zweiten Mitteldruck- und den Niederdruckzylinder. Weitere Unterteilung der Expansion bringt keine Vorteile mehr.

Nicht immer ist für große Leistungen die Mehrfach-Expansions-Einrichtung am Platz. Maschinen, die oft stillgesetzt und wieder angelassen werden müssen, sind nicht günstig gestellt, wenn die anderen Zylinder aus dem Hochdruckzylinder beliefert werden. Denn für das Anspringen ist stets eine besonders hohe Kraftleistung erforderlich, weil ja alle laufenden Maschinenteile aus der Ruhe in die Bewegung übergeführt werden müssen. Man will beim Anlassen an allen Kurbeln den höchsten Dampfdruck haben, erhält ihn aber bei mehrfacher Dehnung ohne weiteres nur am Hochdruckzylinder. Die anderen Zylinder können, wenn die zwischengesetzten Aufnahmegefäße, wie häufig, sehr klein sind, gar keine Kraft entfalten oder nur eine geringe bei großen Aufnehmern, weil der Dampfdruck darin während des Stillstands durch Kondensation gesunken ist. Meist wird daher für absatzweis arbeitende und besonders für Umsteuermaschinen Zwillings- oder Drillingsanordnung gewählt. Hierbei erhalten alle Zylinder, die dann gleiche Größe haben, Frischdampf.



435. Erste von R. Wolf, Magdeburg-Buckau, im Jahre 1862 erbaute fahrbare Lokomobile von 8 Pferdestärken
Deutsches Museum, München

Rangierlokomotiven sind stets Zwillingsmaschinen. Bei Schnellzug- oder Güterzug-Lokomotiven aber wird gern doppelte Dehnung angewendet, obgleich auch sie häufig stillgesetzt werden. Man will aber während der oft sehr langen Fahrzeiten die Dampfersparnis, welche die mehrstufige Dehnung mit sich bringt, nicht einbüßen. Es sind Umlaufventile vorgesehen, die dem Lokomotivführer gestatten, während der Anfahrperiode, in der die schwere Arbeit des Anziehens eines ganzen Zugs zu leisten ist, jedem Zylinder Frischdampf zuzuführen. Später werden diese Ventile geschlossen, und es tritt Verbundwirkung ein.

Bild 404 stellt die verschiedenen Zylinderanordnungen zusammen, wie sie bei den Dampfmaschinen heute üblich sind.

Einzylindermaschinen (Schema Teilbild 1, Ansicht Bild 365) werden, wie bereits gesagt, nur für kleine Leistungen verwendet. Zwillings- und Drillingsanordnungen mit Frischdampfzuführung zu allen Zylindern zeigen die Teilbilder 2 und 3. Die Teilbilder 4 (Ansichtsbild 405) und 5 stellen Zweifach- und Dreifach-Expansionsmaschinen mit nebeneinanderliegenden Zylindern dar, also mit zwei und drei Kurbeln auf der Hauptwelle.

Teilbild 6, Bild 406 und Tafel XIV veranschaulichen die Reihen- oder Tandem-Maschine, die nur eine Kurbel besitzt. Der Niederdruckzylinder liegt vor dem Hochdruckzylinder, weil man diesen besonders heißen Maschinenteil möglichst von der Gleitbahn des Kreuzkopfs fernhalten will, damit diese sich nicht verzieht. Diese Reihen- oder Tandem-Anordnung wird für Betriebsmaschinen, die gewöhnlich den ganzen Tag über laufen, also nur einmal des Morgens angelassen zu werden brauchen, angewendet, wenn nur geringer Platz für die Aufstellung zur Verfügung ist. Die Reihenmaschine ist auch billiger, weil das Gestänge nur einmal ausgeführt zu werden braucht. Um die Baulänge möglichst gering zu halten, werden die beiden Zylinder oft dicht nebeneinander gerückt. Es ist bei solchen kurz gebauten Reihenmaschinen Vorsorge zu treffen, daß bei Ausbesserungsarbeiten die einander zugekehrten Deckel und die Kolben trotzdem bequem ausgebaut werden können.

Teilbild 7 und Ansichtsbild 407 zeigen eine doppelte Verbundmaschine mit Tandem-Anordnung der Zylinder auf jeder Seite. Sie vereinigt die Vorteile einer Zwillings- mit denen einer Verbundmaschine und wird für große Leistungen, zum Beispiel zum Fördern aus Bergwerken und zum Antrieb mächtiger Walzen gebaut. Sehr häufig ist bei Groß-Dampfmaschinen die Anordnung nach Teilbild 8 und Ansichtsbild 408, wobei Hoch- und Niederdruckzylinder auf die eine, der Mitteldruckzylinder auf die andere Kurbel arbeiten.

Wenn eine Maschine ganz besonders hohe Leistung abgeben muß, kommt man zu einem so großen Durchmesser des Niederdruckzylinders, daß er nur noch mit erheblichen Schwierigkeiten gegossen werden kann und schwer auf dem Fundament unterzubringen ist, wenn die Kurbelwelle nicht zu hoch gelegt werden soll. Der Niederdruckzylinder wird

alsdann geteilt und die Dampfführung nach Teilbild 9 (Ansichtsbild 409) eingerichtet. Der Dampf strömt also gleichzeitig den beiden Teil-Niederdruckzylindern zu. Hieraus ist zu ersehen, daß die Zahl der Zylinder nicht immer einen sicheren Schluß auf die Zahl der Dehnungsstufen zuläßt.

Alle Maschinen mit mehreren Kurbeln, die gegeneinander versetzt sind, haben eine größere Gleichförmigkeit des Gangs als Einzylindermaschinen. Das Schwungrad kann daher bei ihnen leicht sein, bei Anordnungen nach den Teilbildern 3 und 5 sogar ganz wegfallen, wie bei der auf Bild 410 dargestellten großen Umkehr-Walzenzugmaschine. Die Gründe sind bereits auf Seite 226 angeführt.

Im Großdampfmaschinenbau war die stehende Anordnung eine Zeitlang ebenso beliebt wie die liegende, ja es sah sogar so aus, als ob die hochgetürmte stehende Maschine (Bild 411) den Sieg davontragen sollte. Die Häuser der großen Kraftwerke zur Stromerzeugung, die damals ausschließlich inmitten der Städte errichtet wurden, konnten bei ihrer Anwendung kleiner sein, da sie ja weniger Bodenfläche beanspruchen als die liegende Bauart. Außerdem war die stehende Maschine, die Hammermaschine (Band III, Seite 168), auf den Schiffen in ausgezeichneter Weise für hohe Leistungen entwickelt worden. Während man auf dem Land dann doch wieder zur liegenden Maschine zurückkehrte, weil sie leichter grundfest zu bauen und bequemer zu bedienen ist, hat die Hammerbauart auf Schiffen überall dort, wo noch Kolbenmaschinen arbeiten, sich behauptet.

Das Bild 249 auf Seite 172 im Band III, die Hälfte der Maschinenanlage des Lloyd-Schnelldampfers „Kaiser Wilhelm II." darstellend, zeigt, wie in jenem Abschnitt bereits gesagt wurde, die mächtigste jemals gebaute Schiffs-Kolbenmaschine, die wahrscheinlich auch für immer die größte ihrer Art bleiben wird. Die Halbanlage besteht aus zwei hintereinander gesetzten Vierfach-Expansionsmaschinen. Jede von ihnen leistet rund 11 000 Pferdestärken. Die stärkste bisher gebaute ortfeste Kolben-Dampfmaschine bringt 25 000 Pferdestärken hervor.

Die Bilder 412 und Tafel XV lassen das Aussehen der Maschinensäle in zwei großen Kraftwerken miteinander vergleichen, von denen das eine mit stehenden, das andere mit liegenden Kolbenmaschinen ausgerüstet ist. Beide Einrichtungen sind heute durchaus veraltet, da zum Antreiben von Groß-Dynamos jetzt nur noch Turbinen verwendet werden.

*

Wir wollen nun noch ganz kurz die Hauptbauteile der Kolben-Dampfmaschine im einzelnen betrachten.

Die Gesamtanordnung wird durch den Maschinenrahmen zusammengehalten. Dieser, ein oft sehr großes, vielgestaltiges Gußstück, hat vor allem die Aufgabe, die innerhalb der Maschine selbst auftretenden Gegenkräfte aufzunehmen und die Festlegung des Ganzen auf dem Fundament zu ermöglichen. Der Grundbau wird in Klotzform aus Mauersteinen oder Stampfbeton hergestellt und erhält ein beträchtliches Gewicht, da er die Erschütterungen, welche durch die hin und her gehenden Massen entstehen, möglichst vollständig abbremsen soll und Massenwirkungen nur durch Massen unschädlich gemacht werden können.

Soweit es möglich ist, wird das Fundament baulich getrennt vom Maschinenhaus aufgeführt, damit die niemals ganz zu vermeidenden Erschütterungen nicht ohne weiteres in das Gebäude übergehen können. In dem Fußboden des Maschinenhauses sieht man stets Schnittlinien um die Maschine, die zusammen ein Rechteck bilden. Es sind die Trennungsfugen zwischen dem Fundamentklotz und den Bauteilen, die zum Haus selbst gehören.

Das Anschließen der Maschine an den Unterbau erfolgt meist mittels Anker, welche die ganze Dicke des Fundaments durchdringen. Drunten wird eine gußeiserne Platte angebracht, gegen die der Anker mittels einer aufgeschraubten Mutter oder eines eingeschlagenen Keils drückt (Bild 413). Die Platte verteilt den Ankerzug auf einen größeren Teil des Fundaments.

436. Moderne Heißdampf-Verbundlokomobile beim Dreschen
R. Wolf A.-G., Magdeburg-Buckau

Bei kleineren Maschinen werden nicht glatte Anker durchgeführt, man begnügt sich hier damit, Halter von der in Bild 415 dargestellten Form, sogenannte Steinschrauben, zu verwenden. Es sind vierseitige, schmiedeeiserne Pyramiden, an denen durch Einhauen Widerhaken gebildet worden sind. Sie haften unerschütterlich in dem eingestemmten Loch, das mit Zement ausgegossen wird.

Der also festgehaltene Rahmen hat den kräftigsten Querschnitt in dem wagerechten Pfosten, der den Zylinder mit dem Hauptlager der Kurbelwelle verbindet. Hier tritt, wie schon einmal erwähnt wurde, die stärkste Kraftwirkung auf. Wenn der Kolben auf die Welle zu getrieben wird, drückt der Dampf auf den äußeren Zylinderdeckel mit ungefähr derselben Kraft, mit der die Schubstange über die Kurbel hinweg die Hauptwelle aus dem Lager wegzudrängen sucht. Es dürfen hierbei nicht die geringsten Verschiebungen zwischen Zylinder und Hauptlager stattfinden, wenn der Kolben nicht alsbald schief laufen und das Getriebe zerstört werden soll.

Bei Maschinen mit Stirnkurbel, die am Ende der Welle sitzt, erhält der Rahmen Bajonettform (Bild 414 a u. b), so genannt, weil die runde Öffnung der Gleitbahn in ähnlicher Weise seitlich angebracht ist wie der Bajonettanschluß am Gewehrlauf, damit die Kugel aus diesem frei hinausdringen kann. Ist die Kurbel durch eine Kröpfung der Welle gebildet, dann wird ein Gabelrahmen (Bild 418 a u. b) angewendet, bei dem die Grundplatte gespalten ist, um die zwei Teile des Hauptlagers diesseits und jenseits der Wellenkröpfung zu tragen.

Das Lager am anderen Ende der Kurbelwelle wird stets gesondert auf das Fundament gesetzt (Bild 406). Hierdurch ist eigentlich der Grundsatz durchbrochen, nach dem alle Kraftwirkungen an der Maschine durch den Rahmen hindurchgehen sollen. Indessen ist das äußere Lager längst nicht so stark belastet wie das oder die Hauptlager, denn die Arbeit der Schubstange ist hier weit weniger merkbar.

Die Gestelle von Zweikurbelmaschinen sind Verdoppelungen des einfachen Rahmens (Bild 416). Für Vielkurbelmaschinen wird eine der Zylinderanordnung entsprechende Ausgestaltung angewendet. Die Bauarten von Rahmen für stehende Maschinen zeigen große Verschiedenheiten. Sie bestehen aber alle aus der Grundplatte, auf der die Kurbellager sitzen, und den Ständern, welche die Zylinder tragen und diese mit der Grundplatte verbinden (Bild 417).

Damit die Achse des Zylinders und der Mittelpunkt des Kreuzkopfs stets genau in einer geraden Linie liegen, werden für alle Maschinen die Gleitbahn und der Flansch am Ende des Rahmens, an den der Zylinder angeschraubt wird, stets gleichzeitig auf derselben Werkbank ausgedreht.

Die Zylinder für die ersten liegenden Maschinen wurden in zwei Teilen hergestellt. Der eigentliche Zylinder und der seitlich mit den Dampfzuführungskanälen (Bild 419) angebrachte Schieberkasten bildeten je einen Gußkörper, die nachträglich durch Verschrauben vereinigt wurden. Hierdurch erhielten die Kanäle eine erhebliche Länge, der schädliche Raum wurde sehr groß. Der heutigen, hoch ausgebildeten Gießtechnik gelingt es, den Zylinder mit allen Nebenteilen in einem einzigen Stück herzustellen. Die Einformung ist sehr schwierig, und nicht jeder Guß gelingt. Dafür erhält man aber schließlich ein völlig dichtes Dampfgefäß, das Fugen nur dort hat, wo die Deckel auf Zylinder und Schieberkasten gesetzt sind (Bild 420).

Der Kolben soll stets möglichst geringes Gewicht haben, damit er die Kolbenstange nicht allzusehr belastet. Bei den starken Dampfdrücken, denen der Kolben ausgesetzt ist, können einfache ebene Gebilde mit Aussparungen von der Art, wie Bild 421 sie zeigt, nur bei kleinen Maschinen verwendet werden. Bei größeren bildet man stets doppelwandige Hohlgußkörper aus. Die Bilder 422 und 423 zeigen die Formen, die bei stehenden und liegenden Maschinen meist angewendet werden. Die Befestigung an der Kolbenstange erfolgt durch eine Mutter, die in ein Gewinde auf der Stange faßt und aufs sorgfältigste gegen unbeabsichtigtes Lösen gesichert ist. Auf der Gegenseite legt sich der Kolben gegen ein kegelförmiges Stück der Stange, das entweder bis zum Gewinde durchläuft oder mit geringer Höhe in einen zylindrischen Teil von kleinerem Durchmesser übergeht. In die Gleitfläche des Kolbens werden schmale Rinnen zur Aufnahme der Schmierflüssigkeit eingedreht.

Größte Wichtigkeit hat die Abdichtung des Kolbens gegen die Zylinderwand. Sie muß den Übertritt des Dampfs von einem Zylinderteil in den anderen verhindern. Im Anfang begnügte man sich damit, Hanfstricke, die mit Talg getränkt waren, um den Kolben zu legen. Bei höheren Drücken und bei Anwendung von Heißdampf ist eine solche weiche Dichtung nicht mehr brauchbar. Sie nutzt sich auch zu rasch ab, so daß der Kolben häufig zur Auflegung einer neuen Packung herausgenommen werden muß. Heute sind gußeiserne Ringe, die in eingedrehten Nuten um den Kolben liegen, als Dichtungsmittel in Gebrauch.

Diese Ringe werden stets mit etwas größerem Durchmesser hergestellt, als sie im Betrieb haben sollen, und in einfachsten Fällen schräg durchschnitten (Bild 424). Sie federn etwas durch, so daß sie mit geschlossener Fuge eingesetzt werden können, wobei ihr Durchmesser verringert ist. Freigelassen legen sie sich alsdann mit ihren sorgfältig geschliffenen Oberflächen gegen die Zylinderwand. Es werden zwei oder drei solcher Ringe eingesetzt. Damit der Dampf es möglichst schwer hat, die Fugen als Durchgang zu benutzen, legt man diese nicht in gerader Linie hintereinander, sondern bringt sie an verschiedene Stellen des Umfangs, so daß ihre Verbindungslinie zickzackförmig verläuft.

Diese Anordnung erschwert dem Dampf den Überweg, doch reicht die Hemmung bei stark gespanntem Frischdampf nicht aus. Alsdann wird der verblattete Stoß angewendet. Es entstehen jetzt, wie die Bilder 425 links und 426 zeigen, an jedem Ring zwei Querfugen, die durch eine Längsfuge voneinander getrennt sind. In dieser Längsfuge liegen die geglätteten Ringenden ganz eng aneinander, so daß Dampf fast gar nicht mehr hindurchtreten kann.

Eine gründlichere Dichtung noch als mit selbstspannenden Kolbenringen erhält man durch solche, deren Anlage gegen die Zylinderwand mittels Zusatzfedern verstärkt wird. Die Eindrehungen in den Kolben werden hierfür vertieft und auf die Boden stählerne, schraubenförmige Federn in radialer Richtung gesetzt. Diese pressen die Ringe überall sehr kräftig nach außen. Immerhin kann es vorkommen, daß die Wirkung der Federn auf die Ringteile, welche der Fuge näher liegen, stärker ist als auf dem gegenüberliegenden Abschnitt. Diese Ungleichmäßigkeit fällt sicher bei mehrfach geteilten Ringen weg. Bild 425 rechts zeigt einen Kolben mit vierteiligen Dichtungsringen. Die Ringenden sind durch bolzenartige Stücke miteinander verbunden, die ebenfalls durch Federn nach außen gepreßt werden. Dampfdurchtritt durch die Fugen wird hiermit völlig verhindert.

Das Gewicht des Kolbens, das bei größeren Maschinen trotz aller Höhlungen in seinem Körper nicht gering ist, muß von der Kolbenstange getragen werden. Bei stehenden

Maschinen geschieht das in vollkommenster Weise, da der Kolben hier auf der senkrechten Stange vollständig und bequem aufruht. Schwierigkeiten erwachsen immerhin bei liegender Anordnung, und wir erinnern uns, daß die Furcht vor dem Auflasten des Kolbens auf der unteren Hälfte der Zylinderwand ein Schrecknis war, durch das die Einführung der vorteilhaften liegenden Bauart aufgehalten wurde (Seite 205). Es hat sich aber gezeigt, daß die leichten Kolben kleiner Maschinen ohne weiteres auflaufen können. Bei größeren Maschinen würden solche Schleppkolben freilich einen allzu raschen Verschleiß der Dichtungsringe oder der Zylinderwandung in ihrem unteren Teil oder beider hervorrufen. Bei ihnen ist dafür zu sorgen, daß der Kolben schwebt, also wirklich, selbst bei Mittellage im Zylinder, von der Kolbenstange getragen wird.

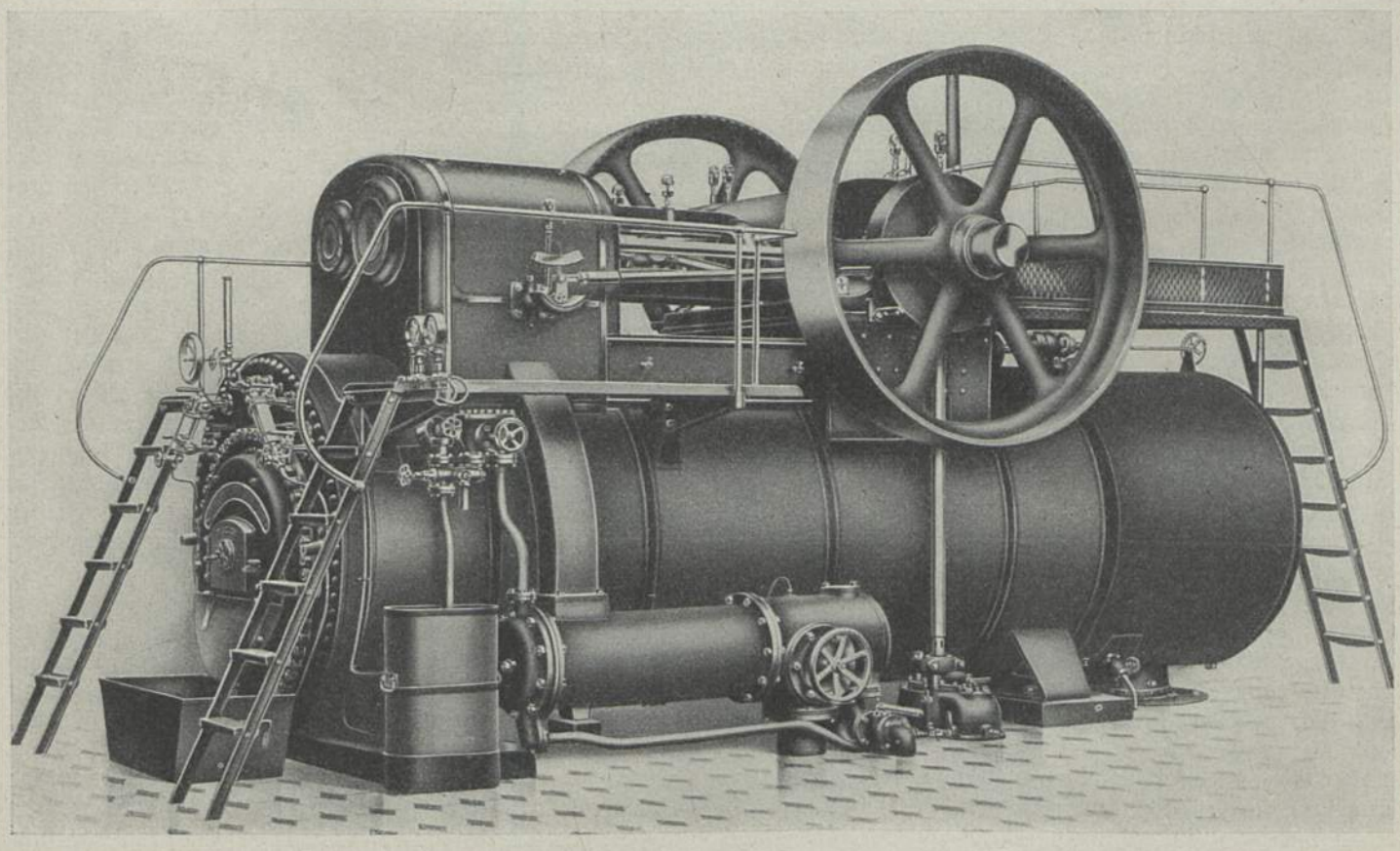
Das ist nicht möglich, wenn diese nur einseitig, nur im Kreuzkopf gelagert, also bloß durch Einen Zylinderdeckel mit einer Stopfbüchse hindurchgeführt ist. Damit ein Schwebekolben entsteht, wird die Kolbenstange daher verlängert, auch durch den zweiten Zylinderdeckel hindurchgeführt und jenseits dieses von einem zweiten Kreuzkopf auf besonderer Gleitbahn geführt.

Es ist aber auch bei einer solchen Bauart nicht zu vermeiden, daß die genau gerade hergestellte Kolbenstange unter dem Gewicht des Kolbens etwas durchfedert, so daß dieser dann doch wieder auf der Zylinderwand aufläuft. Vollkommenes Schweben entsteht erst bei der Durchbildung der Kolbenstange nach einem von Collmann angegebenen Gedanken.

Die Stange soll genau gerade sein, wenn das Kolbengewicht auf ihr ruht. Man gibt dem fertiggeschmiedeten Stahlstück daher eine leichte Krümmung und spannt es alsdann für die Bearbeitung mit der Krümmung nach oben auf einer Spezialdrehbank so ein, daß die beiden Enden genau in gleicher Höhe liegen. Hierauf wird die Stange an der Stelle, an der künftig der Kolben sitzen wird, mit einem Gewicht belastet, das der Kolbenschwere entspricht. Unter dem Einfluß dieser Belastung biegt sich die Kolbenstange gerade und wird jetzt, während sie selbst in der ursprünglichen Lage stillsteht, durch umlaufende Stichel abgedreht. Im Zylinder hat man alsdann nach Aufsetzen des Kolbens eine vollkommen gerade Stange, die nur von den beiden Stützpunkten vorn und hinten getragen wird, während der Kolben frei schwebt (Bild 427). Aber auch hiervon ist man wegen der umständlichen Herstellung abgekommen. Heutzutage hat man meistens ein Mittelding zwischen Trage- und Schwebekolben. Man führt die Kolbenstange durch, läßt zwar den Kolben aufruhen, überhöht aber etwas die vordere und hintere Gleitbahn gegenüber dem Zylinder, wodurch der Kolben entlastet wird.

Überall dort, wo bewegte Stangen von außen her in dampferfüllte Räume dringen, muß eine besondere Abdichtung stattfinden, damit der Dampf nicht hinausgelangen kann. Die wichtigsten Stopfbüchsen an der Maschine befinden sich dort, wo die Kolbenstange durch die Zylinderdeckel dringt, die Schieberstangen durch die Wand des Schieberkastens hindurchgehen. Die Dichtung wird allermeist durch das Anpressen geeigneter Stoffe gegen die sorgfältig geschliffenen Stangen bewirkt.

Für Naßdampf von geringem Druck genügt die Weichpackung. Sie wird aus Hanf- oder Baumwollstricken gebildet, die mit Talg getränkt sind. Für etwas höhere



437. Heißdampf-Verbundlokomobile mit Ventilsteuerung, System Lentz, und Kondensation
Heinrich Lanz, Mannheim

Temperaturen nimmt man Schnüre aus dem unverbrennlichen Asbest.

Die Packung kommt, wie Bild 428 zeigt, in einen ringförmigen Hohlraum, der auf der einen Seite durch einen Vorsprung der durchbrochenen Wand, auf der anderen durch die Stange begrenzt ist. Eine Brille von der noch gesondert in Draufsicht dargestellten Form wird darauf gesetzt; sie kann mittels zweier Schrauben eingedrückt werden. Hierbei übt sie eine Pressung aus, deren Richtung parallel der Stangenachse läuft. Die Packung aber übersetzt diese Druckkraft zum Teil in eine radial gerichtete, so daß der getränkte Stoff sich ganz fest um die Stange legt. Die unvermeidliche Abnutzung durch die Stangenreibung wird dadurch ausgeglichen, daß der Wärter die Brille von Zeit zu Zeit nachzieht. In längeren Abständen muß eine Erneuerung der Packung stattfinden.

Wir wissen bereits, daß bei Heißdampfmaschinen nur Stopfbüchsen mit Metallfüllung verwendet werden können, da alle Faserstoffe verbrennen würden. Die Dichtung wird jetzt in ähnlicher Art ausgeführt, wie wir sie am Kolben kennengelernt haben. Ringe aus Gußeisen, Bronze oder Weißmetall, einer Legierung von Kupfer und Zinn, bei der die Zinnmenge überwiegt, umschließen die Stange fest. Die Ringe sind aufgeschnitten und innen geschliffen. Sie werden von außen her mittels Federn oder durch andere Druckmittel angepreßt. Es gibt ungeheuer viele Bauarten für Metall-Stopfbüchsen. Als Beispiel sei zunächst die weit verbreitete Howaldt-Abdichtung (Bild 429) besprochen.

Vier aufgeschnittene Ringe aus Weißmetall oder Bronze, deren Fugen gegeneinander versetzt sind, umgeben die Stange und bilden die eigentliche Laufdichtung. Die nach innen gerichteten Seitenflächen der Ringe sind kegelförmig gebildet, und in den so entstehenden freien Räumen lagern Ringe aus anderem Metall, deren äußere Seitenflächen gleichfalls kegelförmig sind. Diese äußeren Ringe berühren die Stange nicht. Zwischen den Fuß der Brille und den äußersten Ring ist Weichpackung eingelegt; sie gleicht die Formänderungen der Ringe aus, die durch die Erwärmung entstehen. Wird die Brille angezogen, so verwandeln die Kegelflächen die entstehende axiale Pressung wiederum in radiale, so daß die inneren Ringe an die Stange gedrückt werden.

Für Stangen mit kurzem Hub, wie zum Beispiel Ventilspindeln, hat sich seit langem die Labyrinth-Dichtung (Bild 430) ausgezeichnet bewährt. Die Stange ist hier sehr genau in die zylindrische Öffnung der Büchse eingeschliffen, und es werden entweder in sie oder in die Büchse parallele Ringe eingedreht. Diese füllen sich mit Dampf von verringertem Druck oder mit Kondenswasser, die eine fast vollständige Abdichtung bewirken.

Lentz, dem der moderne Dampfmaschinenbau eine große Zahl ausgezeichneter Neukonstruktionen verdankt, hat die Labyrinth-Dichtung für die Kolbenstange ausgestaltet. Bei der von ihm angegebenen Stopfbüchse (Bild 431) schleift die Stange aber nicht an den Büchswänden, sondern hat geringeren Durchmesser als die Bohrung. Das Labyrinth, das hier wie bei den Ventilstangen-Dichtungen seinen Namen eigentlich nicht recht verdient, weil kein zusammenhängender Weg vorhanden ist, entsteht durch gußeiserne Ringe, die über die Stange geschoben sind und in entsprechenden Aussparungen der Büchse liegen. Lentz verzichtet auf jede Anpressung, er läßt die Ringe unaufgeschnitten, schleift ihre Bohrung nur sehr genau auf die Stange auf. Dem Dampf wird der Weg ins Freie um die Ringe herum wieder fast vollständig durch Druckminderung und Kondensation in den einzelnen Zwischenräumen verlegt.

Geringe Dampfmengen dringen immer durch die Lentz-Stopfbüchse. Der Verlust, der hierdurch entsteht, ist jedoch ganz unwesentlich. Um den Abdampf und das tropfende Wasser unmerkbar zu machen, wird eine Bohrung im unteren Teil der Büchse mit dem Kondensator verbunden.

Abnutzung und Reibung sind bei der Lentz-Dichtung fast gleich Null. In gleicher Weise bewährt sich die Bauart von Proell mit geteilten, durch Federdruck ganz sanft an die Kolbenstange gepreßten Ringen (Bild 432).

Überall dort, wo beim Betrieb der Dampfmaschine Teile aufeinander gleiten, muß eine ausgiebige Schmierung stattfinden. Das Öl soll die Gleitflächen in dünner Schicht vollständig umgeben, so daß sie nicht in unmittelbare Berührung miteinander kommen. Wo dies infolge unsorgfältiger Wartung dennoch geschieht, tritt alsbald Warmlaufen ein, die Teile „fressen" aufeinander und werden zerstört. Der Druck sucht die Schmierflüssigkeit auszupressen. Das kann um so weniger leicht geschehen, je dickflüssiger das Öl ist. Dickflüssigkeit steigert aber die Reibung, so daß die richtige Auswahl des Öls, die für mechanischen Wirkungsgrad der Maschine sehr wichtig ist, nicht immer ganz leicht getroffen werden kann.

Die Mineralöle, die für die schwer belasteten Hauptlager und alle unter Dampf stehenden Teile des Triebwerks heute fast ausschließlich verwendet werden, gewinnt man meist durch Destillation von Rohpetroleum oder Braunkohlen-Teeröl. Ihr Entflammungspunkt liegt sehr hoch, so daß sie auch bei Berührung mit Heißdampf nicht verkohlen. Sie verharzen auch schwerer als tierische und pflanzliche Öle und scheiden weniger Fettsäure aus, welche die Metallteile angreift.

Allen unter Druck stehenden Teilen wird die Schmierflüssigkeit durch eine kleine Pumpe zugeführt, von der zahlreiche Röhrchen abgehen. Jede dieser Leitungen kann so eingestellt werden, daß der von ihr versorgte Teil stets gerade so viel Öl erhält, wie er braucht. Das ist wichtig, weil ebenso wie zu geringe Versorgung auch Überschmierung schädlich ist.

Die Hauptwelle, der am stärksten beanspruchte Teil der Maschine, wird aus bestem Stahl sorgfältig geschmiedet. Die Befestigung von Stirnkurbeln (Bild 433) an den Enden erfolgt durch Aufschrumpfen oder Aufpressen. Beide Male wird die Bohrung der Kurbel etwas kleiner gehalten als der Wellenzapfen. Wenn sie erwärmt ist, läßt die Kurbel sich leicht überschieben und schrumpft beim Erkalten unverrückbar fest auf (Siehe auch Band II, Seite 213: Aufschrumpfen von Eisenbahnradreifen). In kaltem Zustand kann die Verbindung durch den starken Druck hydraulischer Pressen hergestellt werden. Der Bolzen, der fast immer noch in die Trennfuge zwischen Welle und Kurbel gesetzt wird, ist als weitere Sicherung eigentlich unnötig.

Wellen, deren Kurbeln durch Kröpfung hergestellt werden, sind nur bei kleinen Maschinen aus Einem Stück gefertigt. Sie werden dann in der richtigen Form vorgeschmiedet und hierauf abgedreht. Bei größeren Wellen ist dieses Verfahren zu kostspielig, da zu viel des teuren Baustoffs abfallen und die Dreharbeit zu lange dauern würde. Solche Wellen werden daher gebaut, das heißt jeder Lagerzapfen, jeder Arm und jeder Kurbelzapfen ist ein Stück für sich. Die Vereinigung erfolgt wieder durch Aufschrumpfen oder Aufpressen (Bild 434).

Die Betriebsdampfmaschinen werden heute nicht mehr wie einst in dunklen, feuchten Winkeln aufgestellt, sondern finden ihre Stätte in großen, hellen, gut gelüfteten Räumen. Der Architekt bemüht sich, das Aussehen der Säle der Bedeutung ihres Inhalts anzupassen. Der Kraftraum ist stets die „Gute Stube" der Fabrik. Die Maschinen, durch welche alle anderen in Betrieb gesetzt werden, sind hierdurch als besondere Kostbarkeiten gekennzeichnet, und der Wärter erhält einen höheren Begriff von der Wichtigkeit seiner Arbeit. Er fühlt sich veranlaßt, das Aussehen und den Gang seiner Maschine der gepflegten Umgebung anzupassen, und so treten Architektur und Maschinentechnik in eine willkommene Wechselwirkung.

Die Zeiten sind vorüber, in denen man glaubte, die Maschinenanlage durch aufgesetzte Zierate „verschönern" zu müssen. Die ästhetische Wirkungskraft eines gut durchgearbeiteten technischen Geräts ist längst erkannt. Das Auge wird durch die glatten, nur dem Arbeitszweck dienenden Formen weit mehr erfreut als durch zugefügte dorische Säulen, gotischen oder jonischen Aufputz.

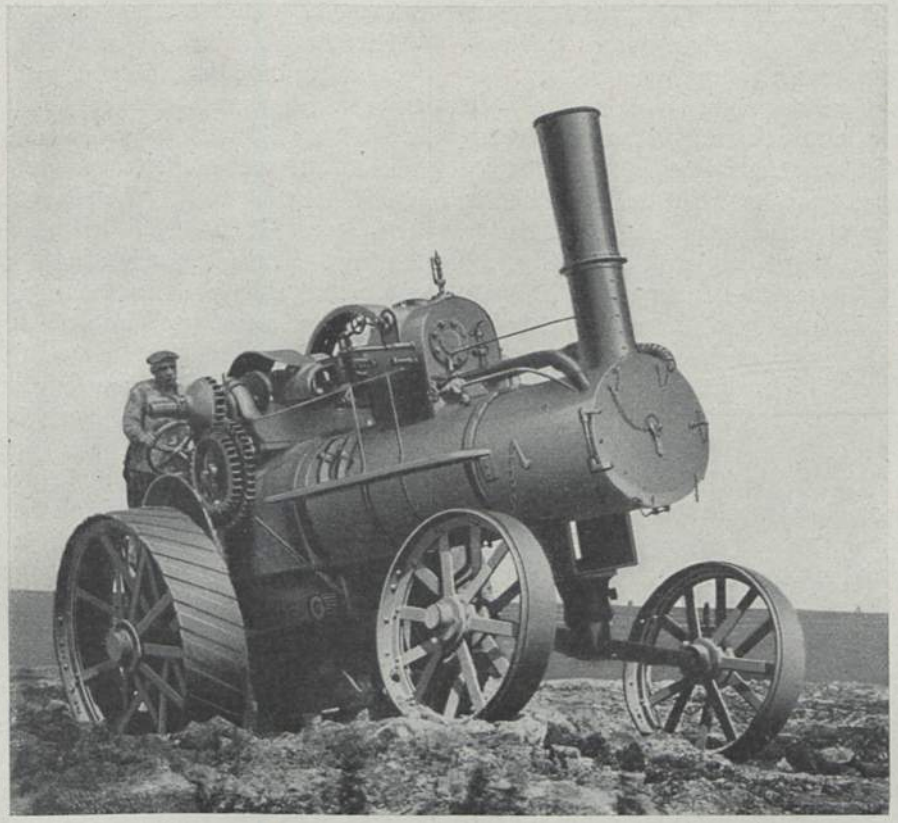
„Eine Stillehre," so sagt Riedler in seinem Buch „Das Maschinenzeichnen", „die dem Maschinenbau Formen der Architektur aufdrängen will, ist im Maschinenbau zweck- und sinnlos. Maßgebend sind die zwingenden Formen des Zwecks oder der Ausführung. Zierat und Aufputz jeglicher Art sind verfehlt. Selbst der architektonische Schmuck an Bauwerken sinkt zu bloßer Dekoration hinab, wenn er nicht einheitlich aus dem Bauwerk selbst hervorgeht, wie dies an dem trostlosen toten dekorativen Aufputz moderner Städte zu ersehen ist.

„Aufputz an Maschinen ist völlig sinnlos, da hier alle Voraussetzungen der Ausschmückung von Bauwerken fehlen. Die Maschine ist an sich schon durch ihre Gestalt, durch ihre Bewegung so wechselvoll, daß der Beschauer, der sich an der Form einer Maschine erfreuen will, vor allem Ruhe in der Umgebung sucht; für Abwechslung und Bewegung sorgt schon die Maschine selbst.

„Aufgabe richtiger Formgebung im Maschinenbau, wenn man dieses Streben überhaupt Maschinenbaustil nennen will, ist ausschließlich: die Zweckform rein zur Geltung zu bringen, überall die einfachste Form zu suchen oder, wo es der Maschinenzweck erlaubt, unvorteilhafte Formen durch Verkleidung zu verdecken, die indes den Sinn haben muß, die Hauptteile der Zweckform besonders hervorzuheben, nicht aber die Grundform zu ändern.

„Die Zwecklosigkeit von Zierat an Maschinen ergibt sich auch durch den Betrieb. Die gangbare Maschine muß in Öl schwimmen, das ist ihr Lebenselement; sie muß aber aus praktischen Gründen, um ihre Lebensdauer zu vergrößern, peinlich rein gehalten werden. Das ist nur möglich, wenn sie äußerlich die einfachsten Formen besitzt, und wenn umständliche Formen mit unvermeidlichen Schmutzwinkeln absichtlich verkleidet sind. . . .

„Daher: größte Einfachheit der Formgebung, glatte Begrenzungsflächen, ohne jegliche Verzierungen, insbesondere ohne architektonischen Aufputz, und, wo einfaches, ruhiges Aussehen durch die Konstruktion selbst nicht genügend erreichbar ist, absichtliche glatte Verkleidungen! Zulässig ist nur der Konstruktionsstil, der aus den praktischen Betriebs-, Festigkeits- und Herstellungsrücksichten, also aus den Bedingungen der Wirklichkeit hervorgeht." —



438. Moderne Heißdampf-Straßenlokomotive bei der Fahrt über unebenen Boden
R. Wolf A.-G., Magdeburg-Buckau

Die wichtigsten der ortbeweglichen Dampfmaschinen, Lokomotiven und Schiffsmaschinen, sind bereits in den Abschnitten 12 und 17 besprochen worden. Aus den Bedürfnissen der Landwirtschaft ist eine Sondergattung entstanden, die im Gegensatz zu den eben erwähnten nicht die Aufgabe hat, sich selbst fortzubewegen. Die Lokomobile wird von äußeren Kräften, meist durch Pferde, von Stätte zu Stätte geschafft, um dort Arbeit zu leisten. Die Worte Lokomotive und Lokomobile bedeuten genau genommen dasselbe. Wir belegen ganz willkürlich mit der ersten Bezeichnung Maschinen, die auf Schienen laufen und ihre Räder selbst antreiben, mit der anderen Vorrichtungen, deren Kraft nur auf eine Treibscheibe wirkt.

Die Landwirtschaft braucht für die Dreschmaschinen, für Strohpressen und ähnliche Geräte einen Antreiber, der erhebliche Leistungsfähigkeit mit geringem Gewicht verbindet, damit er auch über Ackerflächen fahren kann, dessen Aufbau einfach und sehr widerstandsfähig ist, damit die Maschine Staub, Wind und Regen standhält. Trevithick baute bereits im Jahre 1812 eine Maschine, die auf ein Radgestell gesetzt war und die Arbeit von vier Pferden ersetzen sollte. Die heutige Grundform der Lokomobile ist jedoch erst in der Mitte des vorigen Jahrhunderts herausgebildet worden. Kennzeichen ist insbesondere der Zusammenbau von Kessel und Maschine, und zwar derart, daß die Maschine auf dem Rücken des Kessels liegt.

Die ersten neuzeitlichen Konstruktionen entstanden in England. Deutsche Arbeit aber stand während der letzten Jahrzehnte in diesem Bezirk an der Spitze, insbesondere durch die vollendeten Schöpfungen der Fabriken R. Wolf in Magdeburg-Buckau und Heinrich Lanz in Mannheim. Wolf baute 1862 seine erste Lokomobile, die heute im Deutschen Museum zu München steht (Bild 435). Alle Errungenschaften der Dampfmaschinentechnik werden jetzt auch bei dieser Maschinengattung verwendet. Die Heißdampf-Verbundlokomobile hilft heute auf jedem größeren Gut bei der Einbringung der Ernte (Bild 436). Sehr oft erscheint eine solche Maschine auch an anderen Stellen als Retter in der Not. Wenn eine ersoffene Baugrube ausgepumpt werden, die wichtigsten Teile eines Betriebs, der von einem Unfall betroffen wurde, geschwind wieder in Tätigkeit gesetzt werden sollen, wenn plötzlich das Bedürfnis auftritt, Strom zur Beleuchtung einer provisorischen Anlage zu erzeugen, dann wird rasch eine Lokomobile herbeigeschafft, die ohne jede Vorbereitung sogleich Kraft liefert.

Das eigenartige Zwillingspaar, der Kessel und die Maschine auf seinem Rücken, hat sich aber noch einen anderen Wirkungskreis erobert. Keine sonstige Anordnung ermöglicht es, erhebliche Arbeitsmengen auf so engem Raum zu erzeugen. Deshalb werden Lokomobilen auch sehr oft zum Antrieb in kleineren Fabriken wie Sägemühlen, Holzbearbeitungswerkstätten, Ziegeleien und als Kraftlieferer für Elektrizitätswerke mit geringen Leistungen verwendet. Die Ortbeweglichkeit fällt hier weg, es entsteht die Seltsamkeit der ortfesten Lokomobile. Die Kuriosität liegt aber nur auf sprachlichem Gebiet. Der Techniker ist längst damit vertraut, daß gerade die stärksten Lokomobilen unverrückbar in Häusern untergebracht sind.

Anlagen dieser Art haben nicht allein den Vorzug geringer Raumbeanspruchung. Die Einfachheit ihrer Durchbildung tritt bei jeder Ausführungsform hervor. Sie können sehr geschwind aufgestellt werden, da das Einsenken eines besonderen Fundaments wegfällt, der Kessel, der ähnlich gebaut ist wie bei den Lokomotiven, nicht eingemauert zu werden braucht, und die Errichtung massiver Schornsteine unnötig ist. Außerdem haben die Lokomobilen den besten thermischen Wirkungsgrad von allen Kolben-Dampfmaschinen. Ursachen sind die enge Nachbarschaft von Maschine und Kessel, wodurch die langen Rohrleitungen mit ihren Kondensverlusten wegfallen, und das vorzügliche Zusammenpassen aller Teile, die vollständig aus Einer Hand hervorgehen. Die Maschine ist trotzdem ein völlig in sich geschlossener Teil, der vom Wärter leicht erreicht und für Ausbesserungsarbeiten allein abgehoben werden kann.

Die Industrie-Lokomobilen (Bild 437) werden im Gegensatz zu den fahrbaren mit Kondensation betrieben. Lanz zeigte bereits auf der Weltausstellung zu Paris im Jahre 1900 eine solche Lokomobile, die 300 Pferdestärken leistete. Sie war damals die größte der Welt. Auf der Weltausstellung zu Brüssel im Jahre 1910 befand sich eine tausendpferdige Lokomobile der gleichen Fabrik, die zehntausendste, die in Mannheim gebaut worden war.

Die Kessel, über die noch im nächsten Abschnitt gesprochen werden soll, können mit jeglichem Heizstoff betrieben werden, auch mit Holzabfällen, Sägespänen, Borke, so daß der Betrieb selbst in entlegenen Gegenden leicht möglich ist, wohin Kohle nur mit erheblichen Kosten geschafft werden kann. Ein Nachteil ist es freilich, daß Kessel und Maschine sich im gleichen Raum befinden, so daß beim Schaufeln des Heizstoffs viel Staub zu den Lagern und andern empfindlichen Teilen gelangt. Durch vorsichtiges Feuern kann jedoch jede hierdurch entstehende Schädigung der Maschine leicht verhindert werden.

Zu den Lokomobilen der fahrbaren Gattung sind auch die gewaltigen Antriebmaschinen für Dampfpflüge zu rechnen. Sie wurden zuerst von John Fowler in Leeds durchgebildet. Der deutsche Ingenieur Max Eyth hat im Auftrag dieses englischen Großindustriellen sehr wichtige Pionierarbeit für die Einführung des Dampfpflugs geleistet. Er machte hierfür Reisen durch vier Erdteile und hat seine Erlebnisse hierbei in höchst anziehender, humorvoller Weise in seinem „Wanderbuch eines Ingenieurs" geschildert.

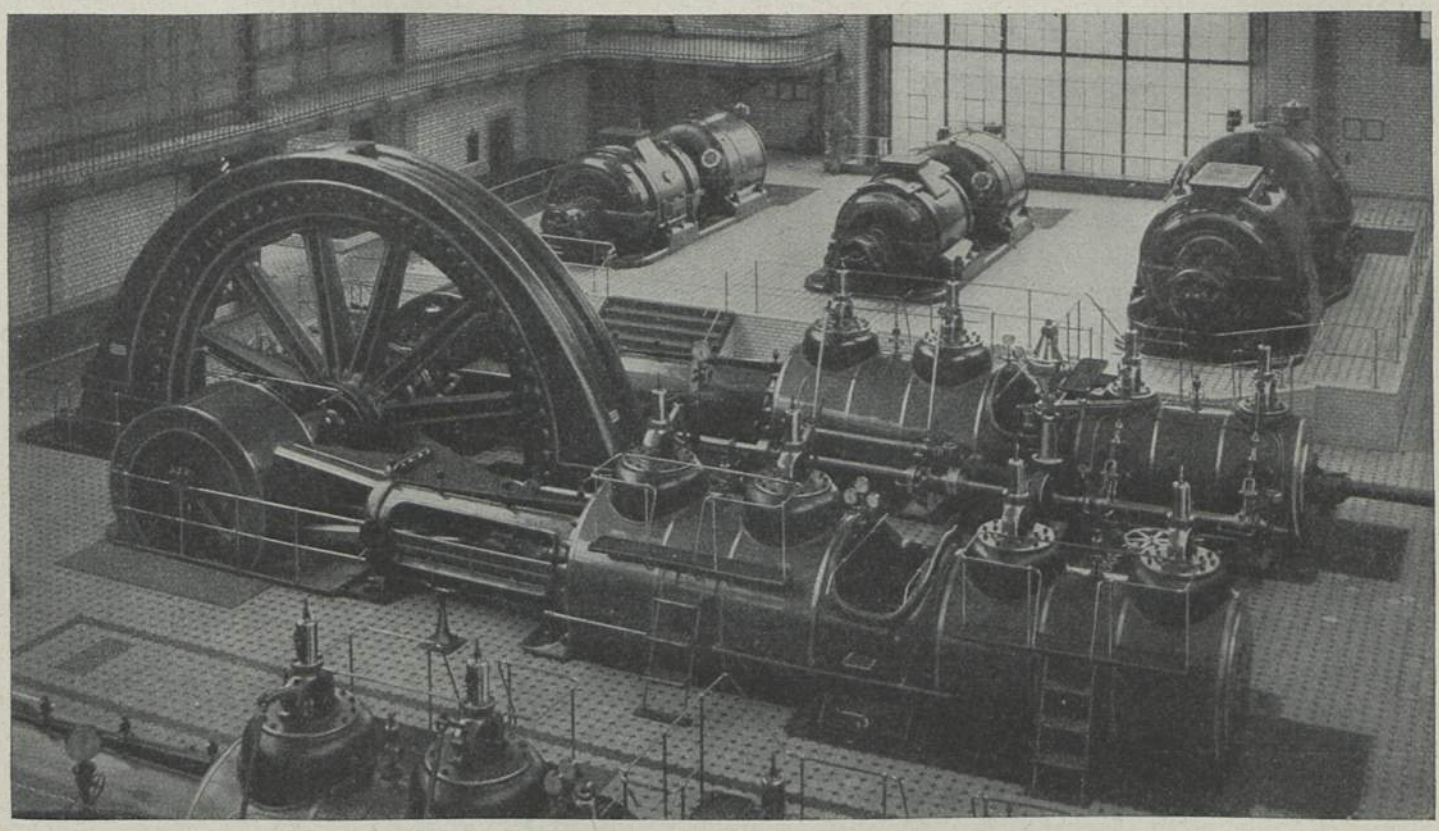
Lokomobilen sind schließlich auch, um die sprachliche Verwirrung vollkommen zu machen, trotz ihrer gegenteiligen Bezeichnung die Straßen-Lokomotiven. Sie sind besonders während des Kriegs, als die Pferde knapp waren, viel begehrte Zugmittel gewesen. Die Fähigkeit der Straßen-Lokomotive, im Gegensatz zur Eisenbahn-Lokomotive auch über unvorbereitetes, sehr schwieriges Gelände fahren zu können, veranschaulicht Bild 438.

# 28. Die Dampfturbine

Wer vor einer Reihe von Jahren den Maschinensaal des großen Kraftwerks Moabit in Berlin betrat, hatte treffliche Gelegenheit, zwei Zeitalter des Groß-Dampfmaschinenbaus miteinander zu vergleichen.

Da lagerten inmitten der Halle schwer und mächtig, mit vielen blanken Gliedern und hochgewölbten Schwungrädern prunkend, die vierzylindrigen Verbund-Kolbenmaschinen (Tafel XV), sehr schöne und viel bewunderte Erzeugnisse der Firma Gebrüder Sulzer. An einer Querseite des Maschinensaals hatte man aber an Stelle einer der Kolbenmaschinen drei kleine, in bescheidene glatte Kapseln gehüllte Vorrichtungen aufgestellt, die ohne jedes Hin und Her von Kurbeln, Schub- und Steuerstangen umliefen. Während nun das verwirrende Gezappel der sechs weithin gebreiteten Sulzer-Maschinen mit viel Gestöhn und Gestampf 18 000 Pferdestärken hervorbrachte, lieferten die stillen Nachkömmlinge 21 000 Pferdestärken. Sie nahmen zusammen nicht mehr Platz in Anspruch als eine der 4000 PS-Maschinen, verfünffachten also die Raumnutzung (Bilder 439 und 440).

Den prächtigen Kolbenmaschinen erging es wie den Gespielinnen der Prinzessin Emma, die der Geist des Riesengebirges aus Rüben hervorgezaubert hatte. Sie sahen, da ihre Stunde gekommen war, plötzlich alt, grau und verfallen aus. Man hatte nicht mehr den Eindruck, Schöpfungen neuzeitlicher Technik vor sich zu sehen, sondern glaubte eine Ansammlung von Riesen der Vorzeit, von Sauriern, zu erblicken. Ein jüngeres, flinkeres, der Neuzeit besser angepaßtes Geschlecht war in die Halle eingezogen und beschämte



439. Blick in den Maschinensaal des Kraftwerks Moabit der Berliner Städtischen Elektrizitätswerke
Die drei Dampfturbinen leisten 21 000 Pferdestärken, die Kolbendampfmaschine dagegen nur 4000 Pferdestärken

mit seinem munteren Lauf die Behäbigkeit der Voreltern. Der Vormarsch der Dampfturbine hatte begonnen.

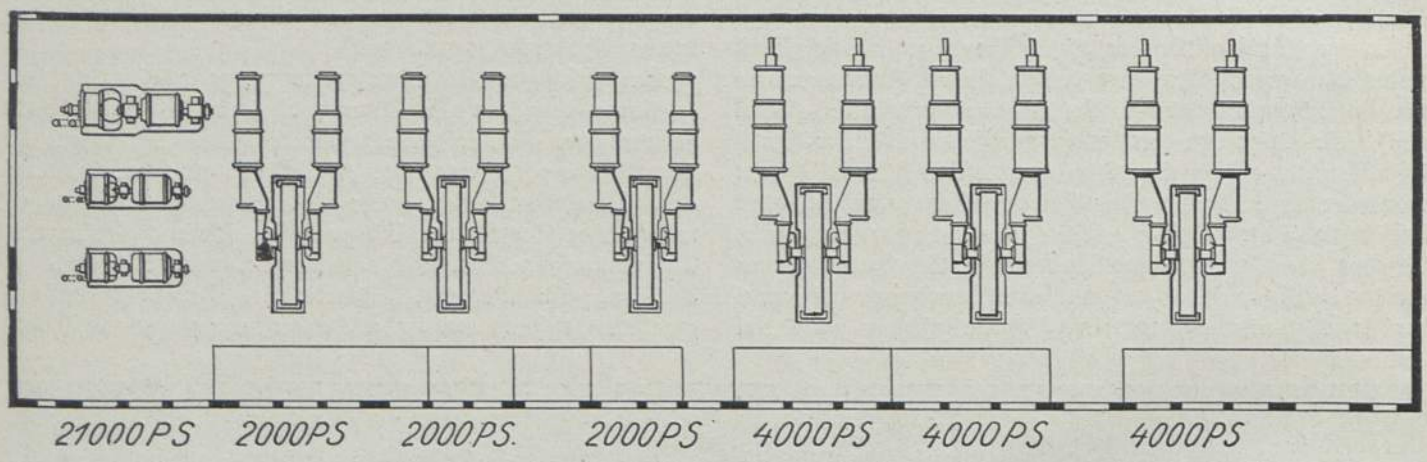
Heute hat sie ihre Stellung so weit befestigt und ausgebreitet, daß niemand auf der Erde mehr daran denkt, in dem wichtigsten Wirkungsbereich der Dampfmaschine, nämlich für das Antreiben von Großdynamos, noch Kolbenmaschinen zu verwenden. Die Entwicklung hat jedoch keineswegs einen Verlauf genommen, wie ihn Scheffel in seinem bekannten Lied schildert: „Es starb zur selbigen Stunde die ganze Saurierei!". Die Kolbenmaschine ist bis jetzt nicht untergegangen, und sie wird wahrscheinlich noch lange Zeit weiterleben.

Das Hauptwirkungsgebiet der Turbine ist der Dauer- und Schnellbetrieb. Die Dynamo-Maschine, mit der Wechsel- oder Drehstrom hervorgebracht wird, heischt eine hohe Drehzahl, und die großen Stromerzeuger pflegen so lange ununterbrochen Tag und Nacht durchzulaufen, bis eine Ausbesserungsarbeit an ihnen notwendig wird. Da ist, wo keine Wasserkraftmaschinen aufgestellt werden können, die Dampfturbine ein vorläufig nicht zu übertreffender Antreiber (Tafel XVI, 2). Auch für die Bedienung von Pumpen, deren wirkende Teile sich drehen, von Kompressoren, Zentrifugen und sehr vielen ähnlichen Vorrichtungen hat die Turbine hervorragende Eignung. Wenn es sich aber darum handelt, Fabrik-Transmissionen zu bewegen, Walzenstraßen oder Fördereinrichtungen anzutreiben, überall dort, wo langsamere Bewegung gefordert wird, Kehren oder häufiges Stillsetzen notwendig ist, bleibt die Kolbenmaschine nach wie vor Herrscherin.

Der Charakter der Turbine ist stürmischer und eigenwilliger. Es ist ihr nicht möglich, als gehorsame Dienerin auf den Druck an einem Hebel sofort stehen zu bleiben oder sogar in die entgegengesetzte Drehrichtung überzugehn. Obgleich Schiffsmaschinen derartiges oft leisten müssen, wird die Dampfturbine aber doch immer häufiger in Kriegs- und Handelsschiffe eingebaut. Zwei ihrer Haupttugenden, geringer Platzbedarf und der glatte Umlauf aller Teile, der wohltuend gegen den rüttelnden Gang der schweren Kolbenmaschinen absticht, sind hierfür maßgeblich. Man nimmt die unangenehmen Tatsachen, daß die Turbine die Schiffswelle ohne die Einsetzung von Zwischengetrieben zu schnell dreht, und daß sie nicht umgesteuert werden kann, in Kauf. Ausführlicheres über die Turbinenschiffe ist bereits in Band III, Abschnitt 17, gesagt worden. Verlangsamende Zahnrad-Zwischengetriebe werden auch angewendet, wenn die allzu rasch laufende Turbine zum Antrieb von Spinn- oder Webmaschinen, von Papiermühlen, Holzschleifereien und ähnlichem dient.

Die Dampfturbine hat seit dem Anfang unseres Jahrhunderts begonnen, mit der Kolbenmaschine in Wettbewerb zu treten. Heute, nach fast drei Jahrzehnten, ist es ihr bereits gelungen, den hohen Entwicklungsstand zu erreichen, für den die ältere Schwester zwei Jahrhunderte gebraucht hat.

Es gehört zu den unenträtselbaren Erscheinungen im Ablauf der Zeiten, daß die Technik, ohne von vornherein klar dieses Ziel zu verfolgen, doch immer Schöpfungen bereit hat, die der Epoche angemessen sind. In den letzten Jahrzehnten ist der Kraftbedarf ungeheuer gestiegen. Insbesondere der Hunger nach elektrischer Energie ist fast ins Maßlose gewachsen. Er kann auf wirtschaftliche Art nur befriedigt werden durch Zusammenballung der Stromerzeugung, durch den Betrieb gewaltiger Kraftwerke, wie sie überall in den Überlandzentralen, neuerdings auch in den ganz großen Städten, entstanden sind. Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts schufen geniale Ingenieure die ersten Dampfturbinen, mit denen sie zunächst nichts als eine Verbesserung der älteren Bauart anstrebten. Das moderne Riesenkraftwerk und damit die Versorgung weiter Landflächen oder der Millionenstädte mit Elektrizität wäre aber ohne Turbinen gar nicht möglich.

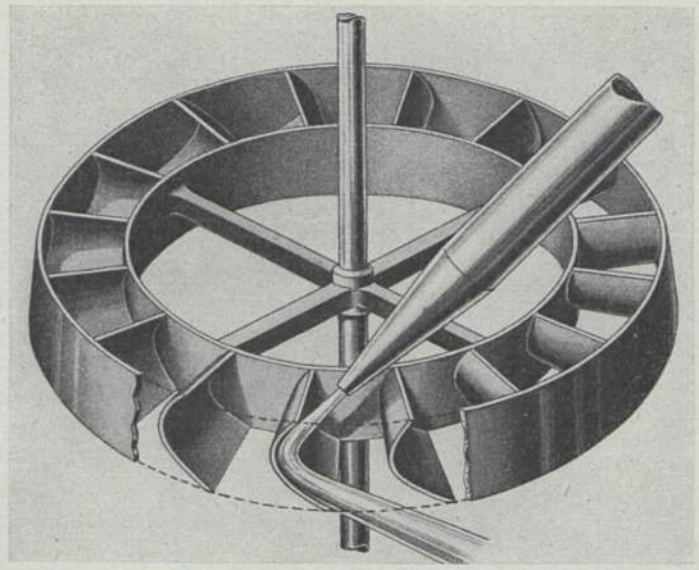



440. Grundriß des Kraftwerks Moabit der Berliner Städtischen Elektrizitätswerke

In Golpa-Zschornewitz zum Beispiel werden die 220 000 Pferdestärken in einem Maschinenhaus erzeugt, das nur 200 Meter lang ist. Hätte man Kolbenmaschinen aufstellen müssen, dann wäre das Gebäude mehr als ein Kilometer lang geworden. Unter solchen Umständen hätte wegen der starken Kondensverluste in den langen Dampfleitungen kein einheitliches Kesselhaus errichtet werden können, die Anlage wäre durch die Unterteilung, die alsdann auch für die Kohlenzu- sowie die Aschen- und Schlackenabfuhr, für die Kesselspeisung und die Kondensation notwendig gewesen wäre, so arg verteuert worden, daß sie gar nicht hätte gebaut werden können. Noch mehr treten alle diese Gesichtspunkte in den Vordergrund, wenn man eine Anlage wie das neue New-Yorker East-River-Kraftwerk betrachtet, dessen Turbinen von insgesamt 700 000 Kilowatt den Strombedarf von z. B. drei Millionen Sechszimmerwohnungen zu decken imstande wären. Alle Gegenden, die keine ausreichenden Wasserkräfte besitzen, verdanken es also der Dampfturbine, wenn sie heute Strom zu einem recht geringen Preis erhalten.

Die größte jemals gebaute Kolbenmaschine leistet 25 000 Pferdestärken. Man kann getrost sagen, daß mehr als

30 000 Pferdestärken durch eine Einheit dieser Art nicht hervorgebracht werden können. Denn die hin und her gehenden Teile werden alsdann so schwer, daß sie selbst die gewaltigsten Unterbauten in unzulässiger Weise erschüttern würden. Man brauchte Schwungräder von abenteuerlichen Abmessungen, und die Ölmengen, die zur Schmierung der vielen aufeinander gleitenden Teile notwendig wären, würden eine fast unerschwingliche Ausgabe verursachen. Die größte bisher gebaute Turbine aber leistet 110 000 Pferdestärken, ja in Amerika befindet sich sogar ein Aggregat mit einer Höchstleistung von 280 000 Pferdestärken, und es ist nicht der geringste Grund vorhanden, diese Maschinenstärke als eine Grenze zu betrachten.



441. Grundform der Dampfturbine mit senkrechter Achse

Der grundlegende Unterschied zwischen Turbine und Kolbenmaschine ist, daß bei dieser die Dampfkraft zunächst hin und her gehende Bewegung erzeugt, die erst mittels des Kurbelgetriebes in Drehbewegung umgewandelt werden muß, während bei der neueren Maschine sogleich der Umlauf entsteht. Hierdurch wird das Schwungrad entbehrlich; dessen Aufgabe ist es ja ausschließlich, Unregelmäßigkeiten des Gangs auszugleichen, die durch das Triebwerk entstehen. Die Turbine besitzt keinen Kolben, keine Schubstange und keine Kurbel. Der Dampf dreht die Welle unmittelbar, indem er an Radkränzen geeigneter Formen angreift.

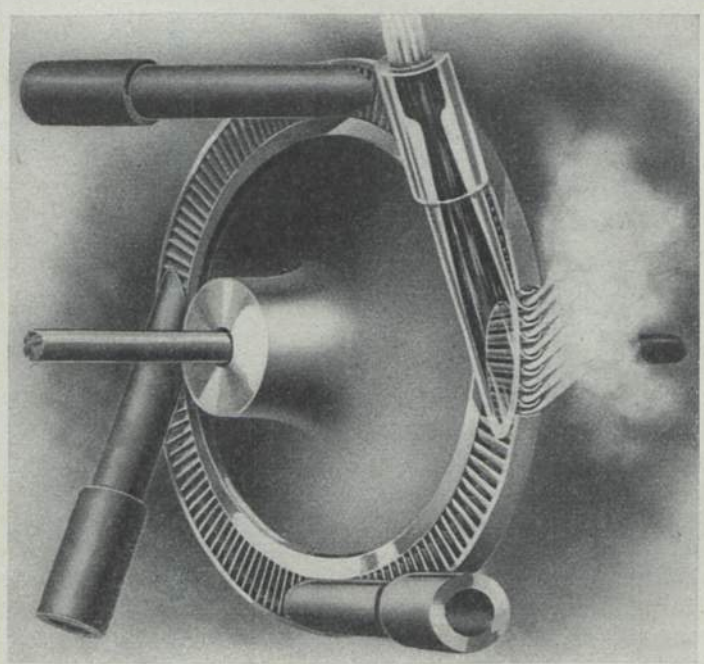
Die Kompression (Seite 209), die bei jedem Hub Kraft verbraucht, aber für den fortwährend kehrenden Mechanismus der Kolbenmaschine unentbehrlich ist, fällt weg, der Gesamtbau ist sehr viel einfacher. Die Turbine hat für gleiche Leistung ein geringeres Gewicht, das Fundament kann daher beträchtlich leichter sein und darf auch bescheidenere Abmessungen in Länge und Breite erhalten, da die Turbine, wie schon erwähnt, weitaus weniger Platz beansprucht. Eine Maschine dieser Art kann man in dem Niederdruckzylinder einer Kolbenmaschine gleicher Leistung unterbringen.

Die Turbine ist leicht in Gang zu setzen, da sie aus jeder Stellung sicher anläuft. Bedienung und Wartung sind sehr einfach und bequem. Der Wärter braucht nur eine bescheidene Zahl von Teilen zu beobachten, so daß es möglich ist, die gesamte Anlage mit Ausnahme der Wellenlager und der selbsttätigen Regelvorrichtung in eine festschließende Kapsel zu legen. Die Turbine kann, da sie, von den ganz großen Einheiten abgesehen, nur einen einzigen, immer gleichmäßig sich drehenden Laufkörper besitzt, den verwickelten Steuermechanismus völlig entbehren. Was das bedeutet, wird besonders klar, wenn wir uns erinnern, daß eine Dreifach-Expansions-Kolbenmaschine mit geteiltem Niederdruckzylinder, zum Beispiel die Maschine auf Bild 409, nicht weniger als 16 Ventile besitzt, deren jedes durch mehrere Stangen bewegt werden muß.

Wie verschieden ist der Anblick einer arbeitenden großen Mehrfach-Expansions-Kolbenmaschine und einer laufenden Turbine! Vergleichend könnte man sagen: dort das wirre Durcheinanderhasten einer aufgeregt schaffenden Menge, hier die ruhigen, wohl abgemessenen Bewegungen eines bedeutenden Manns, der in überlegener Art sein Werk vollführt.

Da bei der Turbine nur in den beiden Wellenlagern Metallteile aufeinander gleiten, braucht sie wenig Schmierung. Der Dampf kommt mit dem Öl überhaupt nicht in Berührung, so daß der Niederschlag im Kondensator ohne fremde Beimengungen ist. Das Kondensat ergibt daher ein treffliches Kesselspeisewasser, das ohne Reinigung immer von neuem benutzt werden kann.

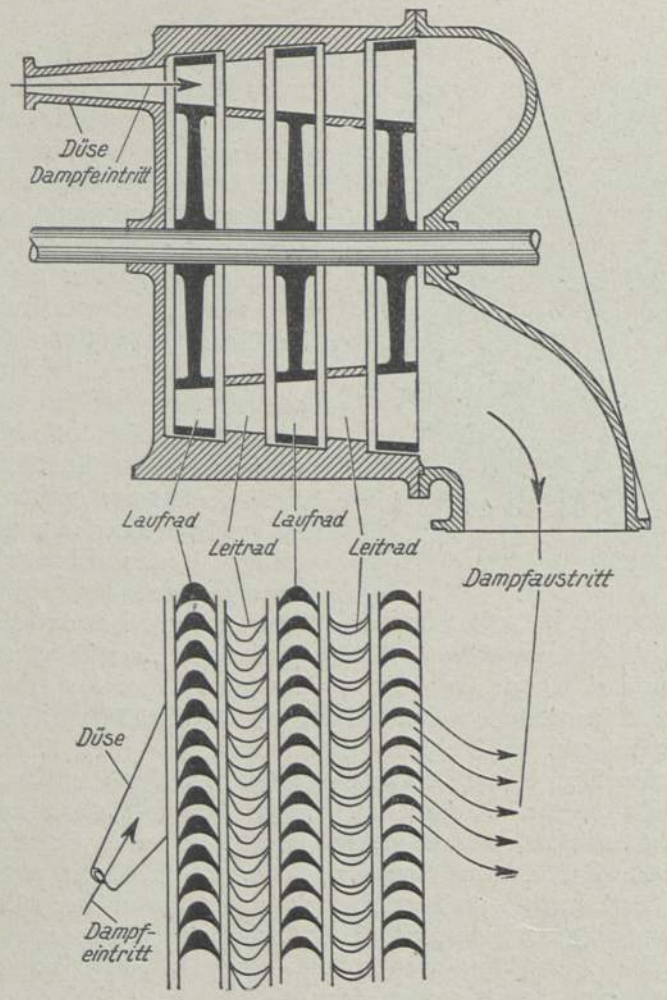
Die sehr erheblichen Verluste, die bei der Kolbenmaschine dadurch entstehen, daß der Frischdampf fortwährend mit Dampf von niedrigerer Temperatur in Berührung kommt (Seite 241), treten bei der Turbine nicht auf. Hier kehrt der Dampf seine Fließrichtung nicht um, sondern strömt stets in gleichem Sinn hindurch, so daß jeder Abschnitt des Gehäuses und des Laufkörpers sich bald nach dem Ingangsetzen auf die passende Temperatur einstellt.



442. Prinzip der Lavalturbine

Es sei hier bemerkt, daß die Druckzustände in dieser Maschine nicht durch einen Indikator, sondern nur durch Manometer, die den konstanten Druck an den verschiedenen Stellen der Turbine anzeigen, beobachtet werden können. Der Druckverlauf wird durch theoretische Berechnungen vorher festgelegt und bildet sich zuverlässig in der beabsichtigten Weise aus.

Die Vorteile der Überhitzung des Dampfs können bei der Turbine weit gründlicher ausgenutzt werden. Hier braucht keine Rücksicht auf die verschiedene Ausdehnung von Teilen genommen zu werden, die aufeinander reiben, und der Frischdampf geht nicht in




443. Schematischer Schnitt durch eine Curtisturbine mit drei Laufrädern

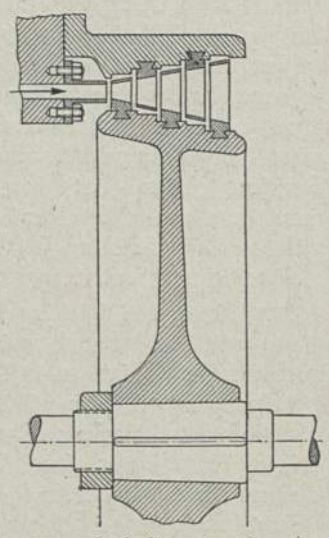
seinem ursprünglichen Zustand an den Stopfbüchsen vorbei. Es wird daher in diesem Bereich heute bereits mit Heißdampf von 400 Grad gearbeitet. Das Vakuum im Kondensator kann bis in die Nähe völliger Luftleere gesteigert werden. Während die Entspannung des Dampfs in der Kolbenmaschine nicht sehr weit getrieben werden kann, weil hierfür die Niederdruck-Zylinder und damit auch die Kurbelarme überlang gemacht werden müßten, übt hier selbst das höchste Vakuum immer noch günstige Wirkung, so daß die Arbeitskraft, die dem Kesseldampf innewohnt, infolge fast völligen Wegfalls eines Gegendrucks weit besser genutzt werden kann.

Der thermische Wirkungsgrad ist heute bei den Turbinen mindestens ebenso gut wie bei den besten Bauarten der Kolbendampfmaschinen. Es können ebenso wie Riesenturbinen auch solche mit Leistungen von weniger als einer Pferdestärke gebaut werden, wenngleich bei sehr kleinen Leistungen die prozentualen Verluste beträchtlich zunehmen.

Der Begriff der Schnellbewegung hat sich in den letzten Jahrzehnten stark geändert. Kolben-Schnellläufer, die man früher zum Antrieb von Dynamos zu bauen sich bemühte, machten 300 Umdrehungen in der Minute. Heute bezeichnet die Elektrotechnik eine Dampfmaschine nur dann als schnellaufend, wenn sie in der Minute 2000 bis 5000 mal umläuft. 30 000 minutliche Umdrehungen kommen in Sonderfällen vor. Hierzu wäre die Kolbenmaschine niemals imstande gewesen. Die hohen Tourenzahlen der Turbinen allein ermöglichen den Bau der neuzeitlichen Großdynamos mit Ankern von geringem Durchmesser, die einen so vorzüglichen Wirkungsgrad haben. Nur dadurch, daß treibende und angetriebene Maschine jetzt so vortrefflich zueinander passen, nur durch die Entstehung der Turbo-Dynamos, konnte der Strombezug Allgemeingut werden.

Die folgenden Auseinandersetzungen werden klar erkennen lassen, daß die Dampfturbine mit Recht denselben Namen trägt wie die neuzeitliche Wasserkraftmaschine. Die grundsätzliche Übereinstimmung in der Ausnutzung des Kraftmittels und in den Bauformen ist sehr groß. Der Hauptunterschied aber entsteht durch die Verschiedenheit der Aggregatzustände, in denen die beaufschlagenden Massen sich befinden. In den Wasserturbinen arbeitet eine Flüssigkeit, in den andern ein Dampf. Dieser muß dauernd sehr straff geführt werden, weil er stets dazu neigt, verbotene Wege einzuschlagen, die ihm innewohnende Energie durch Wirbelbildungen zu vergeuden. Während man einen Wasserstrom schon als schnellfließend bezeichnet, wenn er 20 Meter in der Sekunde zurücklegt, tritt der Dampf mit Geschwindigkeiten, die zwischen 80 und 1200 Sekundenmeter schwanken, in die Turbinen ein. Seine rascheste Vorwärtsbewegung übertrifft die Geschwindigkeit eines Geschosses in dem Augenblick, wo es das Rohr verläßt. Damit auch in solchen Fällen ein sehr großer Teil der ihm innewohnenden Energie in Nutzarbeit umgewandelt werden kann, müssen sehr verschmitzt ausgesonnene Bauformen angewendet werden. Der Nutzeffekt der Dampfturbinen beträgt heute 80 v. H. und mehr. Die Erzeugung des Dampfs in den Kesseln aber verursacht ungeheure Energie-Verluste.

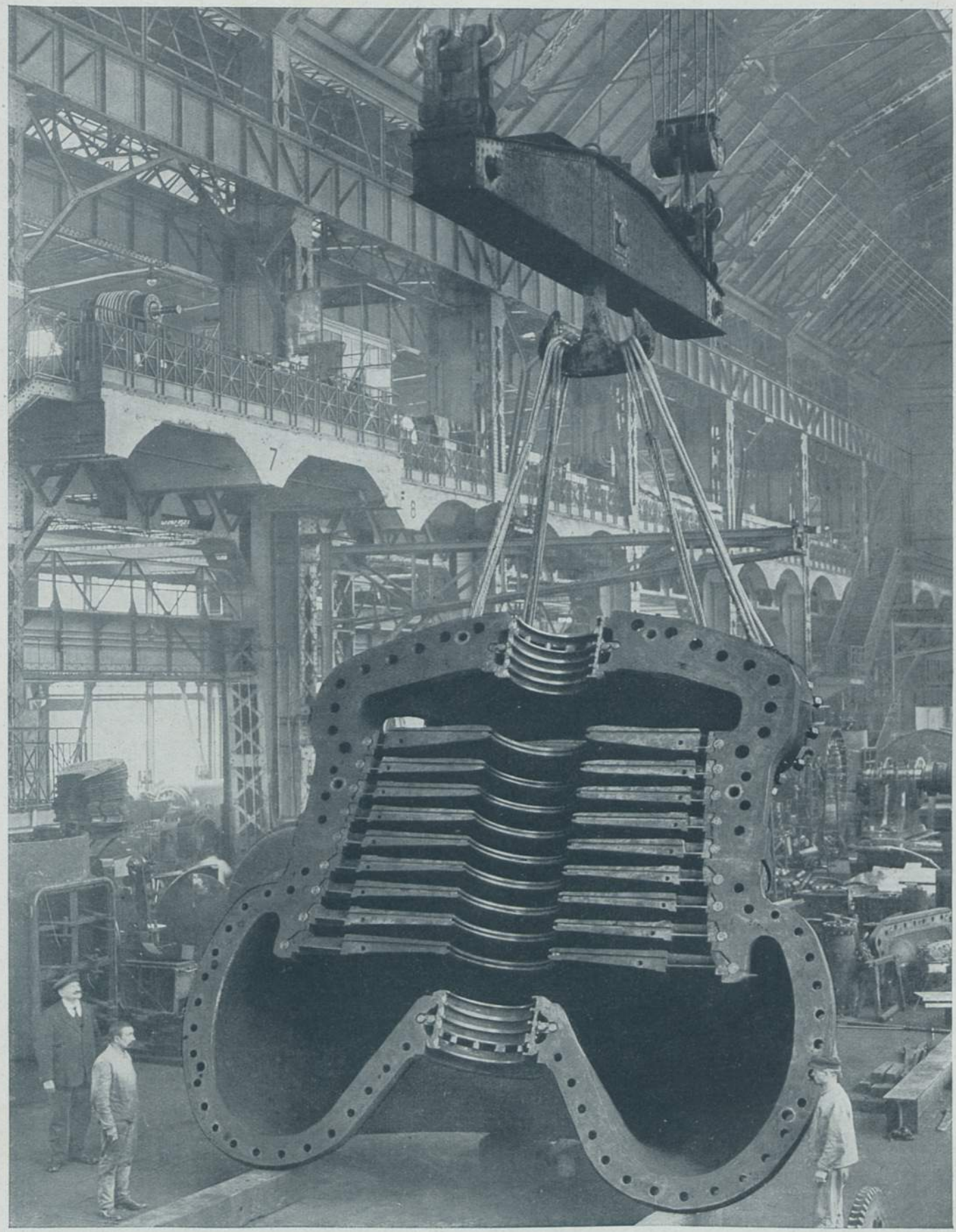
Die Turbinen sind die neuesten, aber auch die ältesten Dampfmaschinen. Wir haben im vorigen Abschnitt Herons Dampfkugel (Seite 159) und Brancas Rad (Seite 161) kennen gelernt. Beide Vorrichtungen müssen als Turbinen angesprochen werden. Die Aeolipile ist bestimmt gelaufen, Brancas Rad hätte sich bei nur leichter Belastung der Welle zweifellos gedreht. Trotzdem sind Jahrhunderte vergangen, bis die Turbine ein praktisches Gerät der Technik wurde. In der Zwischenzeit ist der Erfindergeist niemals müde geworden, eine Bauart für Dampfmaschinen zu ersinnen, die unmittelbar drehende Bewegung hergeben sollte. Die Aufgabe war ja lockend genug. Auch Watt hat sich mit dem Turbinenproblem beschäftigt, wie der Abschnitt Fünf seines großen Patents (Seite 182) zeigt, er hat sogar Entwürfe hierfür hergestellt. Zur Ausführung ist es jedoch nicht gekommen, da dieser kluge Kopf wohl einsah, daß die geringe Kunstfertigkeit der Mechaniker seiner Zeit einen Erfolg unmöglich gemacht hätte. In einem Brief aus dem Jahre 1808 noch sagt Watt sehr richtig: „Die umlaufenden Maschinen sind nicht einfacher, sondern schwieriger in Konstruktion und Ausführung als die Kolbenmaschinen."



444. Schnitt durch eine Curtisturbine mit drei Laufschaufelkränzen auf einer Scheibe

Leute von geringerer Genialität glaubten die Schwierigkeiten leichter überwinden zu können. Es blieb aber bei den Versuchen. Selten tritt der weite Abstand des Gedankens

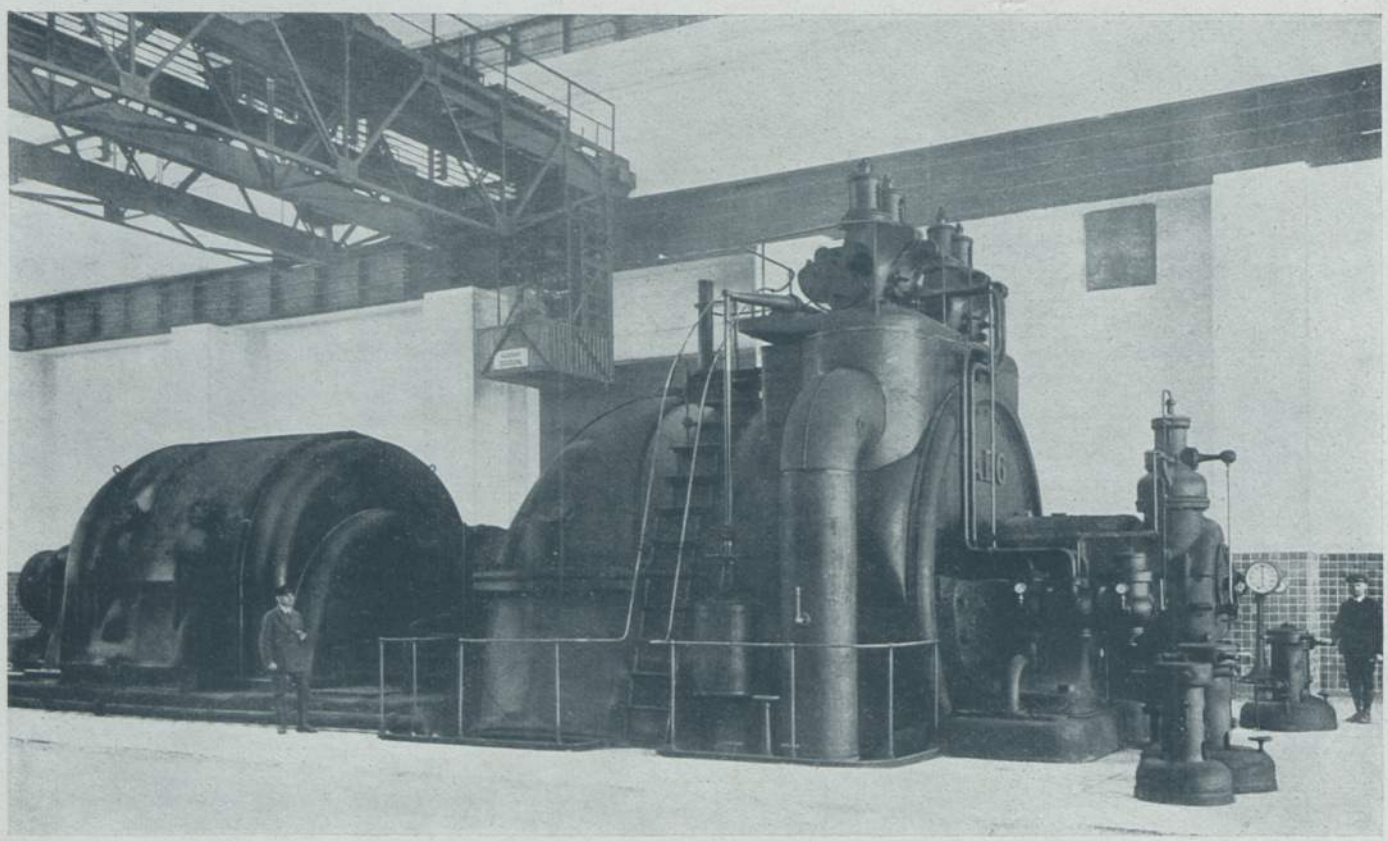
POLITECHNIKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA WROCŁAWSKA



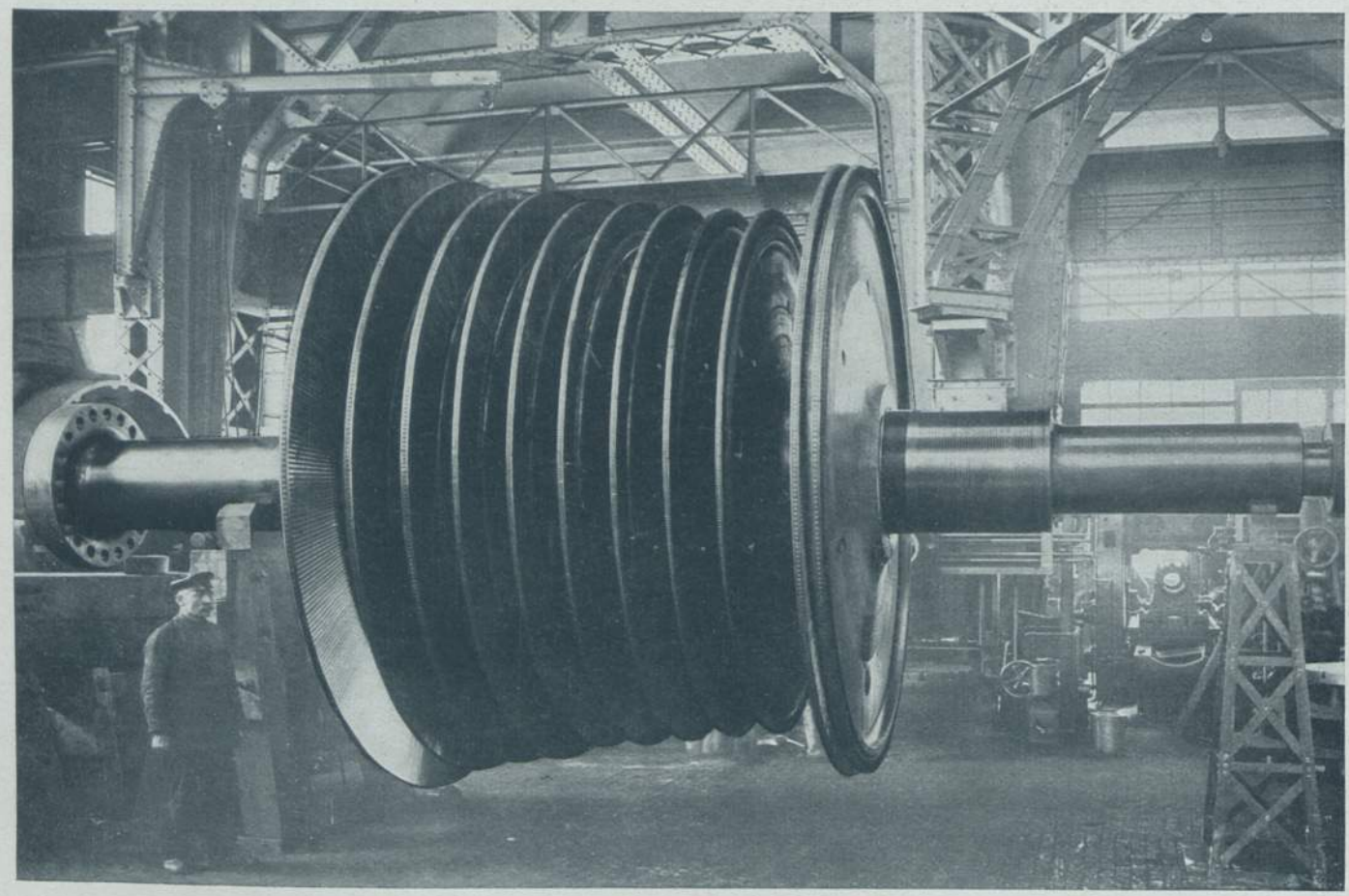
1. Oberteil des Turbinengehäuses

Druckstufenturbine des Kraftwerks Goldenberg der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitäts-Werke

Einheitsleistung: 75 000 Pferdestärken bei 1000 Touren. Ausführung der AEG, Berlin



2. Turbine mit Generator



3. Rotor der Turbine

von der Tat so deutlich hervor wie in diesem Gebiet. Nichts ist einfacher, als sich vorzunehmen, eine Dampfturbine zu schaffen. Der Gedanke springt mühelos auf, aber hart im Raume stoßen sich die Sachen. Man ist noch kein Erfinder, wenn man sich klar darüber ist, wie der Dampf geführt werden muß, um eine Welle ohne Anwendung eines Kurbeltriebs zu drehen. Wäre hiermit schon Tatsächliches geschehen, so müßte auch jeder, der eine tüchtige Dramaturgie über Shakespeare oder Schiller geschrieben hat, ein Werk von der Größe des „Hamlet" oder des „Wallenstein" schaffen können. Auch die technische Tat folgt dem Gedanken nicht so rasch wie der Knall dem Schuß. Jedes Zeitalter kann nur die Maschine haben, die ihm gebührt.

Wir haben gesehen, wie Papin niemals, Watt erst sehr spät zur praktischen Durchbildung einer Kolbenmaschine kam, weil ihnen die Möglichkeit zu einer ausreichend genauen Ausführung fehlte. Die Dampfturbine stellt nun noch viel höhere Anforderungen an die Herstellung. Sie ist ein Präzisions-, ja geradezu ein Kunsterzeugnis der Werkstatttechnik. Erst nachdem diese eine sehr bedeutende Höhe erreicht hatte, konnten die ersten wirklich brauchbaren Maschinen dieser Art auf den Markt kommen. Ihr Erfolg ist dann aber, nachdem die technische Welt so lange auf sie gewartet hatte, ganz groß und tief gewesen.

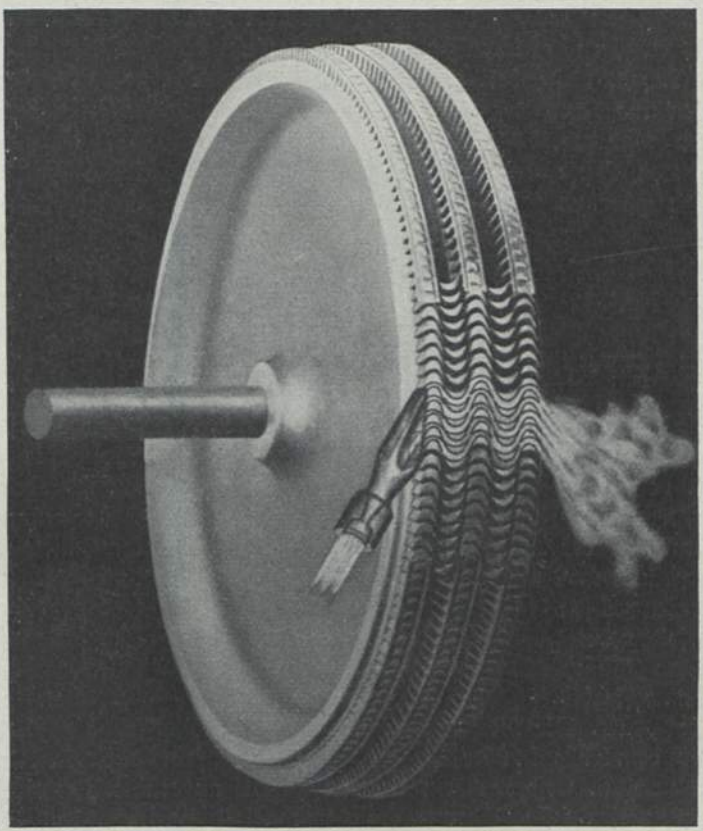
*

Die Grundform haben Dampfturbine und Wasserturbine gemeinsam. Bild 441 könnte auch die vereinfachte Darstellung eines auf ungewöhnliche Art beschaufelten Pelton-Rads mit senkrechter Achse sein. Der Beaufschlagungsstoff tritt mit hoher Geschwindigkeit aus der Düse aus und prallt gegen eine Schaufel, durch deren Krümmung der Strahl in eine andere Richtung gezwungen wird. Hierbei übt der Dampf, der in seiner ursprünglichen Richtung weiterzuströmen trachtet, an der Krümmungsstelle einen Druck gegen die Schaufelfläche aus, der diese vorwärtstreibt. Nach der Wendung ist seine Geschwindigkeit geringer, das ihm entzogene Arbeitsvermögen tritt, soweit es nicht durch Reibung vergeudet ist, als Schaufeldruck wieder auf. Dadurch, daß immer wieder neue Schaufeln von Dampf getroffen werden, entsteht eine dauernde Drehung der Welle.

Die Beaufschlagung des Turbinenrads kann teilweis sein, also durch einzelne Düsen erfolgen, ebenso gut ist aber auch volle Beaufschlagung durch Düsenringe möglich, durch sehr zahlreiche Kanäle, die sich über den ganzen Umfang des Leitapparats verteilen. Die Verhältnisse sind hier wiederum die gleichen wie bei den Wasserturbinen, über deren Beaufschlagung auf Seite 122 gesprochen wurde.

Die Schaufelabstände müssen bei der Dampfturbine sehr viel kleiner sein als beim Wassermotor. Die umzutreibenden Räder sind daher mit sehr vielen schmalen Schaufeln besetzt; die Innenfläche der einen und die Außenfläche der nächsten bilden immer einen Kanal, der eng genug ist, um den Dampf so straff zu führen, daß er fast gar keine Gelegenheit zur Bildung kraftverzehrender Wirbel findet.

Die Art der Nutzung des Arbeitsvermögens, das dem vom Kessel mit hoher Spannung herankommenden Dampf innewohnt, ist bei den Turbinen völlig anders als bei den Kolbenmaschinen. In dem Zylinder mit gleitendem Kolben wirkt die Spannungsenergie des Dampfs, sein Ausdehnungsvermögen, unmittelbar als Druck auf die Kolbenfläche. Sorgfältig ist beim Konstruieren der Kolbenmaschinen darauf zu achten, daß der Dampf keine Gelegenheit zur Expansion findet, bis er in den Zylinder eingetreten ist. In schärfstem Gegensatz hierzu läßt man bei den Turbinen den Dampf beim Eintritt in das Gehäuse sich völlig oder doch zu einem sehr beträchtlichen Teil entspannen, da bei diesen Maschinen die hierdurch gewonnene Strömungsgeschwindigkeit als lebendige Kraft ausgenützt wird.



445. Modell des Laufrads einer Curtisturbine mit drei Laufschaufelkränzen

In der Nähe der Düse ist die Stellung der Leitschaufeln und der Weg des Dampfs eingezeichnet

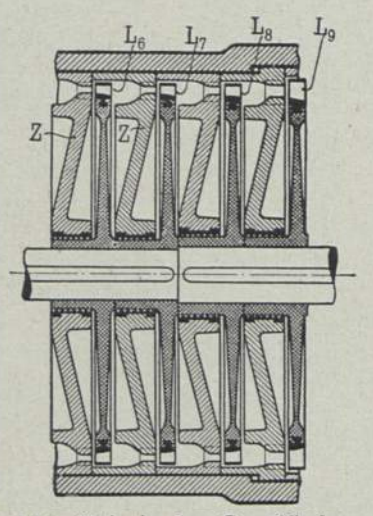
Bei der Kolbenmaschine tritt der Inhalt des Kessels niemals mit dem Kondensator in Verbindung. Solange der Auslaß am Zylinder offen steht, ist der Einlaß immer geschlossen. Die Turbine aber hat keine Steuerung; der Dampfweg Kessel—Kondensator ist außer in vereinzelten Sonderfällen stets frei. Bald nach dem Ingangsetzen der Maschine hat sich das Kondensator-Vakuum über den ganzen Raum des Abdampfgehäuses ausgebreitet. Der Kesseldampf, der in das Zuführungsrohr mit einem Druck von 15, 20, neuerdings sogar 35 Atmosphären eintritt, stürzt am Ende des Zuführungsrohrs, durch die Düsen, in einen Raum erheblich tieferen Druckes, manchmal sogar unmittelbar in den furchtbaren Abgrund des Vakuums von nur $^1/_{20}$ Atmosphäre. Wie das Wasser eines Flusses dort, wo er einen Fall bildet, hohe Geschwindigkeit annimmt, so wächst die Strömungsgeschwindigkeit des Dampfs in den Düsen an, aus deren Mündung er mit sehr hoher Geschwindigkeit austritt. Sie kann nur auf Kosten des Drucks entstanden sein. Denn der Dampf hat bisher keine Gelegenheit gehabt, Arbeit zu leisten; die Druckenergie, die ihm bisher innewohnte, hat sich nur durch die Entspannung in der Düse in Geschwindigkeitsenergie umgewandelt. Diese ist es nun, die die Turbinenräder in Bewegung setzt, indem sie in deren Schaufeln in Nutzarbeit umgewandelt wird. Die Strömungsgeschwindigkeit wächst, je größer das Druckgefälle

zwischen Kessel und Gehäuse ist, hohe Kesseldrücke sind also vorteilhaft, ja für die großen Hochleistungsmaschinen unbedingt erforderlich. Auch die Wichtigkeit eines hohen Vakuums im Kondensator geht aus dieser Betrachtung hervor.

Entspannt sich der Dampf gleich beim Eintritt in die Turbine vollständig, so herrscht das Vakuum im ganzen Gehäuse. Bei sehr vielen Turbinen steht aber nur dessen letzter Abschnitt unter der Entspannung (Kondensatordruck), von wo an der Druck stufenweis ansteigt. Es geschieht eine oftmalige Nutzung, eine allmähliche, stufenweise Umwandlung des Anfangsdrucks in den niedrigen Enddruck.

Da bei den Maschinengattungen, die wir zunächst besprechen, der Druck innerhalb der einzelnen Abteilungen oder Stufen des Turbinengehäuses stets der gleiche ist, so hat der Dampf nach dem Verlassen der Düsenmündungen keine Ursache mehr, sich auszudehnen. Der austretende Strahl bleibt daher geschlossen, die einzelnen Dampffäden im Strahl verharren parallel und geben ihr Arbeitsvermögen gleichmäßig ab.

Infolge der Druckgleichheit ringsum schadet es auch nichts, daß sich zwischen den Düsen und dem ersten Laufrad, sowie zwischen allen folgenden Leitschaufelkränzen und den weiteren Laufrädern stets ein Spalt befindet. Die ruhenden und die sich drehenden Teile der Turbine dürfen natürlich nicht aufeinanderschleifen, sondern müssen mit Abständen hintereinander gereiht sein. Derartiges wäre bei der Kolbenmaschine ganz unmöglich, ist aber hier ohne weiteres durchführbar.



446. Prinzip der Druckstufenturbine

Damit der Dampf sein Arbeitsvermögen möglichst verlustlos an die Laufräder abzugeben vermag, ist es notwendig, daß er in deren Schaufeln ohne Stoß eintritt. Das geschieht stets dann, wenn der Strahl an der Eintrittstelle nicht zu einer Richtungsänderung gezwungen wird. An den Eintrittkanten müssen die Laufschaufeln daher stets eine solche Stellung haben, daß die Richtung ihrer Flächen der Richtung des ankommenden Dampfstrahls relativ zu dem laufenden Rad entspricht. Die hierfür maßgeblichen Verhältnisse sind bereits in dem Abschnitt über Wasserturbinen auf Seite 122 erörtert worden. Erst nachdem der Dampf durch die Laufschaufelflächen eine feste Führung erhalten hat, darf die kraftentziehende Richtungsänderung vor sich gehen.

Der richtige Laufschaufelwinkel für die Eintrittseite läßt sich für jede Geschwindigkeit der umlaufenden Räder berechnen und ausführen. Hat man ihn aber erst einmal festgesetzt, so ist damit auch ein für allemal die Umlaufgeschwindigkeit der Räder bestimmt, die allein einen guten Nutzeffekt der Maschine sichert. Sobald nämlich die Räder langsamer oder schneller laufen, wird der Eintrittwinkel falsch, der Dampf stößt sich und gibt einen Teil seines Arbeitsvermögens nutzlos weg. Jede Turbine hat also nur eine einzige wirtschaftliche Drehgeschwindigkeit. Theoretische Betrachtungen und die Erfahrung haben ergeben, daß es am besten ist, die Geschwindigkeit der Laufschaufelkränze etwa halb so groß zu machen wie die Geschwindigkeit des eintretenden Dampfs.

*

Im Jahre 1883 baute der Schwede Gustaf Patrik de Laval die erste Dampfturbine, in der die mechanischen Schwierigkeiten gemeistert und die Formen auf Grund eindringender theoretischer Berechnungen bestimmt waren. Seine Schöpfung, die zum erstenmal erhebliche Drehkräfte unmittelbar aus der Dampfkraft gewann, erregte das größte Aufsehen. Die technische Welt war so vollkommen an die Ausnutzung des Dampfs in Zylindern mit Gleitkolben gewöhnt, daß man zunächst an die neue Maschinengattung nicht glauben wollte. Diese Überraschung ist heute bereits vollständig vergessen, nachdem in einer kurzen Zeitspanne die Dampfturbine nicht nur gleichberechtigt an die Seite der Kolbenmaschine gerückt ist, sondern sie in den meisten Wirkungsgebieten überflügelt hat. 1889 hatte das Innere der Laval-Turbine nach mancherlei Verbesserungen die auf Bild 442 dargestellte Gestalt angenommen.

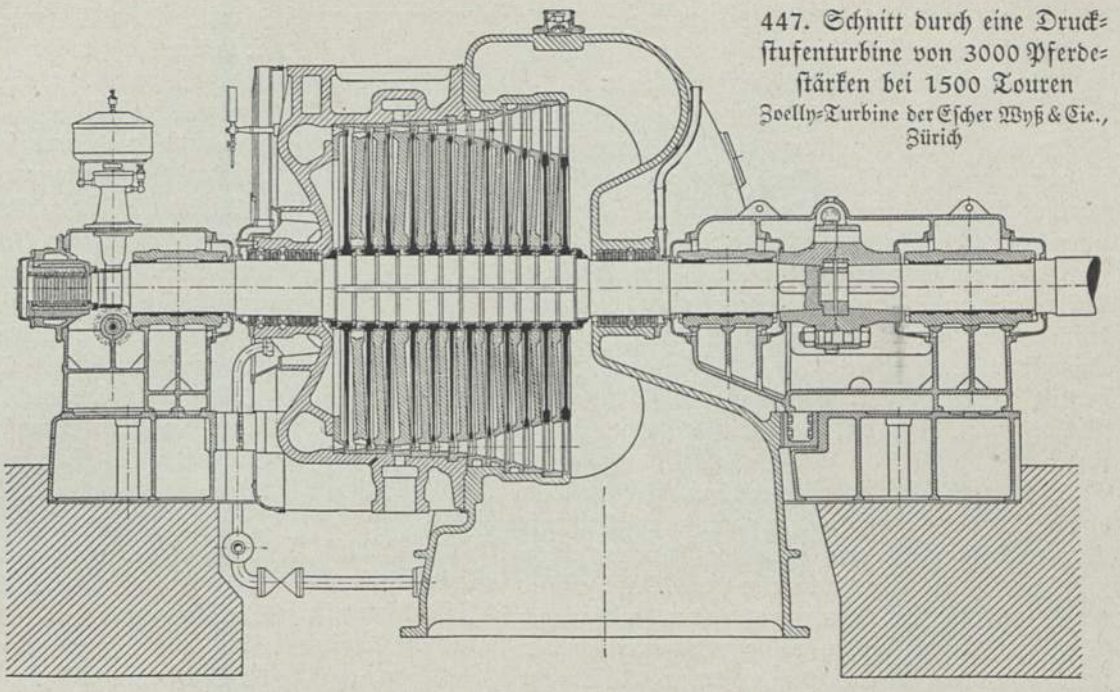
Der Dampf tritt aus vier Düsen, welche die Enden eines vom Kessel herkommenden Rohrs bilden, nachdem er sich entspannt und hohe Geschwindigkeit angenommen hat, in die Schaufeln des Laufrads ein. Wir sehen, wie die gekrümmten Schaufeln dicht nebeneinander auf dem Rand einer stählernen Scheibe sitzen, die in der Mitte zur Nabe verdickt ist. Die Schaufelenden sind von einem Metallband umgeben, in das jede einzelne Schaufel leicht eingenietet ist. Das Band sichert die Schaufelabstände und sperrt zugleich die Durchströmungskanäle nach oben hin ab. Das umschließende Gehäuse ist weggelassen.

Da Laval nur ein einziges Laufrad anwendete, mußte er in diesem dem Dampf das gesamte Arbeitsvermögen entziehen. Er hatte also dafür zu sorgen, daß der äußerst geschwind eintretende Dampf auf der anderen Seite nahezu tot abströmte, d. h. fast gar keine Relativgeschwindigkeit mehr gegenüber dem Radkranz besaß. Hieraus ergab sich eine sehr hohe Umlaufgeschwindigkeit. Die Laval-Turbine mußte bis 30 000 Drehungen in der Minute ausführen, jede Laufschaufel legte in der Sekunde über 300 Meter zurück.

Die Fliehkräfte, die hierbei in der Radscheibe und in den Schaufeln auftraten, waren gewaltig. Der auf jede Schaufel ausgeübte Zug erreichte fast 1000 Kilogramm. Es war nicht möglich, das Rad so vollkommen ebenmäßig herzustellen, daß nicht irgendeine Stelle schwerer oder leichter war als die in gleichem Achsabstand diametral gegenüberliegende. Die geringste einseitige Belastung aber hätte bei den hohen Fliehkräften selbst eine sehr kräftige, starre Welle sicher verbogen und so eine rasche Zerstörung des Rads herbeigeführt. Laval umging diese Schwierigkeit, indem er die Welle so dünn machte, daß sie sich etwas ausbiegen und so dem Laufkörper die Möglichkeit geben konnte, sich stets um den wahren Schwerpunkt zu drehen.

Dynamo-Maschinen, deren Anker in unmittelbarer Kupplung mit der Welle der Laval-Turbine 30 000 mal in der Minute umlaufen konnten, vermochte man damals nicht zu bauen und kann es auch heute noch nicht. Es war deshalb notwendig, ein Zwischengetriebe einzuschalten, das die Geschwindigkeit hinuntersetzte. Laval baute ein Zahnrädervorgelege, dessen langsame Welle sich nur noch 3000 mal in der Minute drehte. Das Übersetzungsverhältnis betrug also 1 : 10. Obgleich das Getriebe eine brauchbare Geschwindigkeit zum Antrieb von Dynamo-Maschinen hervorbrachte, konnte die Laval-Turbine doch keinen Platz im Groß-Kraftmaschinenbau

erobern, weil sowohl sie selbst wie auch das Vorgelege schlechte Wirkungsgrade hatten. Es zeigte sich, daß eine so einfache Bauart für Großturbinen nicht möglich ist. Kunstvollere und verwickeltere Konstruktionen mußten ersonnen werden. Es entstand zunächst, gleichfalls im vorletzten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts, die Parsons-Turbine, die wir aber wegen ihres von allen anderen abweichenden Grundgedankens erst später besprechen werden.



447. Schnitt durch eine Druckstufenturbine von 3000 Pferdestärken bei 1500 Touren
Zoelly-Turbine der Escher Wyß & Cie., Zürich

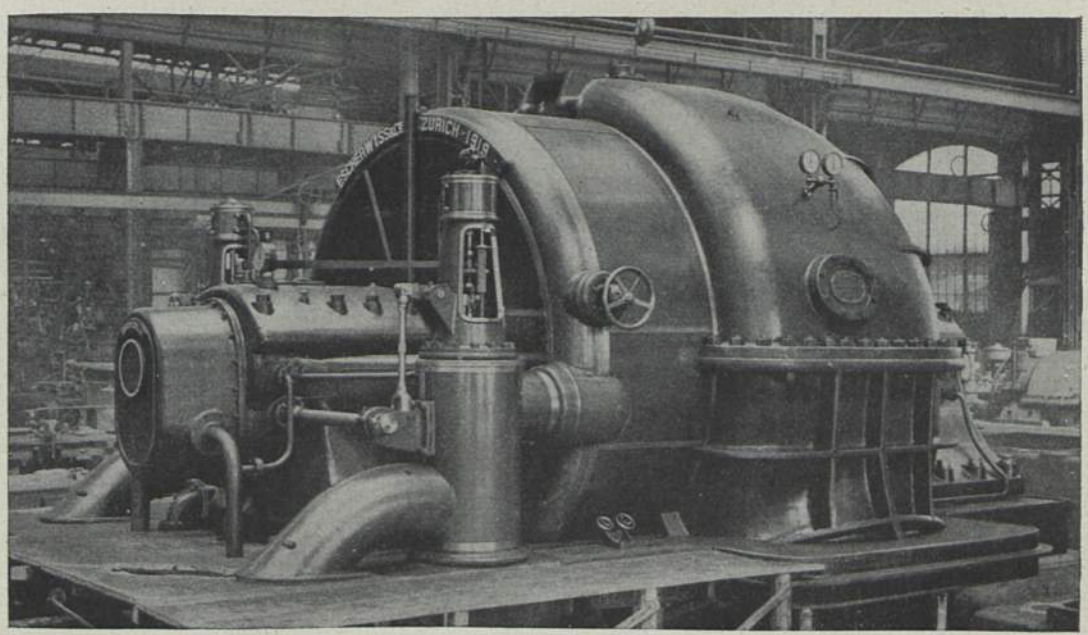
Die Laval-Turbine aber ist nicht völlig ausgestorben, die einstufige Bauart lebt noch heute in kleinen Einheiten fort, bei denen die hohe Umlaufgeschwindigkeit nicht unwillkommen ist, wie beim Antrieb von Schleuderpumpen für die Kesselspeisung, und wo nicht so streng auf hohen Wirkungsgrad geachtet zu werden braucht.

Die hohe Umlaufgeschwindigkeit des Laval-Rads entstand dadurch, daß in nur einem Schaufelkranz die gesamte Strömungsgeschwindigkeit des Dampfs in Arbeitsenergie umgesetzt werden mußte. Das führte Curtis auf den Gedanken, das Geschwindigkeitsgefälle statt in einer in mehreren Stufen zu verarbeiten. Wenn dem Dampf nach dem Durchströmen des ersten Rads noch weiter Gelegenheit zur Arbeitsleistung gegeben wird, so kann er beim Verlassen des ersten Rads noch eine beträchtliche Relativgeschwindigkeit diesem gegenüber haben. Die Turbinenräder brauchen dann also nicht mehr mit der halben Geschwindigkeit des eintretenden Dampfs umzulaufen, sondern können sich langsamer drehen. Stoßfreier Eintritt muß durch entsprechende Winkelung der Schaufeln selbstverständlich trotzdem gewahrt bleiben.

Curtis läßt den Dampf, nachdem dieser, aus den Düsen kommend, das erste Rad durchströmt hat, durch einen Kranz ruhender, im Turbinengehäuse befestigter Leitschaufeln hindurchgehen, die seine Richtung so ändern, daß er das folgende Laufrad in der gleichen Richtung beaufschlagt wie das erste. Weitere Leitschaufelkränze können den Dampf dann auch noch einem dritten und vierten Laufrad in gleicher Weise zuführen. Die Schaufelkränze der Geschwindigkeitsräder werden entweder auf einzelne Scheiben gesetzt (Bild 443), oder man nimmt, wie es jetzt fast durchweg geschieht, nur ein einziges Laufrad mit einer starken Verbreiterung am Umfang, an der sämtliche Laufschaufelkränze befestigt sind. Die Leitschaufeln ragen in die Lücken hinein (Bilder 444 und 445).

Bei seinem Marsch durch die Schaufelkränze nimmt die Geschwindigkeit des Dampfes immer mehr ab. Damit dies geschehen kann, ohne daß eine schädliche Spannungssteigerung innerhalb der Schaufelkanäle eintritt, gibt man jedem einzelnen von ihnen einen wachsenden Querschnitt in der Dampfrichtung. Es entstehen hierdurch die schrägen Begrenzungslinien der Schaufeln oben und unten, die auf Bild 444 besonders deutlich hervortreten. Aus demselben Grund müssen die Schaufellängen von Stufe zu Stufe anwachsen.

Mehrstufige Geschwindigkeitsräder haben nun noch einen schlechteren Wirkungsgrad als einstufige. Reine Curtis-Turbinen, obgleich auch sie durch einfache Bauart ausgezeichnet sind, werden aus diesem Grund nicht mehr



448. Druckstufenturbine, Bauart Zoelly
Escher Wyß & Cie., Zürich

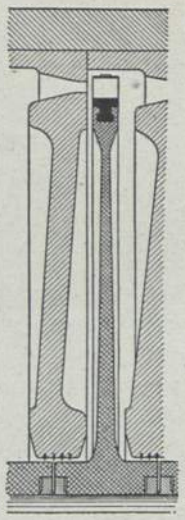
gebaut, wohl aber sind die Geschwindigkeitsstufen als Vorschaltung bei Turbinen anderer Gestaltung bis zum heutigen Tag sehr wichtig geblieben.

Von neuem sagen wir: die zu hohe Umlaufgeschwindigkeit des Laval-Rads entstand dadurch, daß in nur einem Laufschaufelkranz die gesamte Strömungsgeschwindigkeit des Dampfs in Arbeitsenergie umgesetzt werden mußte. Nachdem erkannt worden war, daß auch Unterteilung in viele Geschwindigkeitsstufen keine ausreichende Verbesserung brachte, wurde darüber nachgedacht, ob das Arbeitsvermögen des Dampfs nicht in anderer Weise auf mehrere Räder verteilt werden könne. Es gelang tatsächlich, eine Methode mit sehr viel besserem Nutzergebnis zu finden.

Denkt man sich jedes einzelne Laufrad L der Turbine (Bild 446) durch zu ihm parallel liegende feste Scheidewände Z in eine besondere Kammer eingeschlossen, so kann eine Unterteilung des Druckgefälles bewirkt werden. Der Dampf wird in den Zuführungsdüsen nicht mehr sogleich völlig entspannt, sondern man läßt den Druck, den er vom Kessel her mitbringt, in den Düsen nur zum Teil abnehmen. So tritt er in die erste Turbinenkammer ein und beaufschlagt das erste Rad. Die Geschwindigkeit des Dampfs ist jetzt bei seinem Eintritt in die Leitschaufeln mäßig, da die Drücke im Kessel und in der ersten Turbinenkammer nicht sehr arg voneinander verschieden sind und die Strömungsgeschwindigkeit des Dampfs ja von diesem Druckunterschied abhängt. Beim Austritt aus den Schaufeln des ersten Laufrads ist die Geschwindigkeit des Dampfs fast völlig verschwunden, da sie durch die Arbeitsabgabe aufgezehrt wurde.

Am Rand der festen Scheidewand, welche die erste Turbinenkammer von der zweiten trennt, befinden sich einzelne Düsensegmente, oder es ist ein voller Leitschaufelkranz darin ausgebildet, durch den der Dampf zur zweiten Kammer strömt. Er hat ja gegenüber dem Kondensator, dessen Vakuum am Ende der Turbine saugt, immer noch einen starken Überdruck, und schließlich besteht auch hier eine zusammenhängende Verbindung zwischen dem ersten Laufrad und dem Kondensator. Der Weg ist aber nicht mehr wie bei der Curtis-Bauart gewissermaßen eine glatte, steil abfallende Ebene, sondern eine Treppe mit genau vorgeschriebenem Druckabfall beim Übergang von einer Stufe zur anderen.

In den Düsen oder Leitschaufelkränzen, die ja nichts weiter sind als kurze Zuführungsrohre, erhält der Dampf von neuem Geschwindigkeit, die er ja verloren hatte. Der Druck mindert sich dementsprechend. Mit der wiedergewonnenen Geschwindigkeit wird das zweite Laufrad beaufschlagt, und so geht es weiter von Kammer zu Kammer, von Laufrad zu Laufrad, bis die Auslaßkammer erreicht ist. Immer wieder wird dem Dampf in den Laufradschaufeln seine Geschwindigkeit genommen, er erhält sie in den Leitschaufeln stets wieder. Sein Druck bleibt innerhalb jeder Kammer unverändert, er sinkt aber jedesmal beim Durchströmen eines Leitschaufelkranzes immer tiefer ab, und jede Kammer stellt sich rasch auf den ihr zukommenden Druck ein.



449. Abdichtung der Druckstufenkammern an der Welle

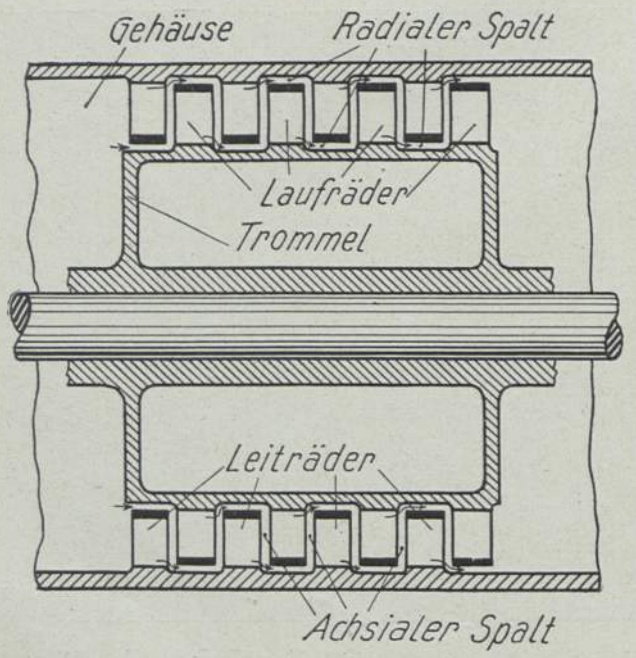
An die Stelle der Geschwindigkeitsstufen sind jetzt Druckstufen getreten. Jede Kammer mit ihrem Laufrad bildet eigentlich eine Einzelturbine, deren Auspuff zur nächsten Kammer geht. Dadurch, daß der Druck von Kammer zu Kammer nur wenig sinkt, ist die Dampfgeschwindigkeit überall mäßig.

Man kann die Druckstufenturbine so berechnen und bauen, daß der Dampf in allen Stufen die gleiche Geschwindigkeit hat, an jedes Laufrad die gleiche Arbeitsleistung abgibt. Der entscheidende Vorzug der Druckstufen gegenüber den Geschwindigkeitsstufen besteht darin, daß man unter Vermeidung der hohen Umdrehungszahlen der Laval-Turbine den günstigeren Wirkungsgrad der einkränzigen Räder erreicht. Bild 447 zeigt eine Druckstufenturbine mit 12 Stufen im Schnitt, Bild 448 die äußere Ansicht einer Turbine dieses Systems.

Die Unterschiede zwischen Geschwindigkeitsstufen und Druckstufen seien noch einmal zusammengefaßt. Bei der Anordnung der ersten Art ist der Dampfdruck beim Austritt aus den Zuführungsdüsen bereits bis zur Endspannung gesunken. Sein Druck ändert sich beim Weg durch das Gehäuse nicht mehr. In jedem Laufschaufelkrahz verschwindet nur ein Teil der Dampfgeschwindigkeit. Die Leitschaufeln bewirken nichts weiter als die passende Richtungsänderung. Bei der Anordnung der zweiten Art wird der Dampfdruck stufenweis verringert. In jedem Leitschaufelkranz findet ein Absinken des Drucks, eine Steigerung der Geschwindigkeit statt. Jeder Laufschaufelkranz zehrt die Eintrittsgeschwindigkeit fast völlig auf.

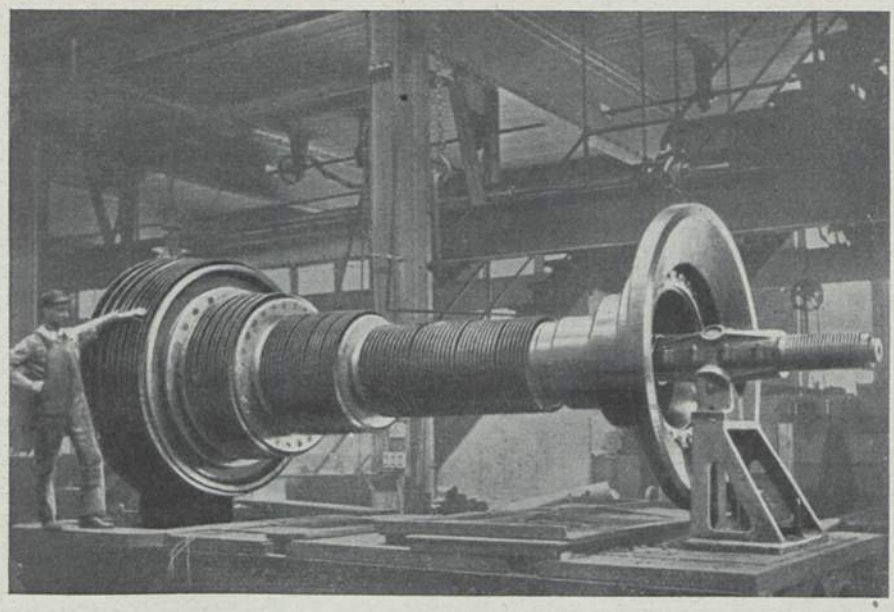
Zwischen den feststehenden Trennwänden der Druckstufenturbine und der durchtretenden Welle, auf der alle Laufräder sitzen, muß sich ein Spielraum befinden. Infolge der Druckunterschiede zwischen den Kammern hat der Dampf das Bestreben, hier durchzutreten, ohne Arbeit zu verrichten. Um das zu verhindern, werden in die Naben der festen Scheiben Ringe aus Messingblech eingesetzt, deren scharfe Enden die Welle beinahe berühren (Bild 449). Indem der Dampf sich durch die so entstehenden ganz schmalen Spalten hindurchquälen muß, wird sein Überdruck so weit hinabgemindert, daß eine fast vollkommene Absperrung der einzelnen Kammern eintritt.

Die Druckstufen-Turbine ist nun ein Gerät, das von der modernen Kraftmaschinen-Technik viel angewendet wird. Es entstehen besonders gute Verhältnisse, wenn man die Druckstufen mit Geschwindigkeitsstufen




450. Spaltverluste bei der Parsons-Turbine

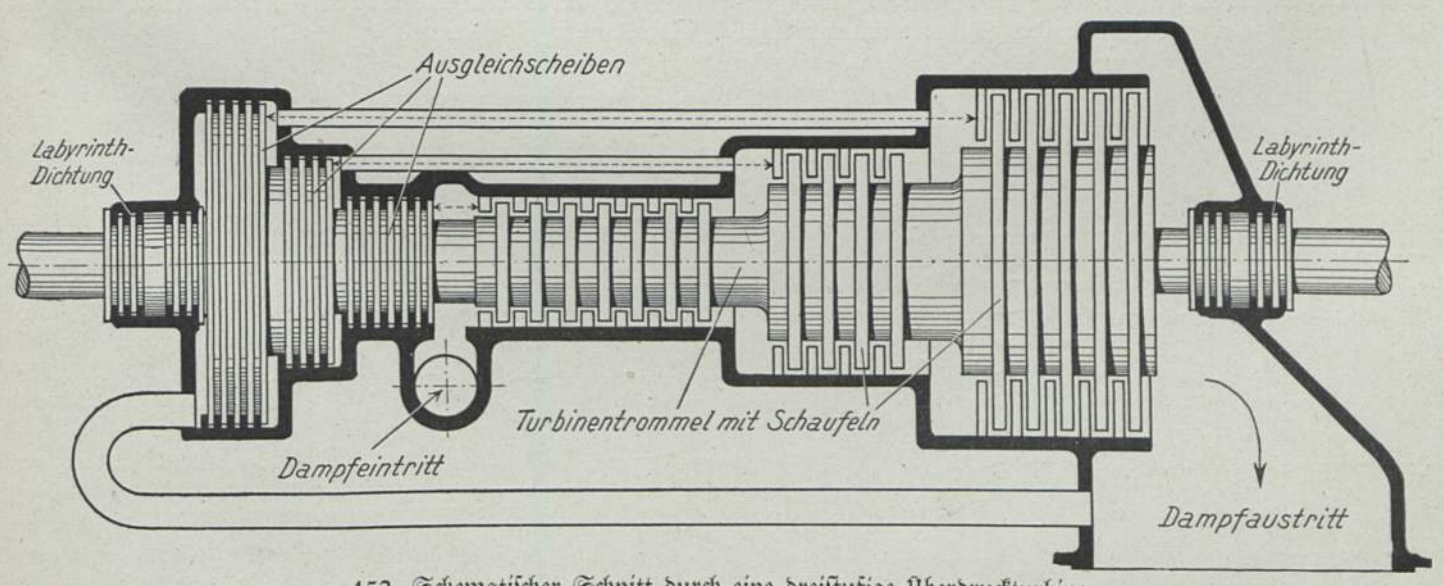
paart, indem den zahlreichen reinen Druckstufen ein Geschwindigkeits- oder Curtisrad vorgeschaltet wird. Zunächst spart man an Baulänge, da ein Curtisrad mehrere Druckstufen ersetzt. Allerdings wird der Nutzeffekt verschlechtert. Aber im Hauptteil des Gehäuses herrschen jetzt nur noch geringe Temperaturen, da bereits in der Vorstufe eine starke Entspannung des Dampfs stattgefunden hat. Seine Wärme nimmt ja entsprechend seiner Spannung ab, da der hohe Druck nichts anderes ist als das Äquivalent der im Kessel zugeführten Wärme. Durch die Vorschaltung des Curtisrads wird es möglich, sehr hoch überhitzten Dampf anzuwenden, ohne daß die große Zahl der Leit- und Laufschaufeln in den ersten Druckstufen durch hohe Drücke und hohe Temperaturen zu leiden haben. Die großen, für Einheitsleistungen von etwa 75 000 Pferdestärken von der AEG erbauten Turbinen des Goldenberg-Werks der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitäts-Werke sind solche Druckstufen-Maschinen mit vorgeschaltetem zweikränzigem Curtisrad (Tafel XVI). Sie waren vor wenigen Jahren noch die leistungsgrößten aller Kraftmaschinen.



451. Beschaufelte Trommel einer Parsons-Turbine

Bei allen bisher geschilderten Turbinengattungen sind die Dampfdrücke auf beiden Seiten jedes Laufrads stets gleich. Es findet in den Laufschaufelkränzen keine Änderung der Dampfspannung statt. Dies geschieht vielmehr, wenn überhaupt, nur in den Leitkränzen. Die uns bis jetzt bekannten Maschinen werden daher als Gleichdruck- oder Aktions-Turbinen bezeichnet. Nun gibt es aber auch eine Turbinenart, bei welcher der Dampfdruck nicht nur in den Leitschaufel-Kanälen, sondern auch innerhalb der Laufschaufeln gemindert wird. Die Laufschaufelkanäle verengen sich nach der Kondensatorseite hin. Es wächst beim Durchströmen die Geschwindigkeit des Dampfs; denn wenn durch einen engeren Querschnitt in gleicher Zeit ebensoviel Dampf hindurchtritt wie durch einen weiteren, so muß er in dem schmaleren Kanal rascher strömen. Der Druck aber nimmt entsprechend der Geschwindigkeitssteigerung ab. Hinter jedem Laufkranz ist der Dampfdruck geringer als zuvor.

So entsteht ein Überdruck auf den Vorderseiten der Laufkränze, weshalb solche Maschinen Überdruckturbinen heißen. Man nennt sie auch Reaktionsturbinen, weil in den Laufradkanälen nicht nur die Geschwindigkeit des Dampfs aufgezehrt wird, die er in den Leitschaufeln erhalten hat, sondern auch die Geschwindigkeitssteigerung, die er in den Laufschaufeln selbst gewinnt. Wie das Gewehr beim Abschuß zurückgestoßen wird, so werden auch die Laufschaufeln dieser Maschinen zusätzlich von dem Druck geschoben, der in den Laufradkanälen verschwindet, wo er sich in Arbeit umsetzt. Indem der Dampf durch seine Massenträgheit sich dagegen wehrt, eine höhere Geschwindigkeit anzunehmen, die doch erzwungen wird, übt er einen Rückdruck auf die Schaufeln aus. Das ist die Reaktionswirkung.




452. Schematischer Schnitt durch eine dreistufige Überdruckturbine

Der Druck des Dampfes auf die Schaufelkränze würde die ganze Trommel sehr stark gegen das rechte Lager pressen und dieses schädigen. Um diese Wirkung aufzuheben, trägt die Trommel links Ausgleichscheiben von gleichem Durchmesser und gleicher Anzahl wie die vorhandenen Stufen, auf die der Dampf, wie die gestrichelten Pfeile andeuten, in entgegengesetzter Richtung drückt

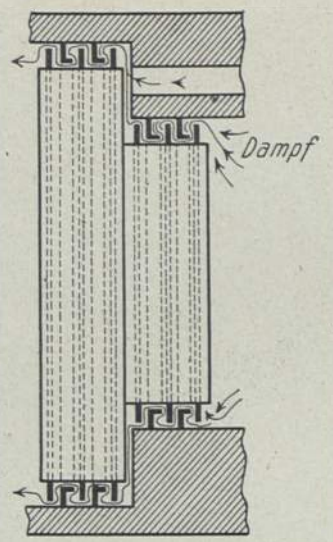
Durch Rückdruck allein wurde Herons Dampfkugel (Bild 281) in Drehung versetzt; die Aeolipile ist also die älteste Reaktionsturbine.

Der Engländer Charles Algernon Parsons führte im Jahre 1884 die Überdruckturbine in den praktischen Kraftmaschinenbau ein. Seine Konstruktion, die schematisch in Bild 452 dargestellt ist, entstand also zu gleicher Zeit mit Lavals Dampfrad. Während der Schwede aber nicht in großem Umfang durchzudringen vermochte, hatte der Engländer, nachdem man wohl ein Jahrzehnt lang sein Wirken mit Lächeln betrachtet hatte, schließlich einen durchschlagenden Erfolg. Parsons Turbine war die erste, die in ernsten Wettbewerb mit der Kolbenmaschine treten konnte. Sie hat einen ausgezeichneten Wirkungsgrad und kann mit günstigen Drehzahlen betrieben werden.

Es sind bei der Maschine stets sehr viele Druckstufen, im Mittel 40—60, hintereinandergeschaltet, da man, um große Schaufeln und dadurch geringe Schaltverluste zu erhalten, kleine Schaufelkranz-Durchmesser verwendet und jede Stufe nur ein geringes Druckgefälle verarbeiten läßt. Die Maschine wird deshalb sehr lang, die Zahl der Schaufeln ist erstaunlich groß. Bei Überdruck-Turbinen hoher Leistungen sind mehr als 50 000 dieser Dampfführungsorgane erforderlich. Die geringen Druckunterschiede zwischen den einzelnen Stufen machen aber die festen Scheidewände entbehrlich, zwischen denen, wie wir auf den Bildern 446 bis 449 und Tafel XVI gesehen haben, jedes einzelne Laufrad bei den Gleichdruck-Turbinen eingeschlossen ist. So ergibt sich ein vereinfachter, sehr eigentümlicher Aufbau für die Überdruck-Turbinen.

Die Laufschaufeln werden nicht auf einzelne Radscheiben gesetzt, sondern auf eine Trommel, einen Hohlzylinder, dessen äußerer Durchmesser ausreichend groß ist. Die Trommel wird durch angeflanschte Scheiben mit der Welle verbunden.

Theoretisch richtig wäre es, wenn die Schaufellängen nach der Kondensatorseite zu stetig zunähmen. Damit aber das Werkstück bequemer hergestellt werden kann, begnügt man sich oft damit, die Schaufeln gruppenweis länger werden zu lassen, und gelangt so zu einer Gestaltung der Trommel mit nur 4 bis 6 Absätzen (Bild 451); auf jedem Absatz sind die Schaufeln gleich lang. Die Leitschaufeln werden in das Gehäuse eingesetzt und enden kurz vor der Trommeloberfläche.



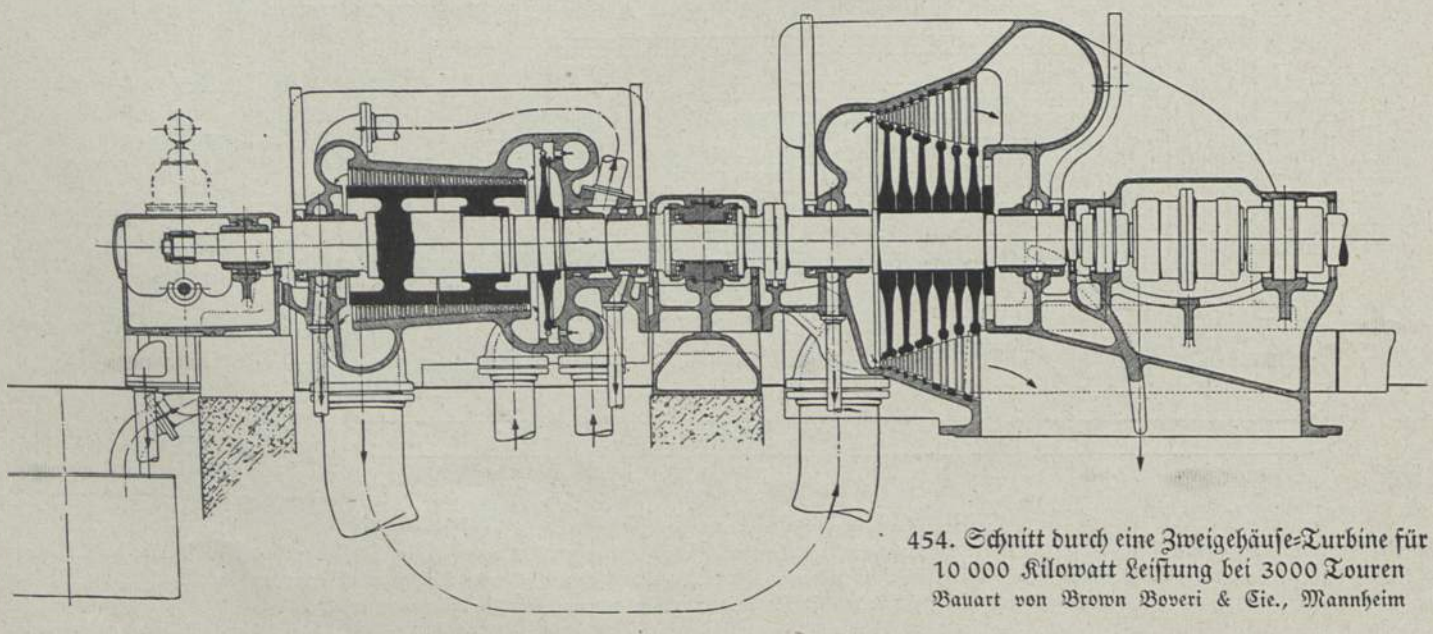

453. Ausgleichscheiben-Labyrinth

Während die Laufräder bei den Gleichdruck-Turbinen voll oder teilweis beaufschlagt werden können, muß bei der Parsons-Turbine stets volle Beaufschlagung stattfinden. Denn infolge des Druckabfalls in den Laufradkanälen würden bei nicht voller Erfüllung aller Querschnitte die aus den Einzeldüsen tretenden Dampfstrahlen auseinandergezogen werden und sich in dem ganzen Spalt zwischen Leitrad und Laufrad ausbreiten. Aus diesem Grund, weil teilweise Beaufschlagung nicht möglich ist, müssen die Laufschaufeln in den ersten Kränzen, wo der Dampf noch hohen Druck, also ein kleines Volumen besitzt, sehr kurz gehalten werden.

Hier tritt besonders stark eine störende Charaktereigenschaft der Überdruck-Turbinen hervor. Sie haben nämlich eine Dampfführung, die Anlaß zu starken Spaltverlusten gibt. Der Überdruck, der stets auf der Vorderseite jedes Laufkranzes gegenüber der Hinterseite herrscht, drückt den Dampf nicht nur durch die Schaufelkanäle, sondern auch um die Schaufeln herum, so wie die Pfeile auf Bild 450 es zeigen. Der Dampf, der hier durchdringt, leistet natürlich keine Arbeit.

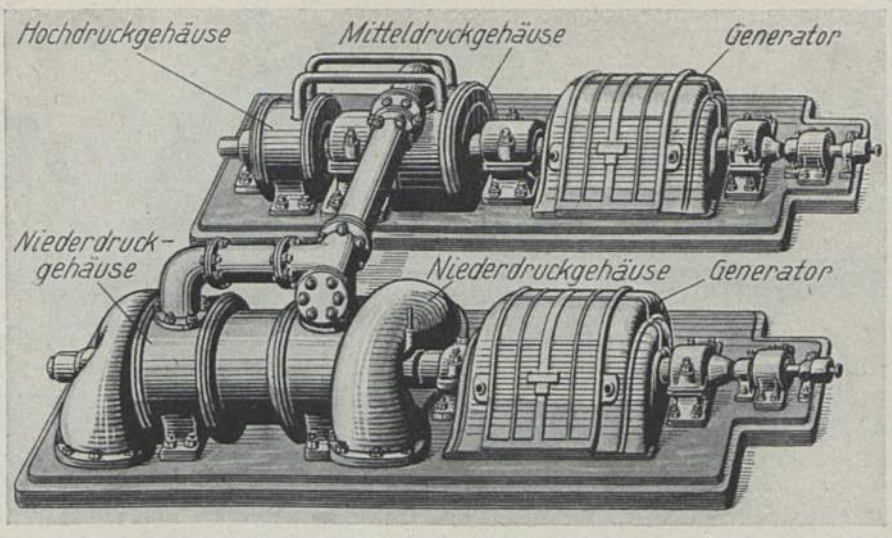
Um diesen Spaltverlust möglichst vollständig zu unterbinden, schreitet man neuerdings zu einer Maßnahme, die eigentlich als abenteuerlich bezeichnet werden muß. An dem ringförmig gebogenen Band, das an jedem Laufkranz die Schaufeln an ihren Enden umgibt und sie in gleichmäßigen Abständen voneinander hält (Bilder 473 und 474), ist in der Richtung zur Dampfeintrittseite ein ganz dünnes, ebenfalls ringförmiges Messingblech befestigt, das über den achsialen Spalt zwischen Laufkranz und davor liegendem Leitkranz hinübergreift, ihn fast vollständig zudeckend. Der auf Bild 450 durch Pfeile dargestellte Weg des Verlustdampfs wird damit auf seinem linken aufsteigenden Teil beinahe gänzlich abgeriegelt.

Damit die Spaltüberdeckung möglichst vollständig wird, ist folgendes vorgeschrieben:



454. Schnitt durch eine Zweigehäuse-Turbine für 10 000 Kilowatt Leistung bei 3000 Touren
Bauart von Brown Boveri & Cie., Mannheim

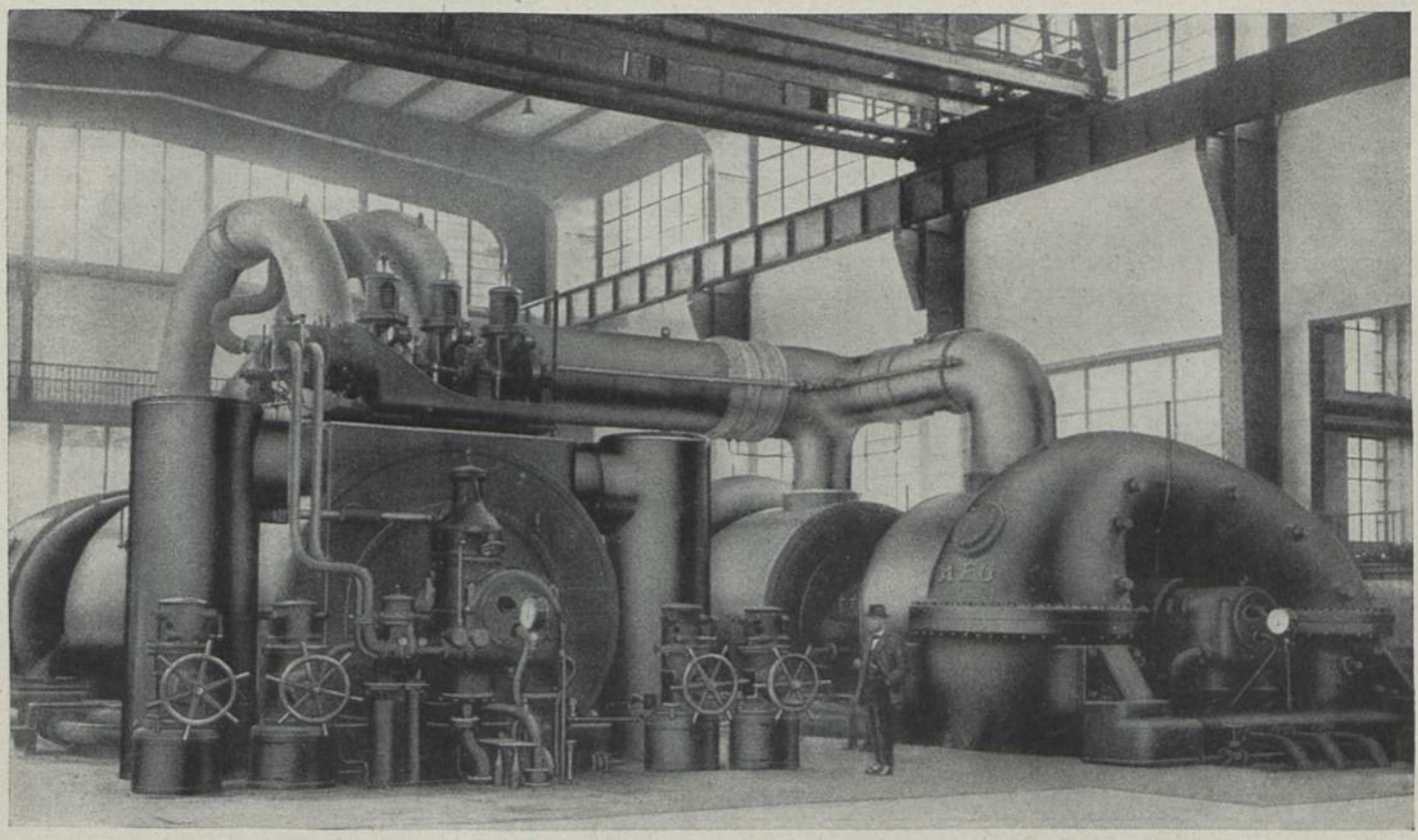
Gleich nach dem Anlassen der Turbine dreht der Wärter ein Handrad, durch das er die Hauptwelle der Maschine und damit die Trommel mit den Laufkränzen ganz sacht nach vorn, das heißt gegen die Strömungsrichtung des Dampfs, ziehen kann. Bald hört er ein pfeifendes Geräusch aus dem Gehäuse dringen. Nunmehr weiß er, daß die äußerst schmalen Ränder der sich mit den Laufkränzen drehenden Überdeckungsbleche an den Flanken der Leitschaufeln schleifen. Die axialen Spalten der Vorderseiten sind sämtlich vollständig zugedeckt. Jetzt dreht der Wärter das Handrad ein wenig zurück, bis das pfeifende Schleifgeräusch verschwindet. Um Bruchteile eines Millimeters nur sind die Axialspalten jetzt offen, das Auflaufen der sich drehenden Teile auf die stillstehenden hat aufgehört. Welch ein Wagnis, daß es überhaupt, wenn auch nur für den Bruchteil einer Minute, zugelassen werden kann! Denn die Trommel und damit die Deckbleche befinden sich ja in rasend schnellem Umlauf, in stürmischer Bewegung gegenüber den ruhenden Teilen der Maschine. Die Gesamtverschiebung der Hauptwelle beträgt im Höchstfall 1½ bis 2 Millimeter.




455. Dreigehäuse-Turbine auf zwei Wellen

Es wird ferner dafür gesorgt, daß die Abstände zwischen den Enden der Laufschaufeln und der Gehäusewand, sowie zwischen Leitschaufelenden und Trommelrücken, die Radialspalte, ganz gering sind. Auch hier darf der Spielraum nicht mehr als 2 bis 3 Millimeter betragen. Der Leser wolle sich überlegen, welche feinmechanische Hochleistung der Bau einer Parsons-Turbine darstellt, in deren Inneren sich die gewaltige Trommel mit vielleicht 50 000 Schaufeln rasend schnell zwischen ebensoviel stillstehenden Schaufeln dreht, nur durch zwei Wellenlager gehalten und doch gegen die kleinste radiale Verschiebung gesichert. Denn jede Abweichung um mehr als 2 Millimeter in dieser Richtung würde bereits die vollständige Zerstörung der Maschine herbeiführen.

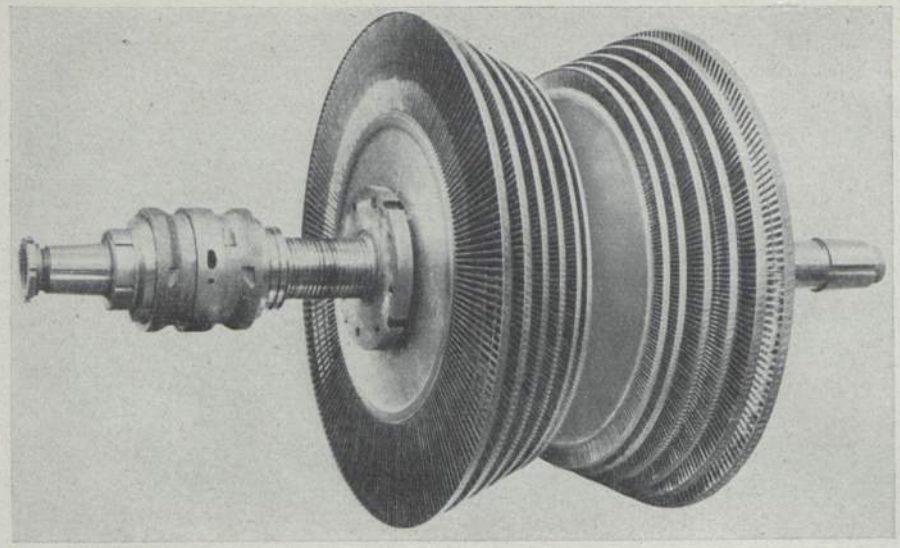
Der Überdruck, der überall in der Richtung von der Eintritt- zur Kondensatorseite hin wirkt, sucht die Trommel, indem er sich gegen deren Absätze und gegen die Laufschaufeln stemmt, ständig in dieser Richtung zu verschieben. Die Pressung



456. Dreigehäuse-Turbine auf zwei Wellen des Kraftwerks Klingenberg in Berlin-Rummelsburg
Dauerleistung: 48 000 Pferdestärken auf jeder Welle bei 1500 Touren. Ausführung der AEG, Berlin

ist sehr stark und muß beseitigt werden. Parsons hat das in sehr geistvoller Weise durch die Einführung von Ausgleichscheiben erreicht.

An der Eintrittsseite sind auf die Trommel ebensoviel Scheiben gesetzt, wie die Trommel Stufen hat. Die erste Scheibe hat den Durchmesser des letzten Schaufelkranzes, die zweite ist so groß wie die vorletzte Stufe usw. Es wird nun dafür gesorgt, daß auf die Hinterseite jeder Scheibe derselbe Dampfdruck wirkt wie auf die zugehörige Stufe. Das schematische Bild 452 läßt ohne weiteres erkennen, daß die Überdruckpressung auf die Trommel hierdurch aufgehoben wird. Denn der Druck wirkt nach beiden Richtungen in gleicher Stärke.



457. Doppelendige Niederdruckspindel einer Dreigehäuse-Turbine für 16 000 bis 20 000 Kilowatt Leistung
Brown Boveri & Cie., Mannheim

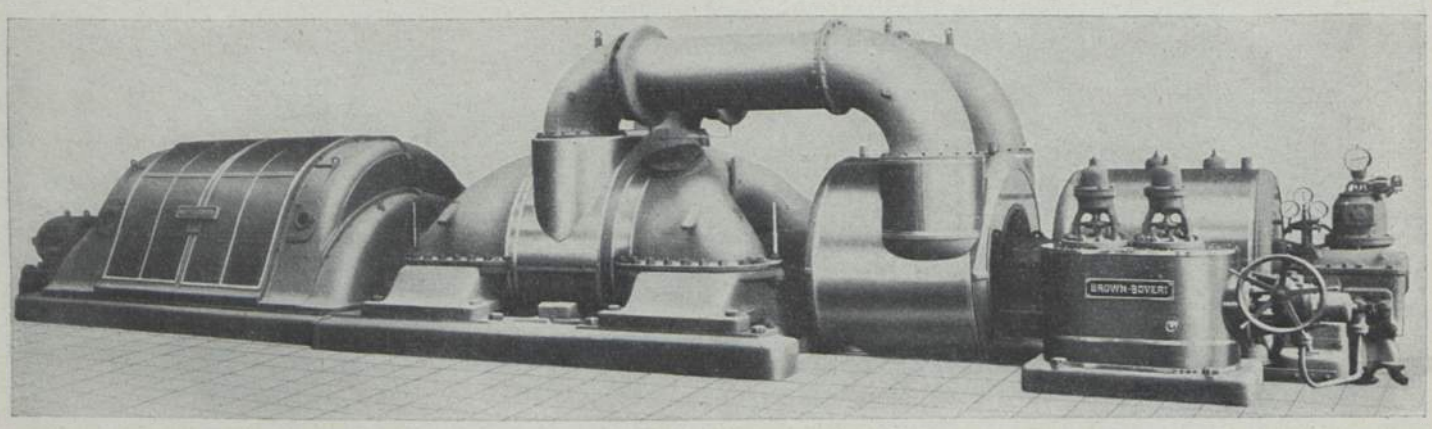
Die Scheibenränder müssen sehr sorgfältig gegen die Gehäusewand abgedichtet werden, und dies geschieht wie bei den Leitschaufelwänden der Druckstufenturbinen (Bild 449) wieder durch die Anbringung eines Labyrinths. Bild 453 zeigt eine andere, scharf wirkende Ausführungsform. Der Grundgedanke ist immer, den Dampf zu fortwährender Umkehr seiner Strömungsrichtung zu zwingen, so daß er Wirbel bildet, allmählich seine Kraft verliert, am Ende des Labyrinths nahezu tot ist.

In Deutschland wurden die ersten Parsons-Turbinen und damit die ersten Dampfturbinen überhaupt im Jahre 1898 in Betrieb genommen. Es waren zwei Maschinen von je 1500 Pferdestärken, welche die Stadt Elberfeld für ihr neues Elektrizitätswerk angeschafft hatte. Sie waren die größten Turbinen ihrer Zeit, und das Wagnis erregte allgemeines Aufsehen. Heute werden Dampfturbinen gleicher Leistung schon als Kleinmaschinen betrachtet.

Die Überdruckturbine für hohe Leistung, etwa 10—20 000 Pferdestärken, kann, besonders bei hohem Anfangsdruck, nicht mehr in einem einzigen Gehäuse untergebracht werden. Die Zahl der Stufen wird dann so groß und damit die Trommel so lang und so schwer, daß die Welle, wenn sie nur durch zwei Lager unterstützt wäre, in Gefahr käme, sich durchzubiegen. Man bildet daher zwei Gehäuse und zwei Trommeln aus und kuppelt die Wellen zu einem nun in drei Lagern laufenden Strang (Bild 454) zusammen. Hierdurch werden auch die Unterschiede der Temperaturen, die sich durch den Spannungsabfall des Dampfs in den vorderen und hinteren Teilen der Gehäuse ausbilden, geringer, da in jedem von ihnen nur Teilentspannungen stattfinden. Das Material der Gehäuse wird dadurch weniger beansprucht.

Wir sind damit zu der modernen Form der Großturbine gelangt, zu den Mehrgehäuse-Maschinen. Die gesamte Turbinen-Technik, in der noch vor zehn Jahren die Systeme einander heftig bekämpften, strebt immer mehr einer Vereinheitlichung zu. Die Großturbinen werden heute in allen Ländern der Erde und in allen Fabriken beinahe in gleicher Art gebaut.

Bevor wir diese Riesen-Dampfmaschinen, die größten aller Kraftlieferer, näher betrachten, sei hier eingeschaltet, daß die Angabe ihrer Leistungen nicht mehr in Pferdestärken, sondern in Kilowatt erfolgt. Kilowatt = 1000 Watt ist die in der Elektrotechnik übliche Bezeichnung der Leistungseinheit. Da die Großturbinen fast stets Dynamo-Maschinen drehen, also zur Erzeugung elektrischen Stroms dienen, haben sich die Turbinenbauer daran gewöhnt, die Leistungen ihrer Maschine im elektrischen Maßsystem anzugeben. Die Umrechnung ist recht einfach. 1 Pferdestärke entspricht einer Leistung von 75 Meter-Kilogramm in der Sekunde. 1 Kilowatt ist 102 Meterkilogramm in der Sekunde, folglich 1 Kilowatt (kW) = 1,36 Pferdestärken (PS) oder, rund gerechnet, 1 kW = 1⅓ PS. Ist die



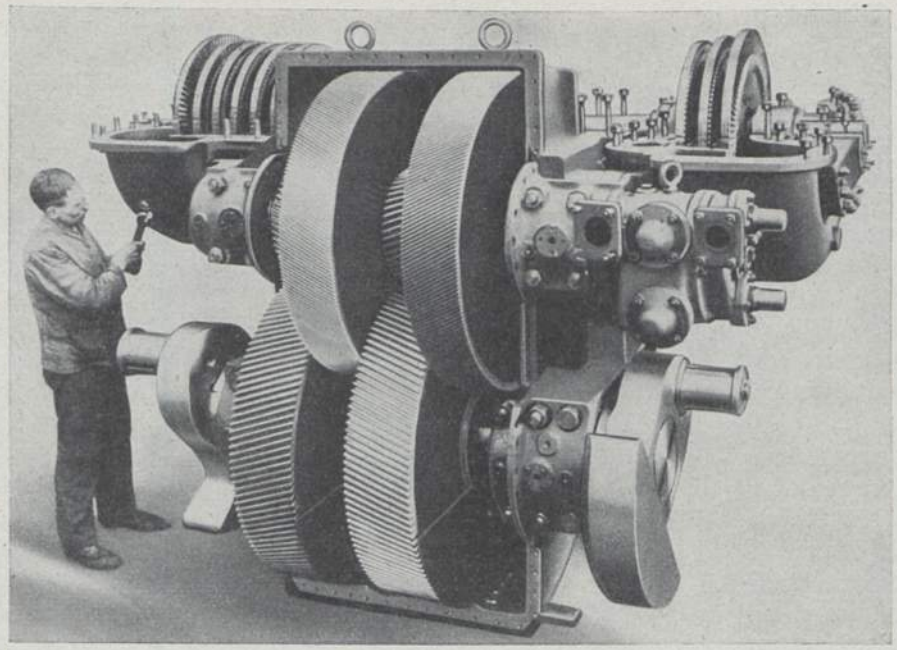

458. Dreigehäuse-Turbine für 16 000 bis 20 000 Kilowatt Leistung bei 3000 Touren
Tafel XVII zeigt die Innenansicht dieser Turbine. Bauart Brown Boveri & Cie., Mannheim

Dreigehäuse-Turbine für 16 000 bis 20 000 Kilowatt bei 3000 Touren. Das Oberteil des Gehäuses ist abgehoben

Ausführung der Brown Boveri & Cie., Mannheim

Leistung in Kilowatt ausgedrückt, so ergibt sich hieraus die Zahl der Pferdestärken, indem man ein Drittel hinzurechnet. Eine Maschine von 30 000 Kilowatt zum Beispiel leistet also rund 40 000 Pferdestärken.

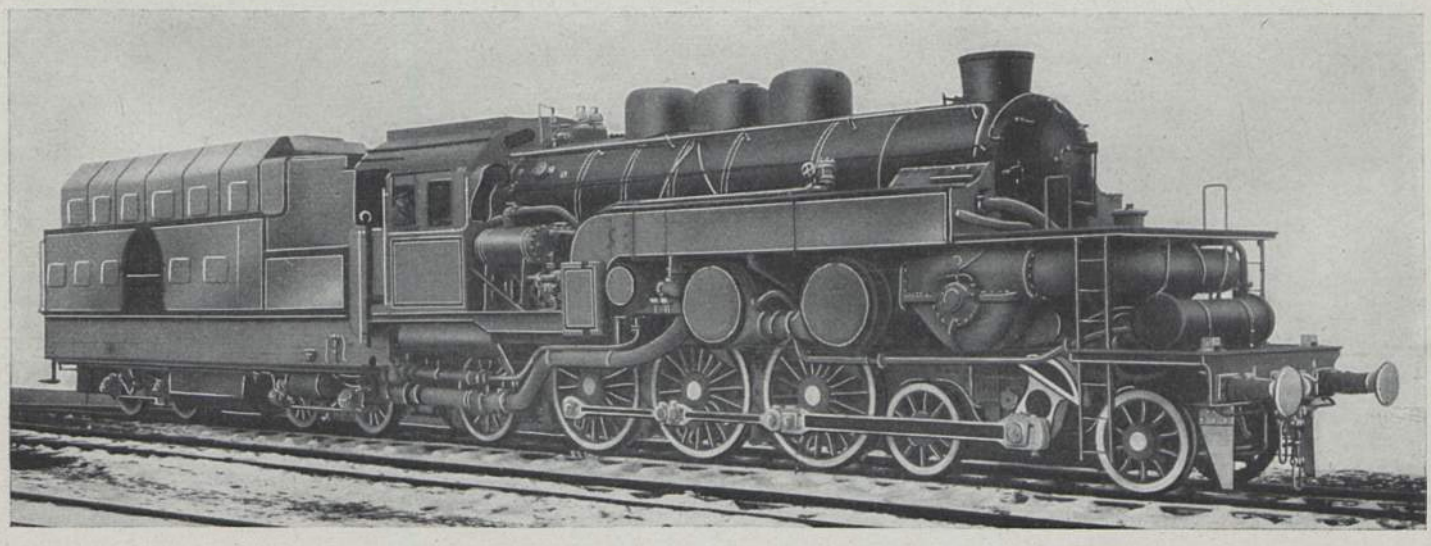
Das Kilowatt ist eine elektrisch ganz genau festgelegte, stets leicht durch Messung zu bestimmende Größe, während die Pferdestärke, wie auf Seite 97 auseinandergesetzt wurde, kaum mehr als eine übliche Redewendung ist. Der allgemeinen Einführung des Kilowatt als Leistungsbezeichnung im gesamten Maschinenbau, die angestrebt wird, steht die Tatsache entgegen, daß die meisten unter einem Kilowatt sich nicht recht etwas vorstellen können, während ihnen der Begriff der Pferdestärke aus langer Gewohnheit vertraut erscheint.



459. Geöffnete Turbine einer Turbo-Lokomotive mit dem Zahnradvorgelege
Friedr. Krupp A.-G., Essen

Die größten Turbinen haben drei Gehäuse. Die Trommeln sitzen entweder auf einer Welle oder auf zwei Wellen. Einwellige Maschinen (Bild 458 und Tafel XVII) dieser Art sind 30—40 Meter lang. In dem ersten, dem Hochdruck-Gehäuse, wird der Dampf von 35 Atmosphären Kesseldruck — es werden hier nur Durchschnittswerte angegeben — auf 15 Atmosphären entspannt, im Mitteldruckteil von 15 auf 3 Atmosphären, im Niederdruckteil von 3 Atmosphären auf die Kondensatorspannung von 0,05 Atmosphären. Für den Hochdruckteil werden stets Gleichdruck-Turbinen angewendet, weil sie auch bei kleinen Schaufellängen, wie sie hier günstig sind, vorteilhaft arbeiten. Den Druckstufen wird meist noch ein mehrkränziges Curtisrad vorgeschaltet. Die Überdruck-Turbine hat überall da einen besseren Wirkungsgrad, wo große Schaufellängen erforderlich sind, man verwendet sie daher stets im Mitteldruck- und im Niederdruckteil, wo die Dampfvolumina bereits stark angewachsen sind. Auch die Spaltverluste bleiben hier wegen der geringen Dampfspannungen niedrig.

Der Dampf wirkt auf alle Räder oder Trommeln so, daß er die Wellen, auf denen sie sitzen, nach der Kondensatorseite hin zu verschieben strebt. Schon bei eingehäusigen Turbinen wird dieser maschinentechnisch unangenehmen Erscheinung öfter entgegengetreten, indem man den Dampf nicht an dem einen Ende des Gehäuses eintreten läßt, sondern in der Mitte, wo er dann im Gegen- oder Doppelstrom (Bild 457 und Tafel XVII) nach beiden Seiten geführt wird. Auch hier ist dann bereits eine innere Zweiteilung der Turbine notwendig, da der Drehteil zweimal gestuft sein muß, von den in der Mitte liegenden Düsen aus nach jedem Gehäuseende zu. Bei der dreigehäusigen Turbine mit Einer Welle kann man es nun so einrichten, daß der Dampf im Hochdruckteil nach der einen, im Mitteldruck- und Niederdruckteil nach der anderen Seite strömt und die Schubkräfte der beiden entgegengesetzt gerichteten Dampfströmungen einander aufheben. Bei der Zweiwellen-Bauart, bei der öfter der mit Doppelstrom ausgerüstete Niederdruckteil allein auf die eine Welle arbeitet, Mitteldruck- und Hochdruck-Turbinen gemeinsam auf der zweiten Welle sitzen, trifft man die Anordnung so, daß Mittel- und Hochdruck-Turbinen Dampfgegenströme von



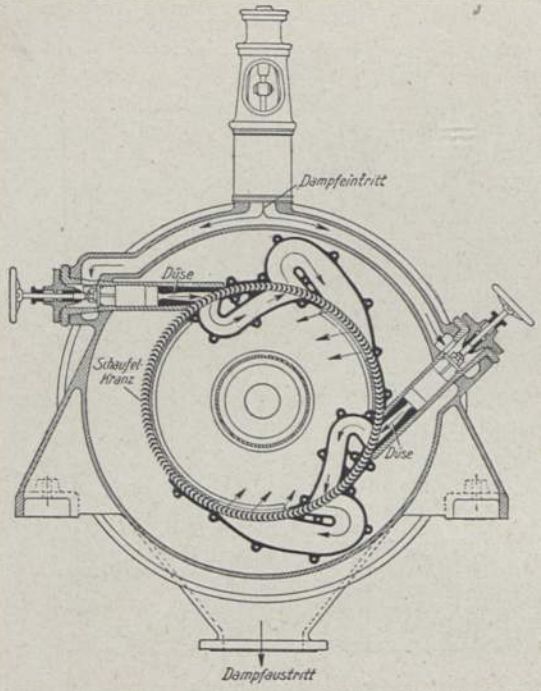
460. Erste deutsche Turbo-Lokomotive
Friedr. Krupp A.-G., Essen

sorgfältig abgeglichenen Schubkräften erhalten. Die Dampfströmung ist dann nach Bild 455 angeordnet.

Turbinen mit zwei Wellen treiben meist auch zwei Dynamo-Maschinen an. Hat eine Dynamo-Maschine Leistungen von über 30 000 kW zu erzeugen, so läßt man die Welle mit geringerer Drehzahl, meist mit 1500 Umdrehungen, laufen. Auch wenn im Niederdruckteil die Räder sehr groß und die Schaufeln sehr lang werden, ist es wegen der Fliehkräfte günstig, die Tourenzahl zu verringern.

Bei der größten bisher gebauten Turbinen-Einheit, einer der drei Maschinen (Bild 456) für das Riesenkraftwerk Klingenberg in Rummelsburg bei Berlin, erzeugen Hochdruck- und Mitteldruck-Teil auf der einen, die geteilte Niederdruck-Turbine auf der anderen Welle bei der gleichen Umlaufzahl von 1500 in der Minute eine Dauerleistung von je 48 000 Pferdestärken.

Man kann auch beide Wellen auf Eine Dynamo arbeiten lassen; dies geschieht jedoch nur bei kleineren Anlagen. Haben die Wellen verschiedene Drehzahlen, dann muß ein Zahnrad-Zwischengetriebe eingeschaltet werden. Das gleiche ist stets notwendig, wenn die Drehzahl der Turbine, wie es häufig geschieht, weit höher liegt als die Drehzahl der angetriebenen Maschine. Solche Zahnräder-Vorgelege (Bild 459) werden nun heute mit größter Vollendung ausgeführt.

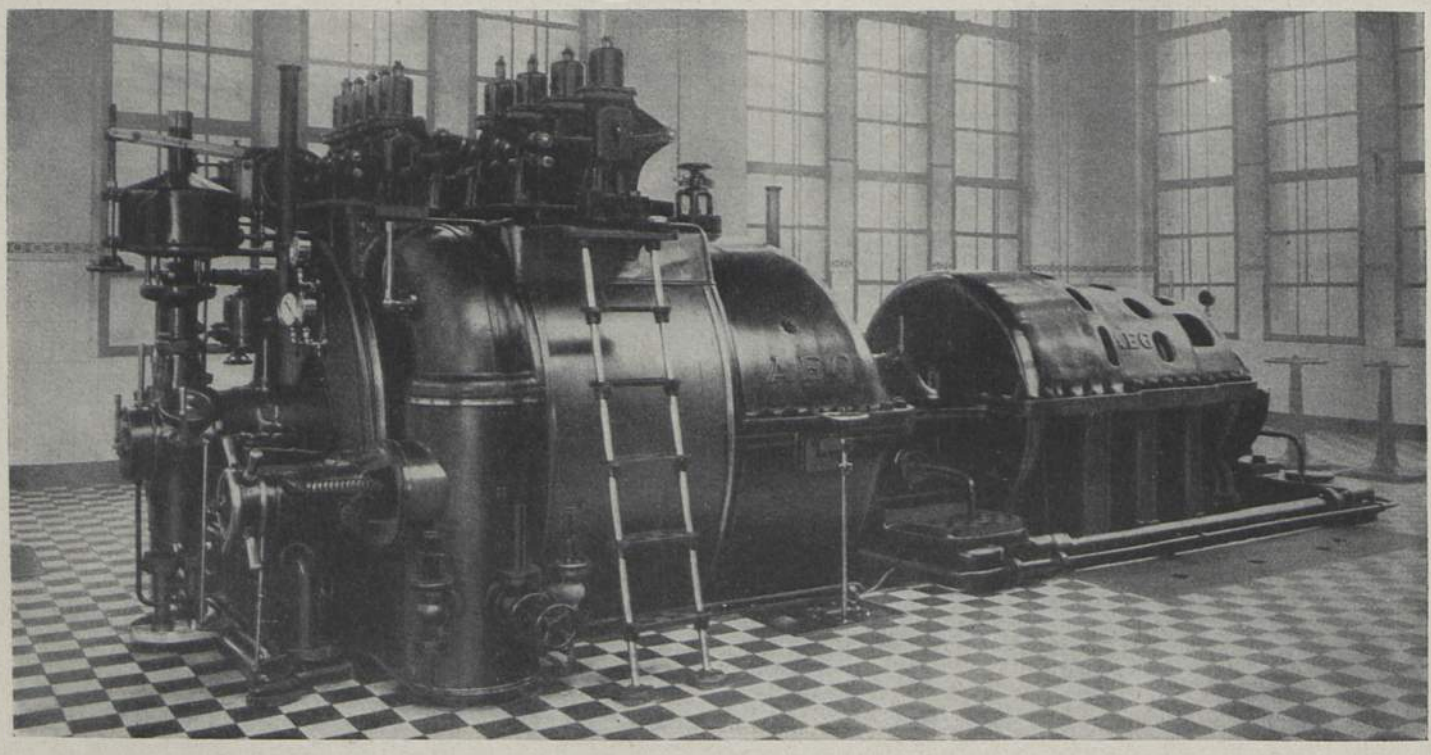



461. Schematischer Schnitt durch eine Radialturbine

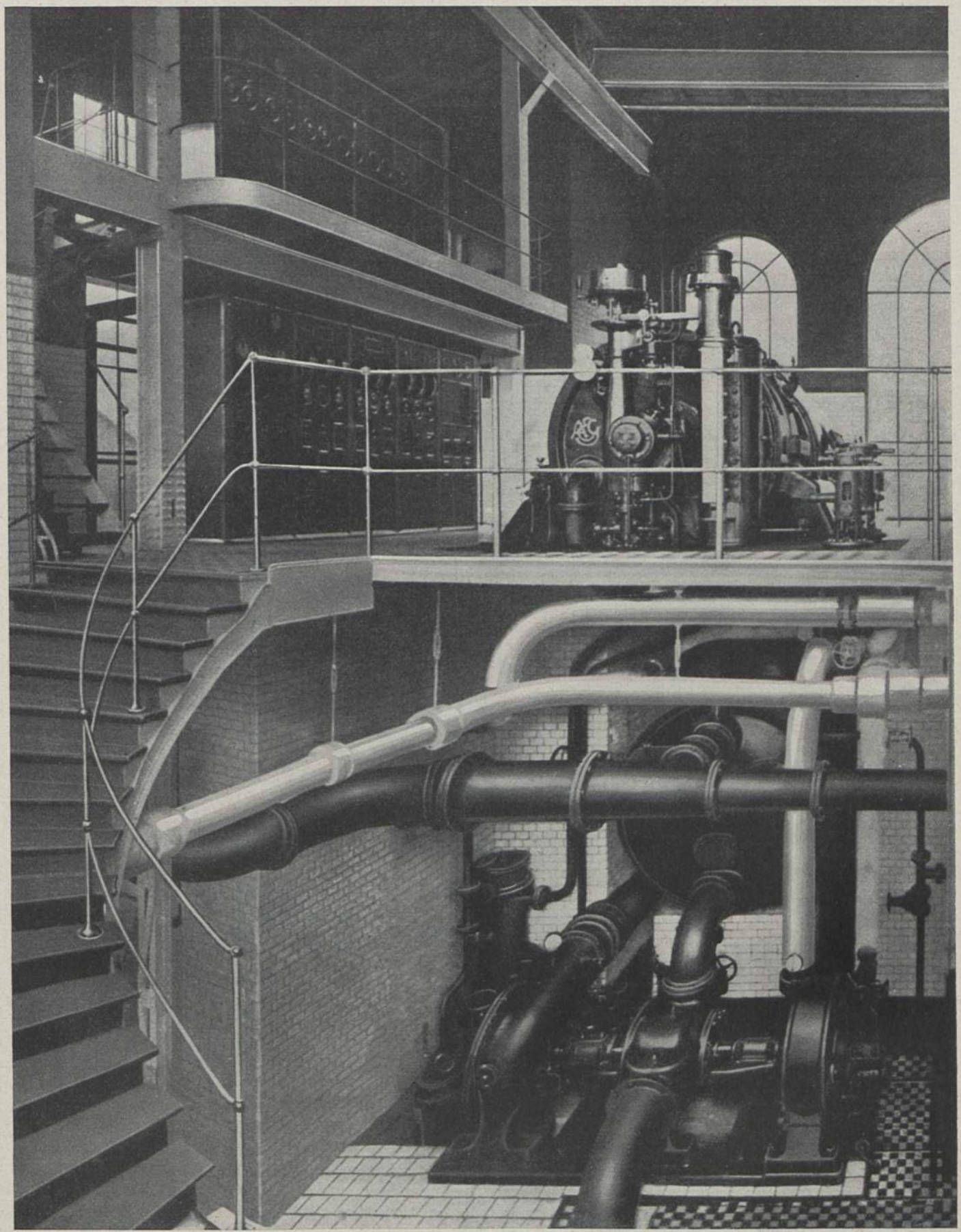
Die Laufschaufeln sind parallel zur Turbinenachse angeordnet, während sie zuvor immer wie die Speichen eines Rades auf dem Laufrad saßen. Der Dampf strömt ähnlich wie beim Peltonrad durch Düsen von außen gegen den Schaufelkranz. Nachdem er die Schaufeln passiert hat, lenken besondere Kanäle die Strömungsrichtung um, so daß noch eine zweite und dritte Beaufschlagung erfolgt

Die Verluste betragen, wenn die Übersetzung nur durch ein einziges Zahnradpaar ausgeführt wird, nicht mehr als 1 bis 2 vom Hundert. Dabei können sehr hohe Leistungen übertragen werden. Es sind bereits 16 000 Pferdestärken einem einzigen Getriebe aufgebürdet worden. Und auch das Übersetzungsverhältnis darf sehr groß sein. Der Raddampfer „Dordrecht", der auf dem Rhein fährt, hat eine Turbine als Antriebmaschine, und es erwuchs nun die Aufgabe, das ungleiche Paar, die flinke Turbinenwelle, die 3600 Umdrehungen in der Minute macht, und die sehr langsam laufende Radwelle zusammenzuspannen. Es wird mit bestem Erfolg ein Zwischengetriebe mit dem Übersetzungsverhältnis 1 : 100 benutzt.

Die vortreffliche Ausbildung der Zwischengetriebe für große Leistungen sowohl wie für hohe Übersetzungs-Verhältnisse hat dazu geführt, daß neuerdings die Schraubenwellen in Turbinen-Schiffen stets mit Zahnrad-Vorgelegen betrieben werden. Auf diese Art können die Turbinen mit der für sie günstigen hohen Drehzahl laufen, während die Schrauben langsam gehen, was ihrem Wirkungsgrad sehr förderlich ist. Die Schiffe der „Imperator"-Klasse, die in den letzten Jahren vor dem Krieg in Deutschland gebaut wurden, haben noch unmittelbaren Schraubenantrieb, wodurch der Gesamt-Nutzeffekt der einzelnen Anlagen stark gemindert ist. Die Maschinen sind in der Überdruck-Bauart ausgeführt,




462. Frischdampf-Abdampf-Turbine (links) als Antriebmaschine für einen Kompressor (rechts)
Bauart der AEG, Berlin



463. Kondensations-Anlage für eine Turbo-Dynamo

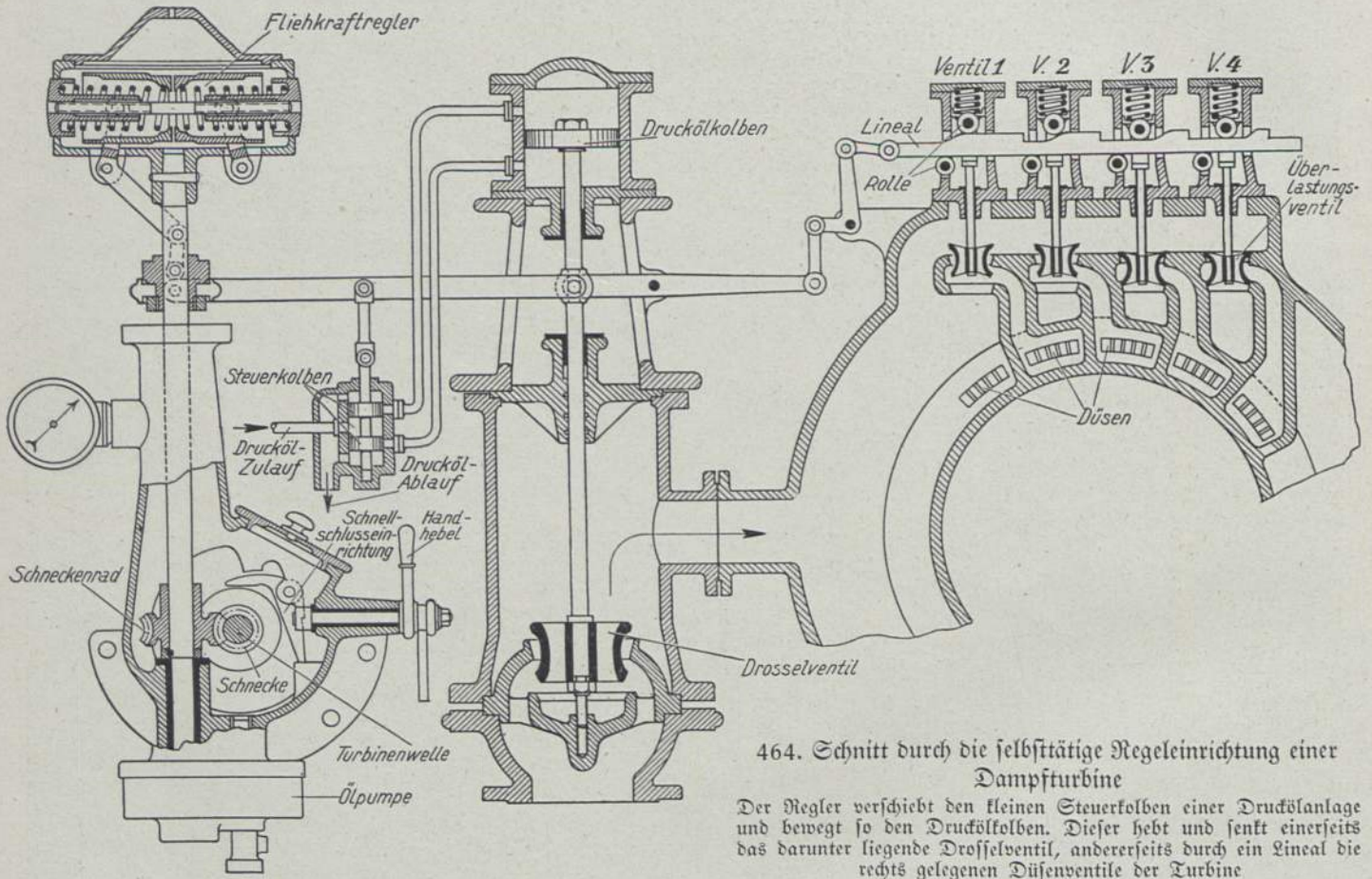
Oben: Turbo-Dynamo. Unten: Im Hintergrund der Oberflächen-Kondensator, im Vordergrund die Hilfsmaschinen: links: Kondensat- und Luftpumpe, in der Mitte: Kühlwasserpumpe, rechts: Antriebturbine. AEG, Berlin

und diese wird auch heute noch bei schwimmenden Kraftanlagen für kleinere und mittlere Leistungen allein verwendet. Die ganz großen Schiffsturbinen-Einheiten aber werden in der Dampfführung gerade so ausgebildet wie die ortfesten Kraftlieferer. Als Rückwärts-Turbinen, die ja stets notwendig sind, wendet man oft Curtis-Räder an, da hierdurch ein sehr einfacher Aufbau entsteht. Der geringe Wirkungsgrad kommt wegen der kurzen Gebrauchszeiten nicht in Betracht.

Als eine völlig neue Erscheinung für Deutschland trat auf der Eisenbahntechnischen Ausstellung zu Seddin im Herbst 1924 die Turbo-Lokomotive auf. Der Schwede Ljungström hat als erster versucht, die Turbine als Lokomotiv-Maschine zu verwenden. Ihm folgte die Firma Friedr. Krupp in Essen, die unter Benutzung von Patenten des Schweizers Zoelly eine eigene Bauart schuf.

Vakuums für den abströmenden Dampf so große Vorteile, daß die recht verwickelte, hierzu erforderliche Zusatz-Anordnung eines Kondensators in Kauf genommen werden muß.

Da das Speisewasser und der daraus bereitete Dampf in einem geschlossenen System — Kesselraum, Turbine, Kondensatorraum und wieder zurück — umlaufen, so ist eine Ergänzung des einmal eingenommenen Speisewassers nicht notwendig, da kein Tropfen davon verloren geht. Kesselsteinbildung tritt fast gar nicht ein, weil ja immer das gleiche Wasser benutzt wird; der Kessel braucht also nur sehr selten ausgewaschen zu werden. Das vom Speisewasser völlig gesonderte Kühlwasser wird, nachdem es sich in den Kondensatorröhren erwärmt hat, durch eine besondere Pumpe in Röhren gedrückt, die dicht unter dem Dach des Tenders liegen. Sie sind durchlöchert und lassen




464. Schnitt durch die selbsttätige Regeleinrichtung einer Dampfturbine

Der Regler verschiebt den kleinen Steuerkolben einer Druckölanlage und bewegt so den Druckölkolben. Dieser hebt und senkt einerseits das darunter liegende Drosselventil, andererseits durch ein Lineal die rechts gelegenen Düsenventile der Turbine

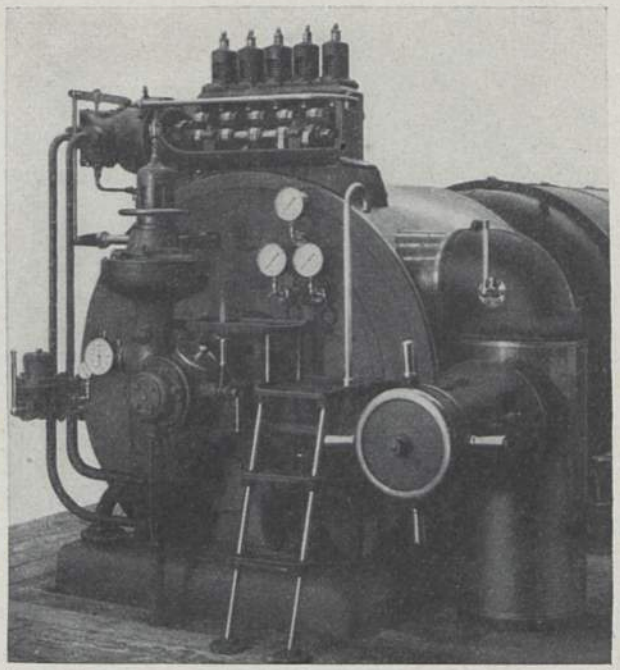
Die auf Bild 460 dargestellte Turbo-Lokomotive von Krupp weicht in den äußeren Formen weniger von dem Gewohnten ab, als man vermuten sollte. Der Dampfkessel ist fast völlig in der alten Form erhalten geblieben. Es fehlen aber selbstverständlich die Zylinder. An ihrer Stelle liegen ganz vorn unter der Rauchkammer zwei Turbinen, von denen das Bild die eine als runde Kapsel erkennen läßt. Man braucht je eine Turbine für Vorwärts- und für Rückwärtsfahrt, da die Dampfmaschinen dieser Art sich ja nicht umsteuern lassen. Die Krupp-Zoelly-Turbinen machen 6000 bis 8000 Umdrehungen in der Minute. Da die Treibräder der Lokomotive eine sehr viel geringere Umdrehungszahl haben, bei voller Fahrt 300 in der Minute, so ist ein verlangsamendes Zahnrädergetriebe (Bild 459) zwischen Turbinenwelle und Hauptkurbelwelle geschaltet, die ganz vorn liegt. Die Turbo-Lokomotive arbeitet nicht wie alle ihre Genossen, die von Kolbenmaschinen angetrieben werden, mit Auspuff, vielmehr bietet hier die Bereitung eines hohen

das Wasser an beiden Seiten des Tenderaufbaus hinuntertropfen. Der Fahrtwind sowie der Luftstrom eines am Tenderboden aufgestellten Ventilators blasen dagegen, so daß die Flüssigkeit, wenn sie in einen Auffang-Behälter gelangt ist, eine sehr lebhafte Abkühlung erfahren hat. Der Tenderaufbau ersetzt also den Kühlturm der ortfesten Anlage. Es ist nicht zu vermeiden, daß ein Teil des Kühlwassers sich immer wieder verflüchtigt, so daß hier öfter Nachfüllung erfolgen muß.

Da der Kesseldampf nicht mehr durch den Schornstein ausströmt, so fällt die Blaswirkung fort, die der Auspuff bei den Lokomotiven mit Kolbenmaschinen verursacht, und die zum Anfachen des Kesselfeuers dient (Band II, Seite 209). Es ist deshalb ein zweiter Ventilator zur Erzeugung künstlichen Zugs vorgesehen. Die Turbo-Lokomotive kann wegen des geschlossenen Dampfgangs auch keinen Dampf für die Heizung des Zugs abgeben. Hierfür muß daher ein besonderer kleiner Heizkessel angebracht sein, dessen Wände von den heißen Rauchgasen im

Rundkessel umspült werden. Der Heizdampf wird dem Dom entnommen, der hinter dem Hauptdampfdom und dem Streusandbehälter auf dem Rücken des Rundkessels steht.

Obgleich diese Beschreibung den Bau der Turbo-Lokomotive recht verwickelt erscheinen läßt, ist es doch gelungen, die Konstruktion übersichtlich zu halten und die Bedienung ausreichend bequem zu machen. Wärmetechnisch wurde ein großer Fortschritt erzielt, da die Turbo-Lokomotive für die gleiche Leistung höchstens $^4/_5$ der Kohlenmenge verbraucht, welche die Kolbenmaschine hierfür aufzehrt. Die Krupp-Lokomotive, die bereits viele Betriebsfahrten mit Geschwindigkeiten bis zu 105 Kilometern in der Stunde mit bestem Gelingen zurückgelegt hat, leistet 2000 Pferdestärken. Auch die Firma J. A. Maffei in München hat eine vielversprechende Konstruktion einer Lokomotive mit Turboantrieb ausgeführt.



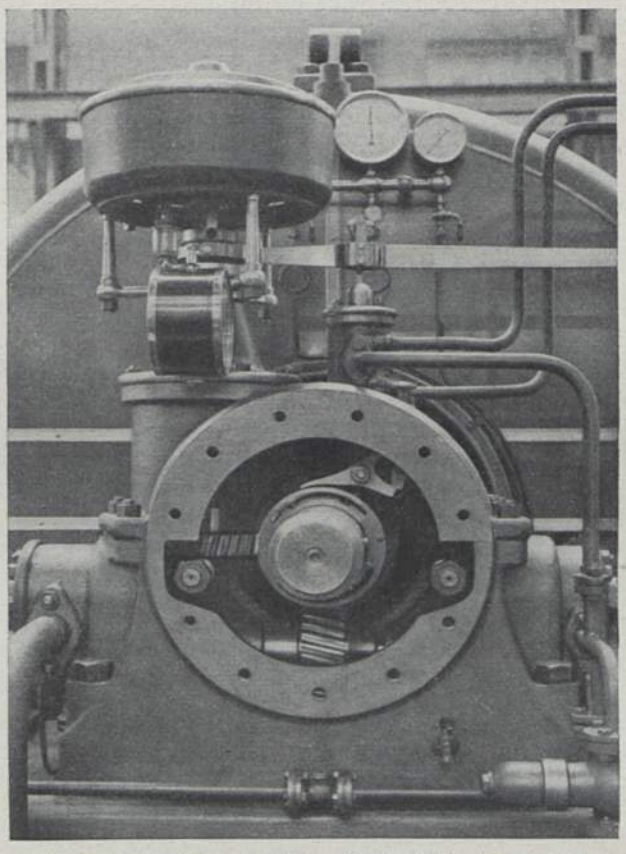
465. Gegendruck-Turbine mit Nockenregelung
Unter den Düsenventilen läuft eine Nockenwelle, die durch den Regler gedreht wird und das Öffnen und Schließen der Ventile besorgt. AEG, Berlin

Die Dampfturbine, so großartig ihr Aufbau und ihre Wirkungen sind, ist dennoch eine genügsame Maschine. Während ihre mit hin und her gehenden Kolben ausgerüstete Schwester für größere Leistungen stets hohe Dampfspannungen nötig hat, wenn sie nicht unwirtschaftlich arbeiten soll, kann die Turbine auch bei geringem Eintrittsdruck Hervorragendes leisten. Denn das tiefe, für sie stets erzeugte Vakuum schafft ja auch dann noch ein ausreichendes Wärmegefälle. Desgleichen vermag unsere Maschine in besonderen Fällen selbst bei nicht sehr hoher Eintrittsspannung ohne Kondensator auszukommen. Auf Grund dieser Tatsachen werden heute sehr häufig Turbinen von vier besonderen Bauarten angewendet, die treffliche Wirkungen ergeben.

Wenn eine Fabrik, die zum Beispiel elektromotorischen Antrieb mit Anschluß an das Ortsnetz verwendet, große Mengen von Koch- oder Heizdampf braucht, so kann sie diesen mit der erforderlichen geringen Spannung von Einer Atmosphäre und weniger in einem Niederdruckdampfkessel erzeugen. Nun ist aber — wir haben das bereits gehört und werden es im nächsten Abschnitt weiter erörtern — ein sehr großer Wärmeaufwand notwendig, um Wasser zu verdampfen. Es bedarf jedoch nur einer geringen Steigerung der Wärmezufuhr, um höhere Spannungen hervorzurufen. Betreibt man daher einen Hochdruckkessel und nutzt die überschüssige Spannung in einer Kraftmaschine aus, so erhält man einen beträchtlichen Gewinn. Der Koch- oder Heizdampf stellt sich alsdann sehr viel billiger.

Für die nutzbringende Drosselung der überschüssigen Spannung aus dem Hochdruckkessel ist nun die Turbine hervorragend geeignet. Man läßt den Dampf mit erheblichem Druck in ihr Gehäuse eintreten, wendet aber keine Kondensation, sondern Auspuff an. Der austretende Dampf ist alsdann bis zu einer Atmosphäre entspannt. Da hierdurch am Ende der Turbine ein Gegendruck entsteht — denn bei Anwendung eines Kondensators würde die Endspannung ja nur etwa $^1/_{20}$ Atmosphäre betragen — werden diese Maschinen Gegendruckturbinen genannt.

Wenn der Abdampfbedarf der Fabrik nicht groß genug ist, um die ganze Auspuffmenge zu verbrauchen, dann wird nach wie vor mit Kondensation gearbeitet und die Entnahmeröhre in einer mittleren Stufe der Turbine angelegt, dort wo der Dampf gerade die gewünschte Pressung hat. Es findet Zwischendampfentnahme gerade wie manchmal bei den Verbund-Kolbenmaschinen statt (Seite 245). Der Rest des Dampfs arbeitet bei einer solchen Anzapfturbine im Niederdruckteil weiter bis zum Eintritt in den Vakuumraum.



466. Achsenregler der Schnellschluß-Einrichtung einer Zoelly-Turbine
Bauart von Escher Wyß & Cie., Zürich

Auf Seite 235 wurde bereits dargelegt, daß Kondensationsanlagen für Maschinen, die häufig stillgesetzt werden, nur dann nutzvoll eingerichtet werden können, wenn es möglich ist, für eine größere Anzahl von ihnen eine gemeinschaftliche Zentral-Vakuumanlage zu schaffen. Befinden sich in einem Hütten- oder Eisenwerk nur wenige der großen Förder- oder Walzenzug-Maschinen, die mit zahlreichen Unterbrechungen arbeiten, dann stellt sich der Auspuffbetrieb billiger. Die nun in die freie Luft austretenden erheblichen Dampfmengen haben aber noch immer eine beträchtliche Spannung, und es bedeutet eine

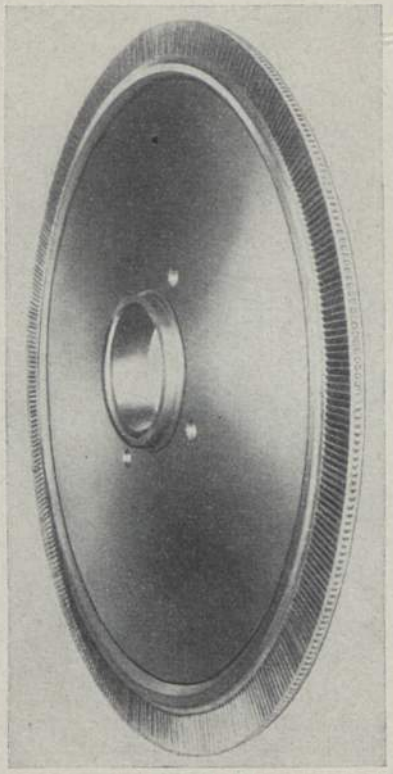
Verschwendung, die ihnen verbliebene Wärme einfach verloren gehen zu lassen. Die Turbine mit ihrem sehr hohen Vakuum gestattet, solchen Abdampf weiter zu nutzen, indem man ihn einer Niederdruck-Maschine zuführt.

Die Beaufschlagungsmengen strömen einer solchen Turbine aber nicht gleichmäßig und zeitweise auch nicht in ausreichender Menge zu, da der Betrieb der abgebenden Kolbenmaschinen natürlich keine Rücksicht auf den Bedarf der Turbine nehmen kann. Es ist deshalb notwendig, einen Zwischenbehälter einzuschalten.

In diesem wird innerhalb eines gewissen Spielraums der Druck des Dampfs, welcher der Turbine zufließt, immer gleichgehalten. Damit er jedoch unter keinen Umständen zu hoch oder zu niedrig werden kann, sorgt ein selbsttätiges Ventil dafür, daß beim Anfall sehr großer Dampfmengen eine Austrittöffnung in die Atmosphäre freigegeben wird, bei Dampfmangel Zufuhr unmittelbar vom Kessel her stattfindet.

Wenn es sicher ist, daß ausreichende Abdampfmengen nur während eines Teils der Werkstunden zur Verfügung stehen werden, indes geraume Zeit über ein solcher Zustrom ausbleibt, dann richtet man eine Zweidruckturbine (Bild 462) ein. Sie besteht aus einem Hochdruck- und einem Niederdruckteil, die durch eine Zwischenwandung voneinander getrennt sind. Die erste Abteilung wird mit Frischdampf aus dem Kessel versorgt, die zweite nutzt allein den Abdampf aus. Fällt dieser in genügender Menge an, so arbeitet nur der Niederdruckteil der Maschine. Kann die Turbinenhälfte aber die erforderliche Leistung nicht mehr schaffen, so öffnet sich wiederum selbsttätig ein Ventil, das genügende Beaufschlagung des Hochdruckteils aus dem Kessel bewirkt.

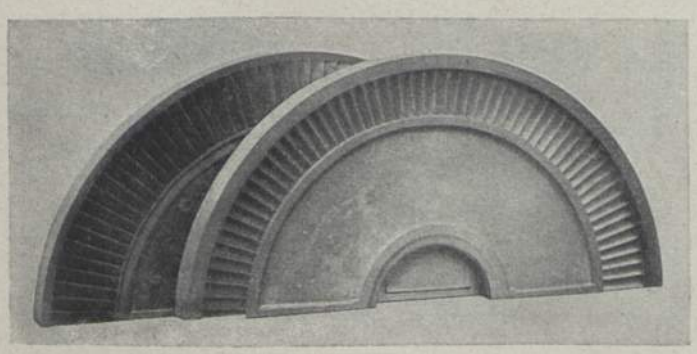
An dieser Stelle sei noch eine recht seltsame Art der Dampfführung erwähnt, die neuerdings bei Großturbinen mit mehreren Gehäusen stattfindet. Der Kesseldampf, wenn er auf 35 Atmosphären gespannt ist, hat in diesem Zustand bereits an sich eine Temperatur von 300 Grad. Dies ist seine Sattdampf-Temperatur, das heißt, sobald seine Spannung nur ein wenig unter 300 Grad sinkt, verwandelt er sich sofort zu einem Teil in Wasser. Die Überhitzung kann jedoch über 400 Grad nicht gesteigert werden, weil das Material der Überhitzer-Röhren eine stärkere Beanspruchung nicht aushält. Am Ende des Hochdruckteils der Großturbine ist die Spannung des Dampfs und damit seine Temperatur meist schon so weit erniedrigt, daß aus dem überhitzten Trockendampf Naßdampf geworden ist. Man kann den Dampf in diesem Zustand nun nicht ohne weiteres in den Mitteldruck- und Niederdruckteil einlassen, weil Naßdampf keine sichere Betriebsführung gestattet. Deshalb wird der Dampf am Ende des Hochdruckteils von der Maschine hinweg zum Kessel zurückgeführt, wo er noch einmal Überhitzer-Schlangen durchläuft und hierauf erst in das Mitteldruck-Gehäuse eingeleitet wird. Das Röhrensystem, das für diese Zwischenüberhitzung vorgesehen sein muß, ist keine angenehme Beigabe zur Großturbine, aber die Einwirkung wirtschaftlicher Dampfausnutzung und zuverlässiger Betriebsführung macht es manchmal ratsam.



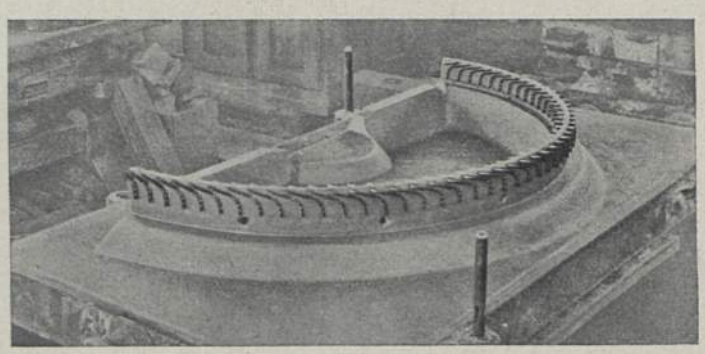
467. Laufrad einer Curtis-Turbine
AEG, Berlin

Es ist nicht notwendig, daß für die Zwischenüberhitzung immer der Kessel aufgesucht werden muß. Hie und da genügt es, den Abdampf der Hochdruckmaschine durch deren eigene erste Stufe zu leiten. Die hohe Temperatur des hierin enthaltenen Dampfs, der die Röhren des eingebauten Zwischenüberhitzers umspült, reicht aus, um die Trocknung vorzunehmen.

Sehr viel verbreiteter als die Zwischenüberhitzung ist noch ein anderes Mittel, die in den Dampf hineingesteckte Wärme auszunutzen. Bei einer gewöhnlichen Auspuffmaschine geht der gesamte Wärmeinhalt des ins Freie gehenden Dampfes von etwa einer Atmosphäre verloren. Daher ordnet man bekanntlich einen Kondensator hinter der Maschine an und erreicht so, daß der Dampf beim weiteren Entspannen noch mehr Arbeit leistet. Gleichzeitig hat man den Vorteil, daß man das reine Kondensat in den Kessel zurückspeisen kann, während man bei der Auspuffmaschine erst Frischwasser umständlich reinigen muß, um es dann in den Kessel zu pumpen. Aber auch beim Kondensationsbetrieb muß man dem in den Kondensator eintretenden Dampf die Verdampfungswärme entziehen, um ihn in Wasser zu verwandeln. Diese Wärmemenge geht an das Kühlwasser über und ist so für den Speisewasserkreislauf verloren. Um diesen Verlust, der die Ausnutzung der von der Kohle erzeugten Wärme auf weit unter 40 Prozent drückt und so immer noch das Hauptübel der ganzen Wärmewirtschaft von



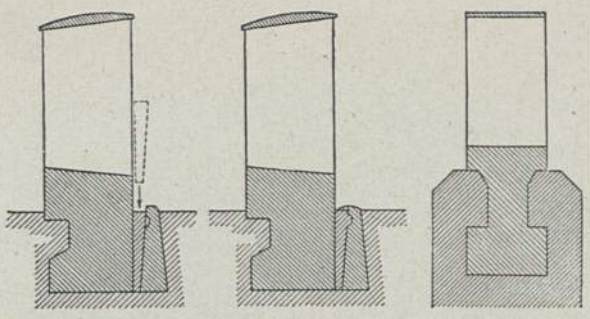
468. Leiträder einer Zoelly-Turbine



469. Unterteil der Gießform für ein Leitrad

Ausführung von Escher Wyß & Cie., Zürich

Dampfkraftanlagen darstellt, zu vermindern, verfiel man auf folgenden Gedanken. Man zapft an einer oder mehreren Stellen der Turbine gewisse Dampfmengen ab und führt diese nacheinander mit dem Kondensat zusammen. Sie kondensieren dabei und erwärmen dadurch das Wasser, das für sie die Rolle des Kühlwassers übernimmt, jedoch die übernommene Wärme nicht unausnutzbar macht, sondern wieder in den Kessel mitnimmt. Man kann hierdurch eine Kohlenersparnis bis zu sieben Prozent erzielen und hat auch noch den Vorteil, daß in den letzten Stufen der Turbine die Dampfmenge kleiner ist, so daß die gefährliche Länge der letzten Schaufeln herabgemindert wird.

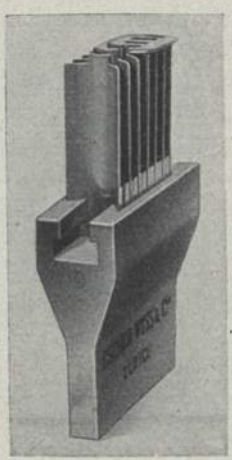


470. Links: Laufschaufelbefestigung mittels Keile (Melms & Pfenninger, München). Rechts: Laufschaufelfuß in Hammerkopfform (AEG, Berlin)

Zu erwähnen sind noch die Radial-Turbinen, die allerdings im modernen Dampfturbinenbau keine große Rolle mehr spielen. Sie werden nach den gleichen Gesetzen angetrieben wie die bisher besprochenen Arial-Turbinen. Während jedoch bei diesen die Schaufeln radial an den Rädern angebracht sind und der Dampf sie in der Richtung parallel zur Achse durchströmt, stehen hier die Schaufeln parallel zur Achse, und die Dampfströmung ist radial von außen nach der Welle hin oder umgekehrt gerichtet (Bild 461).

*

In jeder Turbine strömt der Dampf, nachdem er alle Räder beaufschlagt hat, einem Raum am Ende des Gehäuses zu, der bauchig erweitert ist, um das große Volumen des arbeitsmüden Stoffs aufnehmen zu können. Auf den Bildern 447 und 454 ist dieser Abdampfraum deutlich zu erkennen. Unmittelbar hieran wird durch eine kurze Röhrenleitung der Kondensator angeschlossen.



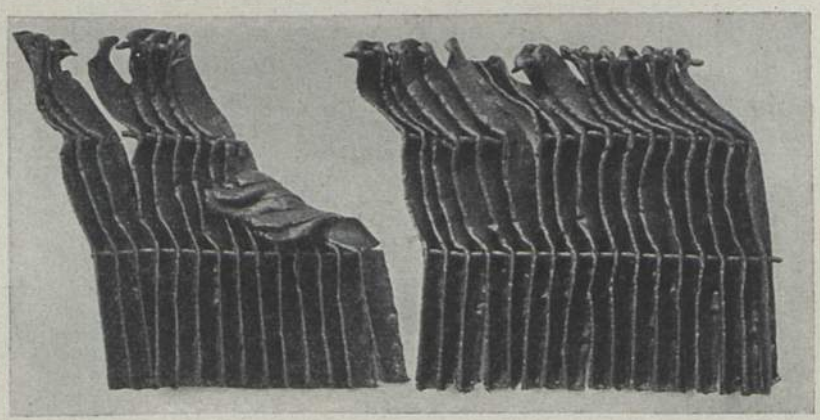
471. Laufrad-Ausschnitt mit Schaufeln und Zwischenstücken
Bauart von Escher Wyß & Cie., Zürich

Die Turbinen erhalten stets Oberflächen-Kondensation, damit das völlig ölfreie, beinahe chemisch reine Kondensat in seiner vollen Güte, unvermischt mit unreinem Wasser, zur Kesselspeisung verwendet werden kann. (Siehe auch Seite 235.) Die Oberflächen-Kondensation erfordert an sich bereits recht erhebliche Kaltwassermengen, und der Bedarf wird hier noch dadurch gesteigert, daß man das Vakuum weit über das bei Kolbenmaschinen übliche Maß hinaus treibt. So kommt es denn, daß die Einrichtung für die Niederschlagung des Dampfs mindestens den gleichen, oft mehr Platz einnimmt als die Hauptmaschine. Die großen Turbinen-Kondensations-Anlagen sollten niemals in dunklen unwirtlichen Kellerräumen untergebracht werden. Denn die dazu gehörigen Hilfsmaschinen bedürfen sorgfältiger Beaufsichtigung, und an ihnen sind öfter Ausbesserungsarbeiten vorzunehmen. Das Untergeschoß, in dem die Kondensations-Anlage notwendigerweise stehen muß, soll sich daher, wenn es irgend möglich ist, zum Maschinenflur öffnen. Der Turbinenwärter muß Gelegenheit haben, von seinem gewöhnlichen Arbeitsplatz her auch die drunten liegenden Teile der Maschinen-Anlage ständig zu beobachten. Sie sind ja nicht weniger wichtig als die Teile, die sich droben befinden. Eine gut zugängliche Kondensations-Anlage zeigt Bild 463.

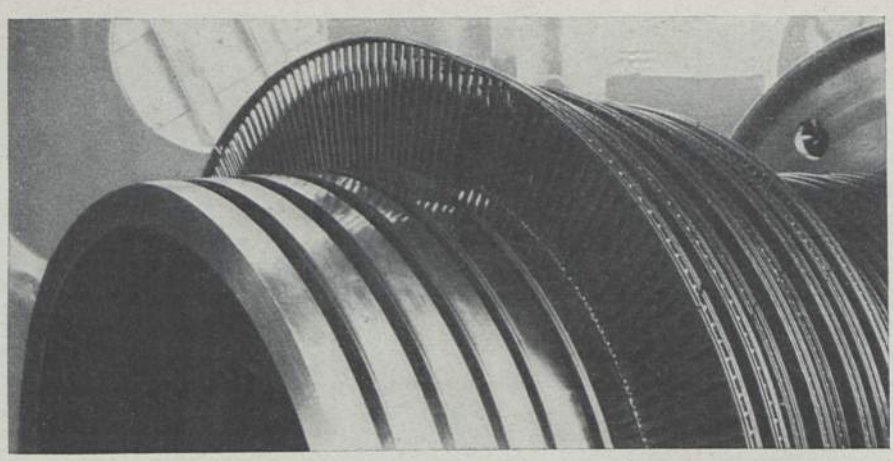
Auf dem unteren Teil des Bildes sind die Hilfsmaschinen deutlich zu sehen. Im Hintergrund liegt der große Kondensator-Kessel, der den Abdampf aufnimmt und von Kühlwasserröhren durchzogen ist (Bild 393, Seite 223). Rechts sieht man eine kleine Turbine, welche die auf gleicher Achse sitzenden Pumpen antreibt. Gleich daneben steht die Kühlwasserpumpe. Das Saugrohr, durch das sie das Wasser von den Kühlturmbecken her heranschafft, und das Druckrohr, das zum Kondensator führt, treten deutlich hervor. Links befindet sich die Heißwasserpumpe, die das Kondensat aus dem großen Kessel ansaugt und es unmittelbar der Speisepumpe für den Kessel zudrückt. Sämtliche Pumpen sind an Stelle der hin und her gehenden Kolben mit umlaufenden Schleuderrädern ausgerüstet.

Jede Turbine besitzt, gerade wie jede Kolbenmaschine, eine selbsttätige Regeleinrichtung. Die Maschinen, insbesondere die Dynamos antreiben, müssen sehr genau auf gleicher Drehzahl gehalten werden, damit keine Spannungsschwankungen im Netz eintreten, die ein sehr häßliches Zucken des Lichts in den Lampen hervorrufen würden.

Der Regler hat dafür zu sorgen, daß der Beaufschlagungsgrad der Turbine möglichst rasch den Belastungsänderungen angepaßt wird, die durch Zuschaltungen oder Abschaltungen im Netz entstehen. Er muß hohe Empfindlichkeit haben. Dem Regler wird hier seine Arbeit erleichtert, weil der Laufkörper der Turbine ein schweres und sehr rasch sich drehendes Schwungrad darstellt. Die Maschine gibt daher den Belastungsschwankungen längst nicht so rasch nach wie die Kolbenmaschine, deren Ungleichförmigkeitsgrad schon an sich groß ist. Für gewöhnlich kann der Regler an der Turbine schon besfernd eingreifen, wenn nur eine ganz geringe Änderung der Drehzahl nach oben oder nach unten eingetreten ist.



472. „Schaufelsalat." Vollständige Zerstörung der Beschaufelung einer Schiffsturbine
Aus dem Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 1914. Verlag von Julius Springer, Berlin



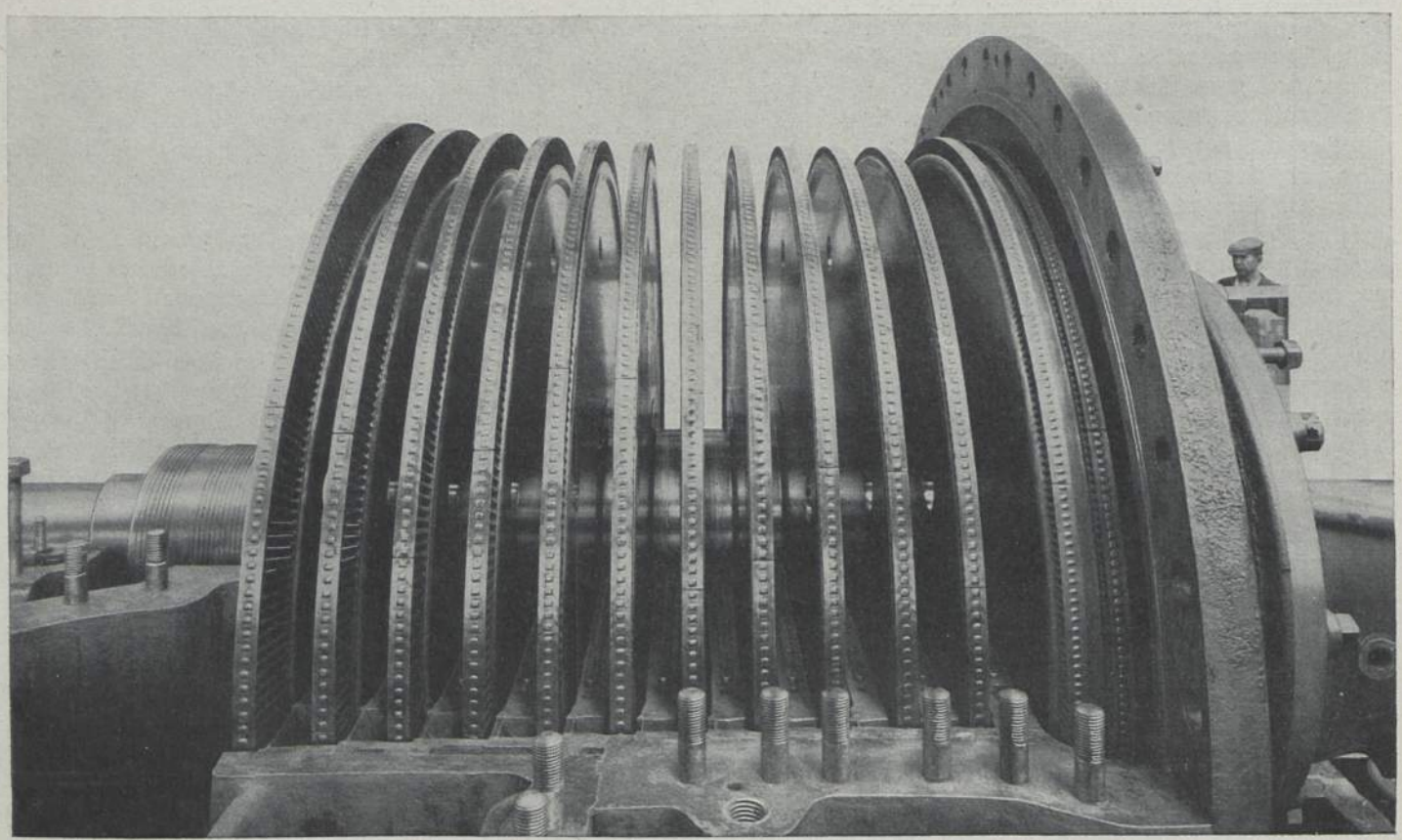
473. Einsetzen der Schaufeln in den Rotor einer Turbine
Melms & Pfenninger, München

Es werden auch hier zum Einstellen des Dampfzuflusses die Vorrichtungen benutzt, die wir bei der Kolbenmaschine kennengelernt haben, also Fliehkraftregler mit Gewichts- oder Federbelastung (Bilder 380 bis 385). Der Antrieb der Reglerwelle erfolgt durch eine Schnecke auf der Turbinenwelle (Bild 464). Das eingreifende Zahnrad dreht sich sehr viel langsamer als die Hauptwelle. Die Regler haben jedoch zu geringe Leistungsfähigkeit, um an den schweren Einstellorganen unmittelbar angreifen zu können. Deshalb wird eine Hilfseinrichtung dazwischen geschaltet, eine Druckölanlage, wie sie auch die Wasserturbinen besitzen. Auf Seite 128 f. ist diese Einrichtung dargestellt. Der Regler hat also auch bei den Dampfturbinen nichts anderes zu leisten als die Verschiebung des kleinen Steuerkolbens auf Bild 464. Dieser bewirkt, daß Drucköl, von einer besonderen Pumpe bereitet, bald über, bald unter den Hauptkolben tritt und so das eigentliche Reglergestänge bewegt.

Früher wurde bei den Turbinen ausschließlich durch Drosselung des Dampfs geregelt. In dem Hauptzuführungsrohr befindet sich alsdann ein zweisitziges Ventil (Bild 366), das mehr oder weniger weit gehoben wird. Wenn aber die Maschine lange mit Unterbelastung zu laufen hat, das Drosselventil also nur wenig geöffnet ist, dann wird der Dampfverbrauch ungünstig. Denn die Drosselung raubt dem Dampf Arbeitsvermögen, er verschwendet einen Teil seiner Energie, indem er sich durch einen engen Querschnitt hindurchzwängen muß.

Die neueren Turbinen besitzen daher fast sämtlich auch eine Quantitätsregelung, das heißt, die Beaufschlagung wird bei ihnen dadurch gemindert, daß nicht geschwächter, sondern weniger Dampf zuströmt. Es wird alsdann alles, was man nicht tatsächlich braucht, erspart. Das Drosselventil ist auch jetzt vorhanden, die zweite Regelung gibt jedoch die Möglichkeit, daß es stets ziemlich offen stehen kann, also weit weniger Ursache für Verluste ist. Es findet bei normalen Betriebsverhältnissen keine Drosselung des Dampfs mehr statt.

Die Quantitätsregelung erfolgt dadurch, daß je nach der Belastung der Turbine mehr oder weniger Zuführungsdüsen geöffnet werden. Das Lineal auf Bild 464 steht unter dem Einfluß des Druckölkolbens, also unter der Herrschaft des Reglers. Wenn dessen von der Fliehkraft abhängige



474. Rotor einer Turbine von 3500 Pferdestärken bei 1500 Touren mit Schaufeln und Kopfbändern
Vulkan-Werke A.-G., Hamburg

Teile sich bei Steigerung der Drehzahl über das Normale auseinander bewegen, dann wird das Lineal nach rechts verschoben. Bei zu langsamem Lauf der Turbine, also beim Zusammengehen der Reglerteile, rückt das Lineal nach links. Es ist leicht zu erkennen, daß hierbei durch die aufgesetzten Kurvenstücke Ventile entweder geschlossen oder geöffnet werden.

Bei Teilbelastung der Turbine befindet sich die Einrichtung in dem dargestellten Zustand. Nur die Ventile 1 und 2 sind offen, es strömt also durch die ersten drei Düsensätze Dampf in die Turbine. Sobald die Belastung größer wird, öffnet der Regler Ventil 3, vielleicht auch noch Ventil 4. Ein weiterer Düsensatz oder zwei Sätze erhalten nun Dampf und nehmen an der Beaufschlagung teil. Das letzte Ventil wird nur dann angehoben, wenn die Maschine sehr stark überlastet ist. Die Einrichtung kann so getroffen sein, daß alsdann Frischdampf durch den zugehörigen Düsensatz nicht nur in die erste, sondern auch in eine spätere Stufe eintritt. Durch ein besonderes, mit großem Handrad versehenes Ventil vermag der Wärter die Maschine völlig vom Kessel abzutrennen. Beim Anlassen wird der Verschluß vorsichtig geöffnet.

*

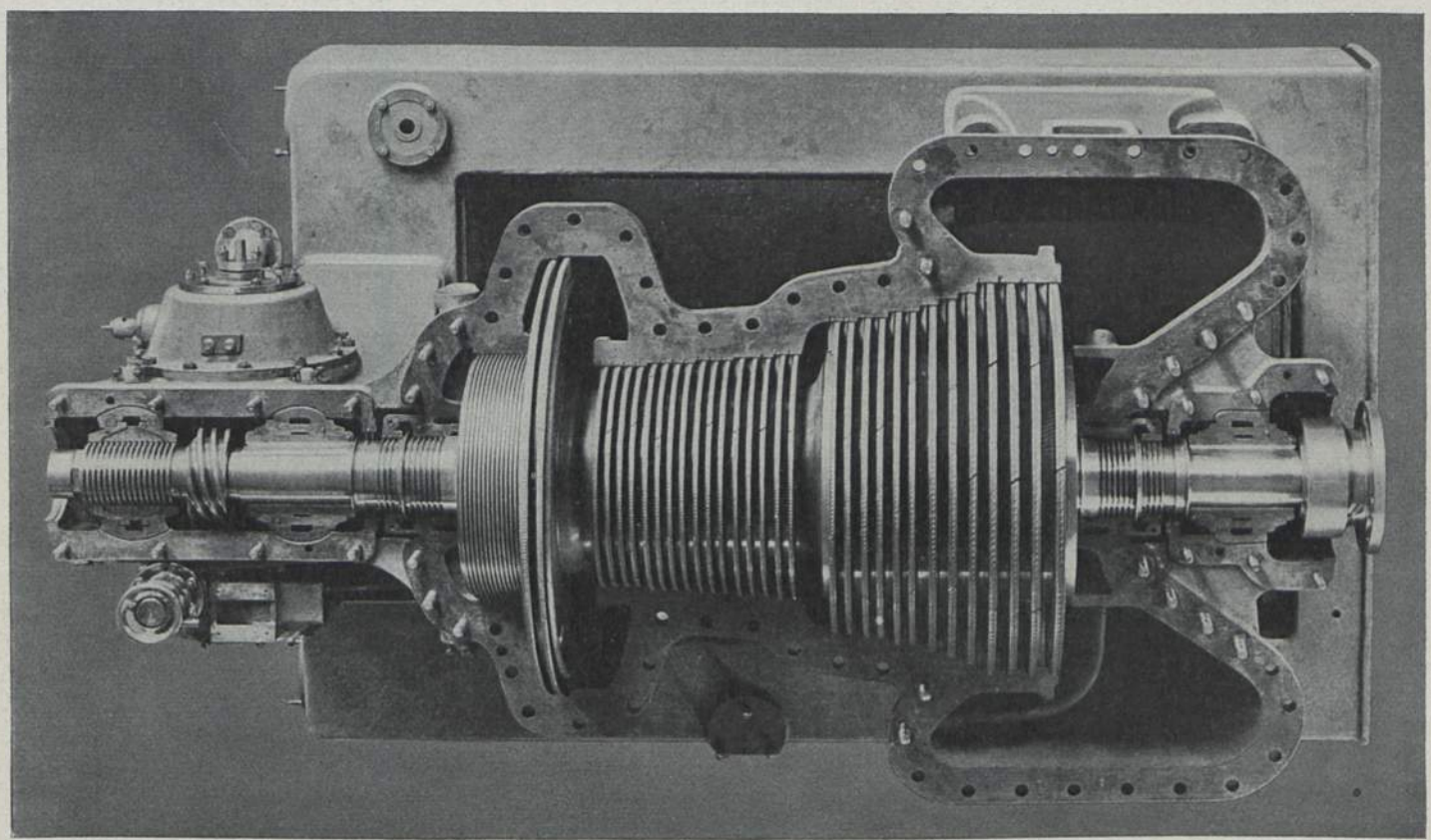
Bild 465 zeigt eine andere Ausführung der Quantitätsregelung. Der Regler bewegt in diesem Falle statt des Lineals eine Nockenwelle, deren Nocken die Düsenventile öffnen und schließen.

Überdruckturbinen können nicht mit Düsenregulierung ausgerüstet werden, da bei ihnen ja stets volle Beaufschlagung stattfinden muß.

Bei Turbinen muß unbedingt Vorsorge getroffen sein, daß die normale Drehzahl niemals um einen größeren Betrag überschritten werden kann. Es entstünde sonst die Gefahr, daß die ohnehin durch hohe Fliehkraftwirkung beanspruchten Räder auseinander fliegen. Nun kann es aber vorkommen, daß der Regler versagt, zum Beispiel dadurch, daß die Druckölleitung undicht geworden ist. Deshalb ist stets eine besondere Schnellschluß-Einrichtung vorgesehen, die in Tätigkeit tritt, sobald die mittlere Drehzahl um etwa 10 v. H. überschritten wird.

Der Hauptteil dieses Sicherheitsreglers (Bild 466) ist eine Scheibe, die ein wenig exzentrisch auf die Turbinenwelle gesetzt ist. Für gewöhnlich wird sie durch eine kräftige Feder in der Ruhelage gehalten. Bei zu schneller Drehung der Maschine aber überwindet die Fliehkraft, die auf den überstehenden Teil der Scheibe wirkt, die Federkraft, die Scheibe schwingt weiter aus und stößt hierbei an eine Knagge. Dadurch wird ein besonderes Sicherheitsventil im Dampfzuführungsrohr abgeschlossen. Die Schnellschluß-Einrichtung kann im Gefahrfall auch mittels eines einfachen Griffs von Hand betätigt werden (Bild 464, links unten).

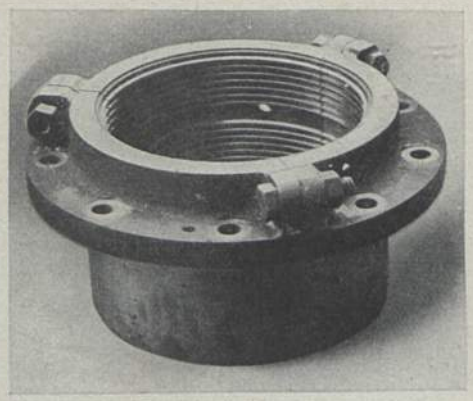
Watt hatte recht, als er schrieb, daß die rotierenden Dampfmaschinen schwieriger herzustellen seien als die mit hin und her gleitenden Kolben. Der Unterschied ist so groß, daß die Arbeit des Turbinenbauers kaum mit der des Kolbenmaschinen-Konstrukteurs verglichen werden kann. Dieser hat die Möglichkeit, alle Teile, die eine Bewegung gegeneinander haben, fest zu führen, indem er den einen auf dem anderen gleiten läßt. Bei der Turbine ist der Freilauf das Herrschende. Überall schmale Spalte, die offengehalten werden müssen, das engste Zusammenwirken von Teilen, denen es jedoch



475. Abgedeckte Eingehäuse-Turbine, Ansicht von oben
Melms & Pfenninger, München

durchaus unmöglich gemacht werden muß, einander zu berühren. Nur die höchste mechanische Kunst und die Benutzung allerbester Baustoffe machen daher die Dampfturbine möglich.

Der Kolbenmaschinenbauer kann das Wirken des Dampfs im Inneren der Maschine in jedem Augenblick durch den Indikator beobachten. Dieses Gerät steht dem Turbinenkonstrukteur nicht zur Verfügung. Kein Auge vermag in das Innere der laufenden Maschine zu schauen. Der Ingenieur muß sich also vollständig auf seine Berechnungen verlassen, die Theorie als einzige Grundlage und höchste Meisterin anerkennen. Und wie ungemein verwickelt ist diese Theorie! Dem leichtest beweglichen aller Körper, einem Dampf, muß der Weg aufs genaueste vorgeschrieben werden, indes überall Möglichkeiten zum Ausweichen vorhanden sind. Die hier zu lösende Aufgabe ist vielleicht mit der Arbeit des Märchenkünstlers zu vergleichen, der Sonnenstrahlen einfängt, um sie als Pfeile für seinen Bogen zu benutzen.



476. Labyrinth-Büchse aus Bronze mit eingedrehten Ringen zur Abdichtung gegen niedrigere Dampfdrücke
Ausführung der Vulkan-Werke A.-G., Hamburg

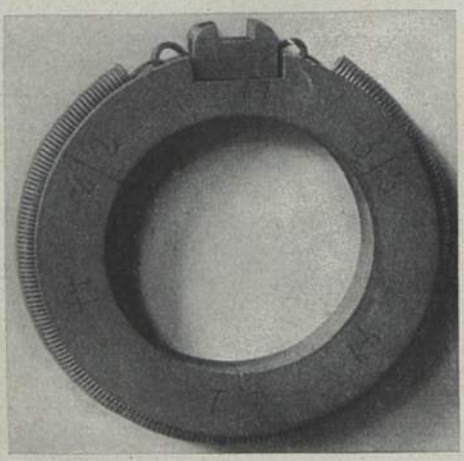
Für den Turbinenbauer ist der Dampfstrahl eine starre Hebelstange, mit deren Hilfe er Energie genau dort und gerade in dem Maß wirken läßt, wo und wie es ihm notwendig erscheint. Die Praxis hat ja zur Genüge gezeigt, daß das nur auf dem Papier herzustellende Grundgerüst für die Turbine tatsächlich ein ehernes, bis ins letzte zuverlässiges Fundament ist.

Für den Vortrag der Turbinentheorie eignet sich dieses Werk nicht. Wir wollen uns daher damit begnügen, einen streifenden Blick auf die Baustoffe und einzelne Gestaltungsformen zu werfen.

Das Gehäuse wird aus Gußeisen oder, wenn sehr hohe Drucke in Betracht kommen, aus Stahlguß hergestellt. Durch eine Längsfuge ist es in Unterbau und Deckel geteilt. Die Zwischenböden der Leiträder bei Gleichdruck-Turbinen, die gleichfalls gehälftet sind, werden oben und unten in Querfugen der Gehäusewände eingepreßt, so daß nach Abheben des Deckels der Laufteil vollkommen frei liegt und gleichfalls leicht mit einem Kran ausgehoben werden kann.

Die Leiträder (Bild 468) bestehen meist aus Gußeisen. Die Leitschaufeln werden in die Zwischenböden eingegossen, indem man ihnen überstehende Ränder gibt. Bild 469 zeigt den Unterteil einer Gießform für ein Leitrad mit den eingelegten Schaufeln. Die Teile, die später den Dampf führen werden, sind vollständig vom Formsand eingeschlossen, so daß die Kanäle nicht vom Eisen ausgefüllt werden. Um die Ränder fließt, nachdem die Form durch Auflegen des Deckels geschlossen ist, das Eisen und verbindet sich mit den Schaufelblechen zu einem einheitlichen Körper. Um den Zusammenhalt zu stärken, sind in die Schaufelränder Löcher und Grate eingeschlagen.

Die Welle, durch die der Laufkörper genau in der vorgeschriebenen Lage gehalten werden muß, wird aus bestem Siemens-Martin-Stahl vorgeschmiedet.



477. Kohlering zur Abdichtung gegen höhere Dampfdrücke
Melms & Pfenninger, München

Die auf ihm sitzenden Laufräder (Bild 467), deren Zerreißfestigkeit durch die Fliehkraft sehr stark beansprucht wird, bestehen wieder aus Nickelstahl. Sie werden vor dem Einsetzen auf besonderen Vorrichtungen daraufhin untersucht, ob sie völlig gleichmäßig gebildet sind, damit bei der Drehung keine einseitige Belastung der Welle eintritt.

Die Laufschaufeln werden in den errechneten Formen entweder aus Blech gepreßt oder gezogen oder von gebogenen Profilstäben geschnitten. Die oft sehr langen Schaufeln für die letzten Räder läßt man häufig auch aus dem Vollen herausfräsen, wobei die Wandstärke nach außen hin abnehmen kann. Denn die Schaufelfüße sind die am stärksten beanspruchten Teile, und jedes an den äußeren Abschnitten ersparte Gramm mindert die auf sie ausgeübte Fliehkraft.

Die Schaufeln werden aus Nickelstahl, Bronze oder dem sehr festen „nichtrostenden Stahl" gefertigt. Ihre Befestigung an den Laufrädern muß selbstverständlich im höchsten Grad zuverlässig sein. Denn bricht bei der laufenden Maschine auch nur eine einzige Schaufel aus, so wird, da die Spalten ja allseitig nur gering sind, sogleich die ganze Beschaufelung des betroffenen Kranzes zerstört. Nicht selten erstreckt sich bei Überdruckturbinen der Zusammenbruch auch auf die Nachbarn. Es entsteht der berühmte Schaufelsalat (Bild 472).

Dieses Wort, das anfangs scherzhaft gebraucht wurde, ist heute fester Besitz des technischen Wörterbuchs. Selbst in ernsten theoretischen Auseinandersetzungen wird der Ausdruck angewendet. Derartige Wortschicksale sind nicht selten. Man denke zum Beispiel daran, daß der Mediziner die Verhornung an den Zehen stiefeltragender Füße als Hühnerauge bezeichnet, und daß es komisch klingt, wenn dieses Wort einmal in seiner eigentlichen Bedeutung gebraucht wird, mit der doch das Auge des Huhns gemeint ist.

Jede größere Turbinenfabrik bildet den Laufschaufelfuß nach ihrer eigenen Art aus. Die AEG wendet den Hammerkopf an (Bild 470). Das Einschieben aller Schaufeln erfolgt an derselben Stelle des Rads, wo eine genügend breite Quernut eingeschlagen ist. Der überschießende Teil der Fuge wird hernach sorgfältig verschlossen. Bei den Zoelly-Turbinen, die von der Firma Escher Wyß & Cie. in Zürich hergestellt werden, ist der unterschnittene Schaufelfuß üblich (Bild 470). Melms & Pfenninger brauchen keine besondere Einführungsnut. Die Schaufelfüße sind hier schmaler als die Fuge im Rad. Sie werden durch Einsetzen von zwei Keilen gesichert. Der Kopf der außen liegenden Beilage ist ursprünglich aufwärts gestreckt, so daß der zweite Keil bequem eingelegt werden kann. Der Kopf wird erst nachträglich in die auf Bild 470 (Mitte) gezeichnete Form umgebogen; nun ist die Verbindung unlösbar.

Der Abstand, den die Schaufeln gegeneinander einhalten müssen, wird durch metallene Zwischenstücke (Bild 471) gewahrt, die zwischen die Füße geschoben

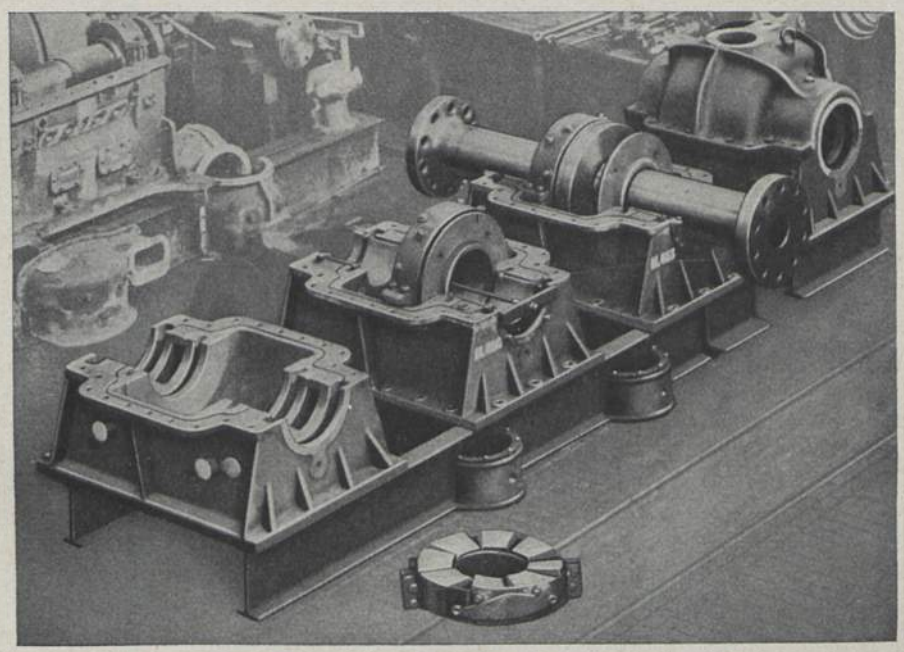
werden. Bei Beschaufelungen für hohe Beanspruchung sind Schaufeln und Zwischenstücke aus Einem Stück gebildet. Die Köpfe werden von dem umgelegten metallenen Band in richtiger Lage gehalten; die Löcher darin sind sehr sorgfältig auf einer Teilmaschine eingestanzt. Jeder Schaufelkopf wird leicht in das Band eingenietet (Bilder 473 u. 474).

Die Welle der weitaus am häufigsten verwendeten Eingehäuse-Turbinen ist rechts und links vom Gehäuse je einmal gelagert. Auf das Traglager an der Kondensatorseite (rechts auf Bild 475) folgt nach außen hin meist sogleich die Kupplung, welche die Verbindung mit der Dynamowelle herstellt. Diese erhält dann nur noch auf der entgegengesetzten Seite eine besondere Lagerung, so daß das gesamte Turbodynamo-Aggregat auf nur drei Stützen ruht.

Diese sichern die Welle gegen radiale Verschiebungen. Bei den geringen Abständen zwischen Leit- und Laufrädern ist aber auch eine Festhaltung in achsialer Richtung notwendig. Auf Bild 475 sehen wir ganz links das Kammlager, das die gewünschte Wirkung übt. Zahlreiche Ringe auf der Welle laufen in ebenso vielen Lagernuten, so daß seitliche Abweichungen nicht stattfinden können.

*

Neuerdings verwendet man statt der Kammlager vielfach sogenannte Blockdrucklager (Bild 478). Ein einziger Ring auf der Welle legt sich beiderseits gegen eine Anzahl ringsegmentförmiger Blöcke, die nach hinten kippbar abgestützt sind. Der Wellenring saugt nun bei seiner Drehung selbsttätig eine Ölschicht zwischen sich und die Blöcke. Dadurch ist dieses Lager befähigt, bedeutende Achsialdrucke aufzunehmen.



478. Blockdrucklager

Links im Vordergrund: leeres Lagergehäuse, offen; daneben: Lagerring mit Blöcken, dahinter offene Gehäuse mit einem eingesetzten Lagerring ohne und mit Welle

Bild 475 gewährt einen guten Überblick über die Gesamtanordnung des Wellenstrangs. Neben dem Kammlager ist die Schnecke aufgesetzt, von der aus der Reglerantrieb abgeleitet wird. Alsdann folgt der Zapfen für das Traglager, und hieran schließt sich die Abdichtung der Hochdruckseite gegen die Atmosphäre.

Diesem Zweck dienen bei der Turbine Labyrinth- oder Kohleringdichtungen, die zu Unrecht und nur in Anlehnung an die bei der Kolbenmaschine übliche Bezeichnung Stopfbüchsen genannt werden. Denn bei der sehr geschwinden Umdrehung der Turbinenwelle kommt weiches, unter Druck eingepreßtes Stopfbüchsenmaterial nicht in Betracht.

Das Labyrinth wird durch eine Büchse aus Stahlguß oder Gußeisen gebildet, die mit ihren beiden Teilen um die Welle gesetzt und mit eingestemmten, spitz zulaufenden Bronzeringen versehen ist. Häufig werden die Büchsen ganz aus Bronze hergestellt und die Ringe ausgedreht (Bild 476). In diese Ringe ragen gleichartige Vorsprünge auf der Welle hinein. Die scharfen Kanten laufen nicht auf, sondern halten einen geringen Abstand diesseits von der Welle, jenseits von der Büchse. Die Vorrichtung verfolgt wiederum den Zweck, den Dampfdruck durch Drosselung und fortwährende Richtungsänderung abzutöten. Damit auch nicht der geringste Dampfrest nach außen dringen kann, wird eine Ringnut kurz vor dem Ende der Stopfbüchse des Hochdruckteils mit dem Labyrinth auf der Niederdruckseite verbunden. Bei Mehrgehäuse-Turbinen führt man den übrigen Abdampf aus den Stopfbüchsen des Hochdruckteils in eine Niederdruckstufe, wo er noch einmal mitarbeiten kann.

Es folgen nun bei der von uns als Beispiel herangezogenen Eingehäuse-Turbine (Bild 475) eine Ausgleichscheibe mit Labyrinthdichtung, hierauf das vorgeschaltete zweikränzige Curtis-Rad und der Reaktionsteil des Laufkörpers.

Die Labyrinthdichtung auf der Niederdruckseite hat den gleichen Bau wie ihre Schwester drüben. Ihre Aufgabe aber ist es nicht, einem Überdruck entgegenzuwirken, der von innen nach außen strebt, denn in dem anschließenden Gehäuseteil herrscht ja die niedrige Kondensatorspannung. Das Labyrinth hat also hier gegen das Eindringen der Außenluft abzudichten. Damit dies mit Sicherheit geschieht und eine Verschlechterung des Vakuums unter allen Umständen verhindert wird, läßt man den Restdampf der Hochdruckbüchse mit etwas mehr als Atmosphärendruck als Sperrdampf in das Labyrinth ein. Die leichte austretende Dampfwolke wird durch einen kurzen Schlot in die Höhe geführt, damit die umschließenden Teile nicht von Niederschlagwasser berieselt werden.

Die zweite Art der Dichtung wird aus mehreren nebeneinander liegenden Kohleringen gebildet, die in genau passenden Nuten der umschließenden Büchse liegen. Die Ringe (Bild 477) sind meist dreigeteilt und werden durch eine umgelegte Spannfeder so zusammengehalten, daß sie die Welle ohne Druck umschließen. Die Innenflächen sind sehr sorgfältig auf genauen Durchmesser geschliffen, so daß zwischen Welle und Ring kein Spalt vorhanden ist. Ein besonderes Paßstück sichert jeden Kohlering gegen das Mitnehmen durch die sich drehende Welle.

Da nur die Traglager geschmiert werden, die Dichtungen aber nicht, so kommt der Dampf mit Öl gar nicht in Berührung. Das Kondensat hat daher die vielgerühmte Reinheit und ist trefflich für die Kesselspeisung geeignet.

Wir blicken noch einmal auf Bild 439. Da breitet sich, gemächlich hingestreckt, die große Verbund-Kolben-Dampf-

maschine über einen großen Teil des Hallenbodens. Man muß lächeln! Dieses Ungetüm, stammend aus einer Periode des Dampfmaschinenbaus, die heute bereits als Urzeit angesehen werden muß, erzeugte bei seinem behaglich zu nennenden Betrieb mit einem Kesseldruck von 16 Atmosphären und bei nur 300 minutlichen Umdrehungen gerade 4000 Pferdestärken.

Heute besitzen wir bereits Turbinen, von denen die einzelne bei der 20- bis 30fachen Umlaufzahl und bei Beaufschlagung der Hochdruckteile mit Dampf von 60 bis 120 Atmosphären ein Vielfaches der obigen Leistung hervorbringen kann und wahrscheinlich in die Kreuzkopf-Führung der alten Maschine hineingestellt werden könnte. Diese Maschinen sehen zwerghaft schon gegenüber den Generatoren aus, die doch von ihnen angetrieben werden. Höchste Konzentration der Krafterzeugung! Kühnste Beanspruchung der Baustoffe! Machtvollste Überführung bewundernswerter und höchst verwickelter theoretischer Gedankengänge in eine einfach nutzvolle Praxis! Sie sind in diesen kleinen Großturbinen vollzogen. —

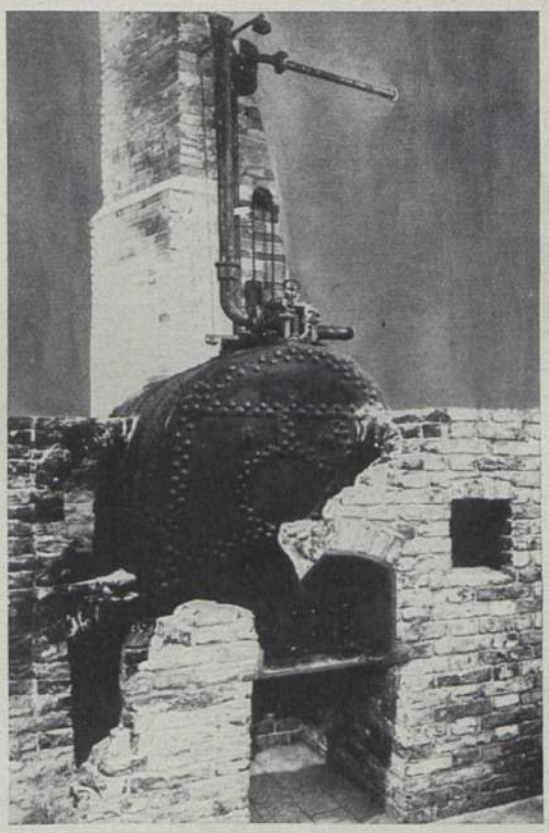
# 29. Der Dampfkessel

Kraftvoll wirkend läuft die Dampfmaschine um. Feuriges Leben sprüht aus allen ihren Gliedern — und sie ist doch nur ein Gebilde aus totem Eisen.

Das tritt deutlich genug hervor, wenn sie einmal kalt und still dasteht. Dann ist die Seele aus ihr entflohen, sie vermag keine Bewegung mehr auszuführen, widersetzt sich keinem Eingriff und ist nun ebensowenig eine Persönlichkeit wie ein Stein am Wegrand. Bald aber fährt, auf den Flügeln der Wärme, die Seelenkraft in die Maschine. Das starre Gebilde erwacht, wird lebendig, gewinnt die Erinnerung an seine Pflicht wieder und fängt an, die ihm obliegende, so überaus nützliche und sinnvolle Arbeit zu verrichten.

Das göttliche Agens, das der Dampfmaschine zuströmt, ihr lebendiger Odem, ist der Dampf. Wir haben die Tätigkeit dieses Feuergeborenen in den verschiedenartigen eisernen Gebäuden, die der Mensch ihm seit mehr als zwei Jahrhunderten für die Auswirkung seiner unbändigen Tatkraft zur Verfügung stellt, bereits betrachtet, und es ist nun unsere Aufgabe, zu seiner Quelle niederzusteigen, die Geburtsstätte und auch die Artung des seltsamen Gesellen zu betrachten.

Der Dampfkessel ist letzten Endes nichts anderes als ein großer Kochtopf. Wie die Köchin auf dem Herd Wasser in einem eisernen Gefäß erhitzt, so hat auch der Kesselwärter keine andere Aufgabe, als Wasser zum Sieden zu bringen. Nur daß es sich in seinem Bereich um weit größere Massen handelt, daß er ständig eine ganz bestimmte Menge Wasser verkochen und nicht Dampf von Atmosphärenspannung, sondern mit bedeutend höherer Druckkraft bereiten muß. Die beiden Tatsachen, daß sehr viel Dampf rasch auf die wirtschaftlichste Art erzeugt, und daß eine hohe Spannung hervorgerufen werden muß, haben dazu geführt, dem Kochtopf für technische Zwecke besondere, sorgfältig ausgesonnene Formen zu geben.



479. Kofferkessel mit geraden Seitenwänden
Deutsches Museum, München

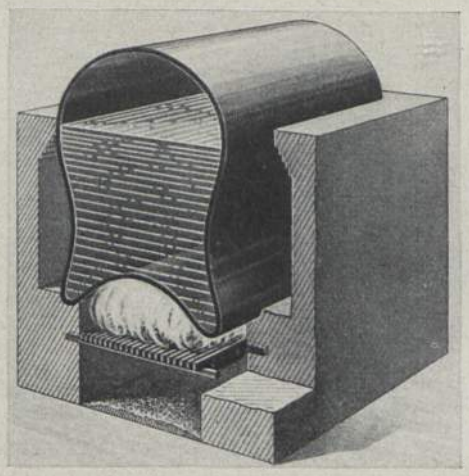
Bevor wir uns diese anschauen, haben wir eine Antwort auf die Frage zu finden: Was ist Dampf?

Die Stoffe dieser Art gehören gerade wie die Gase zu den luftförmigen Körpern. Unter gewöhnlichen Umständen besteht aber ein auffallender Unterschied zwischen Gasen und Dämpfen, deren wichtigster und nützlichster Vertreter der Wasserdampf ist. Wenn wir irgendein Gas, Sauerstoff, Stickstoff, Chlor oder Leuchtgas, um vielleicht 10 Grad erwärmen oder abkühlen, so bleiben alle seine Teile immer noch luftförmig. Aus jedem Dampf aber kehren, wenn an ihm nicht gerade die Gewalttat der Überhitzung vollzogen worden ist, bei der geringsten Abkühlung Teile sogleich wieder in den tropfbar flüssigen Zustand zurück, aus dem er sozusagen vor unseren Augen durch Wärmezuführung entstanden ist, während die Gase immer schon das waren, was sie sind.

Das physikalische Verhalten von Gasen und Dämpfen zeigt große Abweichungen, und die ältere Physik sah die beiden deshalb als grundsätzlich verschiedene Körper an. Diese Meinung ist heute nicht mehr aufrecht zu erhalten. Denn wir wissen nunmehr, daß jedes Gas, wenn es unter genügend hohen Druck gebracht und stark abgekühlt wird, verflüssigt werden kann. In der Nähe seines Verflüssigungspunkts verhält sich jedes Gas physikalisch gerade so wie ein Dampf. Dieser ist also doch ein Gas, aber ein solches, dessen Verflüssigungspunkt bei Atmosphärendruck der gewöhnlichen Lufttemperatur sehr nahe liegt.

Der Wasserdampf insbesondere und seine Mutterflüssigkeit, das Wasser, haben sich als sehr geeignet erwiesen, die Grundpfeiler der von der Wissenschaft und dem Leben angewendeten Wärmeskala zu bilden.

Der Nullpunkt der am häufigsten angewendeten Thermometer, der von Réaumur und Celsius, zeigt die Temperatur des schmelzenden Eises an, die unter allen Umständen immer die gleiche ist. Läßt man einen Eisblock tauen, so bleibt das hieraus entstehende Wasser, so lange noch nicht der letzte Eisrest weggeschmolzen ist, auf 0 Grad. Der entgegengesetzte Punkt der Thermometerskala wird gewonnen, wenn man das Instrument von Dampf umspülen läßt, der bei einem Barometerstand von 760 Millimetern Quecksilbersäule entsteht.



480. Kofferkessel mit geschweiften Seitenwänden

Im Gegensatz zum Eispunkt ist nämlich der Siedepunkt veränderlich. Wasser, das unter höherem Druck steht, muß stärker erwärmt werden als weniger belastetes, damit es in Dampf übergeht. In der Höhe des Meeresspiegels ist die Luftsäule, die auf der kurzen offenen Röhre des Barometers lastet, im Durchschnitt so schwer, daß sie einer Quecksilbersäule von 760 Millimetern Höhe in dem langen geschlossenen Barometerschenkel, dessen Ende völlig luftleer ist, das Gleichgewicht zu halten vermag. Ein solcher Quecksilberfaden wiegt, wenn er einen Querschnitt von 1 Quadratzentimeter hat, fast genau 1 Kilogramm. Die atmosphärische Luft drückt also in Meereshöhe auf jedes Quadratzentimeter Fläche mit der Kraft von 1 Kilogramm.

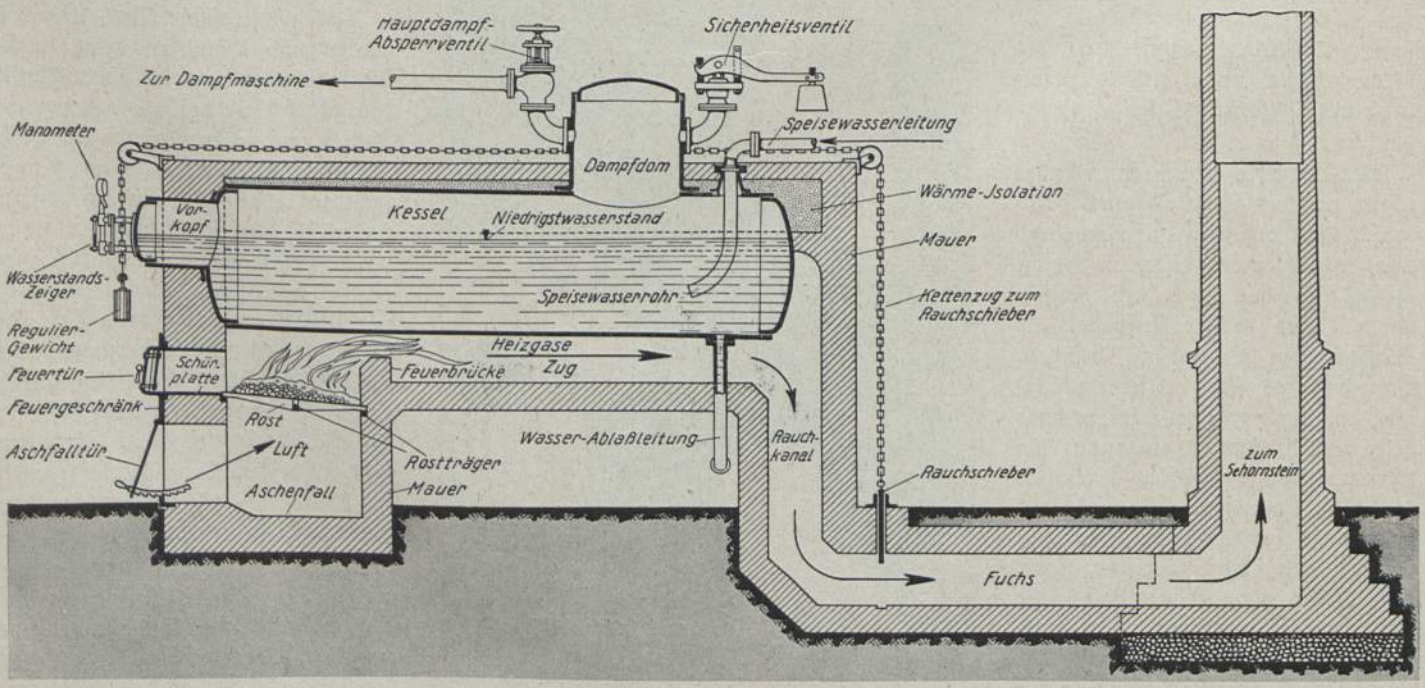
Hieraus ergibt sich eine sehr bequeme technische Rechnungsgröße: die Atmosphäre = dem Druck von 1 Kilogramm auf 1 Quadratzentimeter. Réaumur teilt den Abstand vom Eis- oder Nullpunkt zu dem auf Meereshöhe festgestellten Siedepunkt in 80 Grad, Celsius verwendet die 100teilige Skala. Diese wird heute von der Wissenschaft ausschließlich benutzt und sollte auch im gewöhnlichen Leben alleinherrschend sein.

Damit 1 Kilogramm Wasser sich um 1 Grad Celsius erwärmt, muß ihm eine bestimmte Wärmemenge zugeführt werden. Diese Wärmemenge ist die Wärme-Einheit, die den Namen Kalorie führt. Der Begriff ist bereits in Abschnitt 26 auf Seite 97 näher erörtert worden. Man sollte also meinen, daß die Zuführung von 100 Kalorien genügen müßte, um 1 Kilogramm Wasser von 0 Grad bei dem durchschnittlichen Barometerstand zur Umwandlung in Dampf zu veranlassen. Das ist aber keineswegs der Fall. Es muß vielmehr eine sehr viel größere Zahl von Wärmeeinheiten hierfür aufgewendet werden.

Die 100 Kalorien haben nämlich nichts weiter getan als das Wasser auf die Temperatur gebracht, in der es — nicht etwa verdampft, sondern verdampfen kann. Es ist die sogenannte Flüssigkeitswärme zugeführt worden. Der Umwandlung in den luftförmigen Zustand setzt das Wasser aber einen sehr seltsamen inneren Widerstand entgegen. Es zeigt eine Wesensträgheit, eine Zustandsbeharrung, die erst durch besonderen Aufwand von Energie überwunden werden kann; und Wärme ist ja, wie wir wissen, eine Energieform. Erst wenn eine weitere Wärmemenge, die innere Verdampfungswärme, zugeführt ist, hört der Widerstand auf.

Aber auch jetzt findet noch keine Dampfbildung statt. Denn Dampf nimmt einen sehr viel größeren Raum ein als das Wasser, aus dem er entsteht, bevor also Wasserteile dampfförmig werden können, müssen sie sich Raum machen, indem sie Luft verdrängen. Sie haben die Raumschaffungsarbeit zu leisten, die wiederum eine Anreicherung des Wassers mit Wärme-Energie erfordert.

Die für die Raumschaffungsarbeit gebrauchte Wärmemenge heißt äußere Verdampfungswärme; innere und äußere Verdampfungswärme werden zusammen kurz Verdampfungswärme genannt. Damit man also 1 Kilogramm Wasser dazu veranlassen kann, Dampf von 1 Atmosphäre auszu-




481. Schema einer Dampfkesselanlage

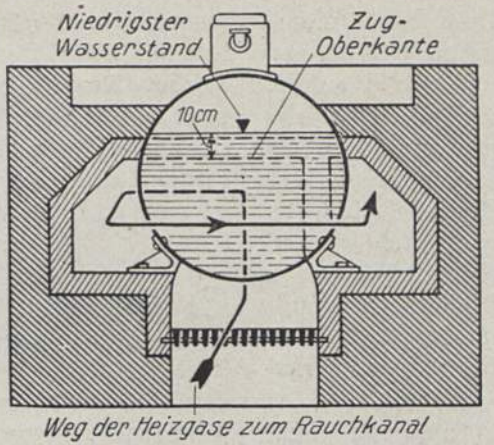
scheiden, muß eine Wärmemenge = Flüssigkeitswärme + Verdampfungswärme zugeführt werden. Sie beträgt 639 Kalorien.

Während nunmehr das Wasser verdampft, wird die gesamte weiter zugeführte Wärmemenge als Verdampfungswärme verbraucht. Solange noch ein Tröpfchen Wasser vorhanden ist, zeigt ein in den Dampf gehaltenes oder in das Wasser getauchtes Thermometer stets 100 Grad an. Dampf von 100 Grad hat stets eine Spannung von 1 Atmosphäre.

Wasserdampf, der in breiter Berührung mit dem Wasser bleibt, aus dem er entstanden ist, heißt gesättigter oder Sattdampf, und zwar deshalb, weil der Raum, den er einnimmt, bei derselben Temperatur keinen Wasserdampf mehr aufnehmen kann. Zu jeder Temperatur des Sattdampfs gehört daher eine ganz bestimmte Dampfspannung. Denn der Druck, den jedes Kubikzentimeter Dampf auszuüben vermag, ist abhängig von der Zahl der kleinsten Dampfteilchen, die sich darin befinden.

Aus Wasser, auf dem nur der Atmosphärendruck lastet, kann Dampf mit einer Spannung von mehr als 1 Atmosphäre nicht bereitet werden, weil das Wasser, wie gesagt, bei 100 Grad verdampft und nun nicht mehr wärmer wird. Wohl aber vermag man die Dampfspannung zu steigern, wenn der Druck auf den Wasserspiegel erhöht wird. Das geschieht nun ganz von selbst, wenn man statt eines offenen Topfs einen allseitig geschlossenen Kessel verwendet. Der zunächst erzeugte Dampf, der nicht entweichen kann, drückt auf die Wasseroberfläche; je mehr Dampf erzeugt wird, desto größer wird die Auflast. Es ist genau das Phänomen des Papinschen Topfs (Seite 166). Unterhält man also unter einem Kessel ein genügend kräftiges Feuer, und sorgt man für dauernde Wasserzufuhr, so kann darin Dampf von jeder beliebigen Spannung hervorgebracht werden.

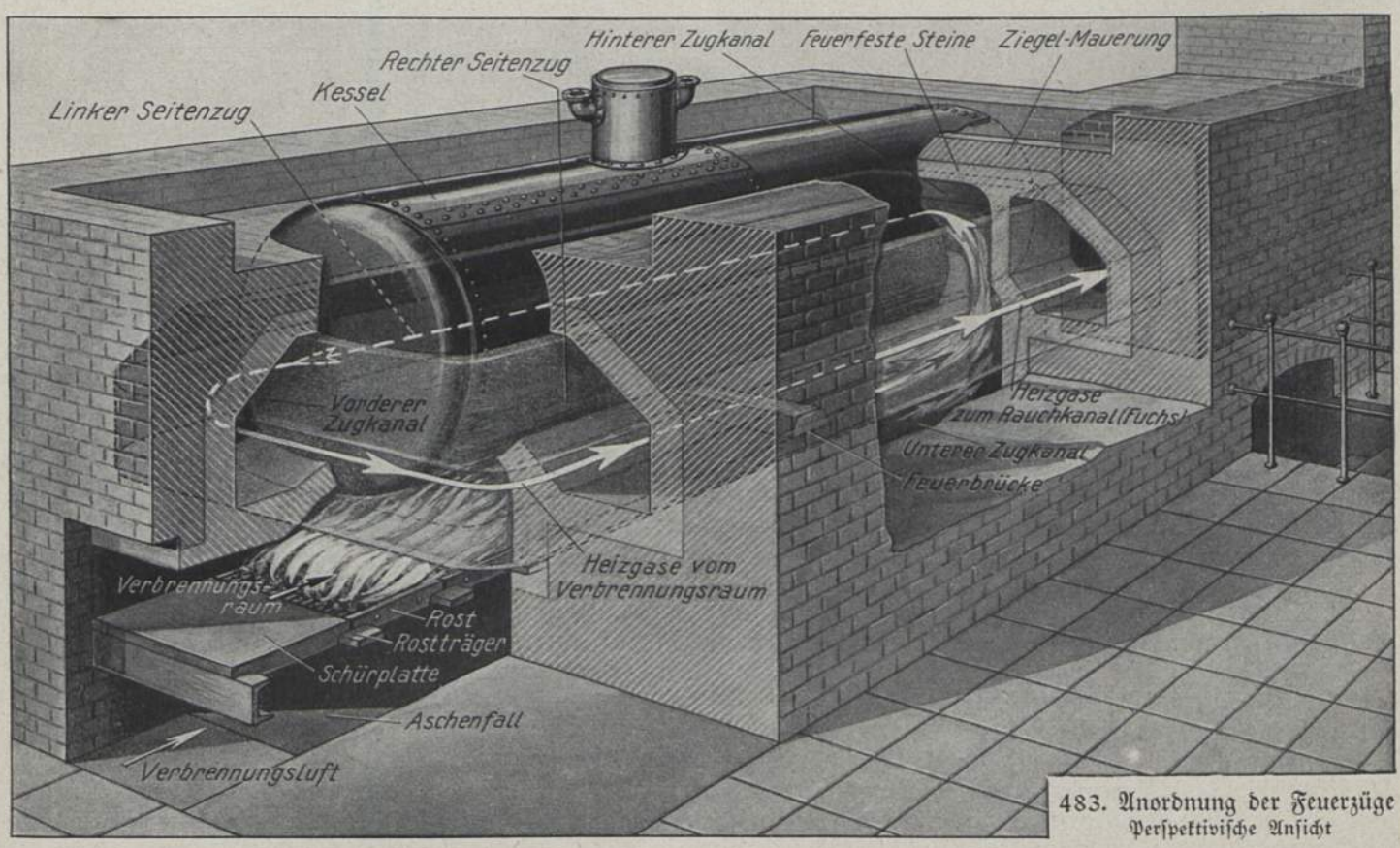
Es ist nun für technische Zwecke ungemein vorteilhaft, daß, wie bereits in diesem und im vorigen Abschnitt öfters erwähnt wurde, hohe Dampfdrücke durch verhältnismäßig geringe Wärmesteigerung hervorgebracht werden können. Je höher man in der Druckskala hinaufgeht, desto geringer wird der Wärmeaufwand, der notwendig ist, um den Druck um 1 Atmosphäre zu vermehren. Das zeigt die folgende Tafel:




482. Anordnung der Feuerzüge
Schematisch von vorn

| Temperatur in Celsius-Graden | Druck in Kilogrammen auf das Quadratzentimeter (absolut) | Temperatur in Celsius-Graden | Druck in Kilogrammen auf das Quadratzentimeter (absolut) |
|---|---|---|---|
| 100 | 1 | 174,4 | 9 |
| 119,6 | 2 | 178,9 | 10 |
| 132,8 | 3 | 183,1 | 11 |
| 142,8 | 4 | 186,9 | 12 |
| 151,0 | 5 | 190,6 | 13 |
| 157,9 | 6 | 194,0 | 14 |
| 164,0 | 7 | 197,2 | 15 |
| 169,5 | 8 | 200,3 | 16 |

(Die Erklärung des Ausdrucks „absolut" siehe nächste Seite.)




483. Anordnung der Feuerzüge
Perspektivische Ansicht

Wenn man also zum Beispiel den Druck von 1 Atmosphäre auf 2 Atmosphären steigern will, so muß die Temperatur um 19,6 Grad erhöht werden. Um von 9 auf 10 Atmosphären zu gelangen, braucht man nur noch eine Steigerung von 4,5 Grad, und der Sprung von 15 auf 16 Atmosphären geht schon bei einer Temperaturerhöhung von 3,1 Grad vor sich. Die gesteigerte Arbeitsfähigkeit, die ein hochgespannter Dampf besitzt, ist wirtschaftlich sehr viel wertvoller als der Mehraufwand an Brennstoff, der zu seiner Erzeugung gegenüber einem Dampf niederer Spannung notwendig ist. Es erwächst der weitere Vorteil, daß die Abmessungen der zugehörigen Maschine kleiner gehalten werden können (Seite 207).

Kessel für die Versorgung von Maschinen mit einem Betriebsdruck unter 6 Atmosphären werden deshalb heute kaum noch gebaut. Großanlagen wenden 16 bis 18 Atmosphären an, und auch Drücke von 35 Atmosphären sind heute nicht mehr selten. In einem solchen Kessel lastet auf jedem Quadratzentimeter der Wandung ein Druck von 35 Kilogramm. Hat die Gesamtfläche der Wandungen eine Ausdehnung von 400 Quadratmetern, so beträgt der darauf lastende Druck 140 Millionen Kilogramm. Nur ein Gefäß, das aus vortrefflichem Baustoff gefertigt und in sorgfältigster Weise gefügt ist, vermag eine solche Riesenbeanspruchung auszuhalten.

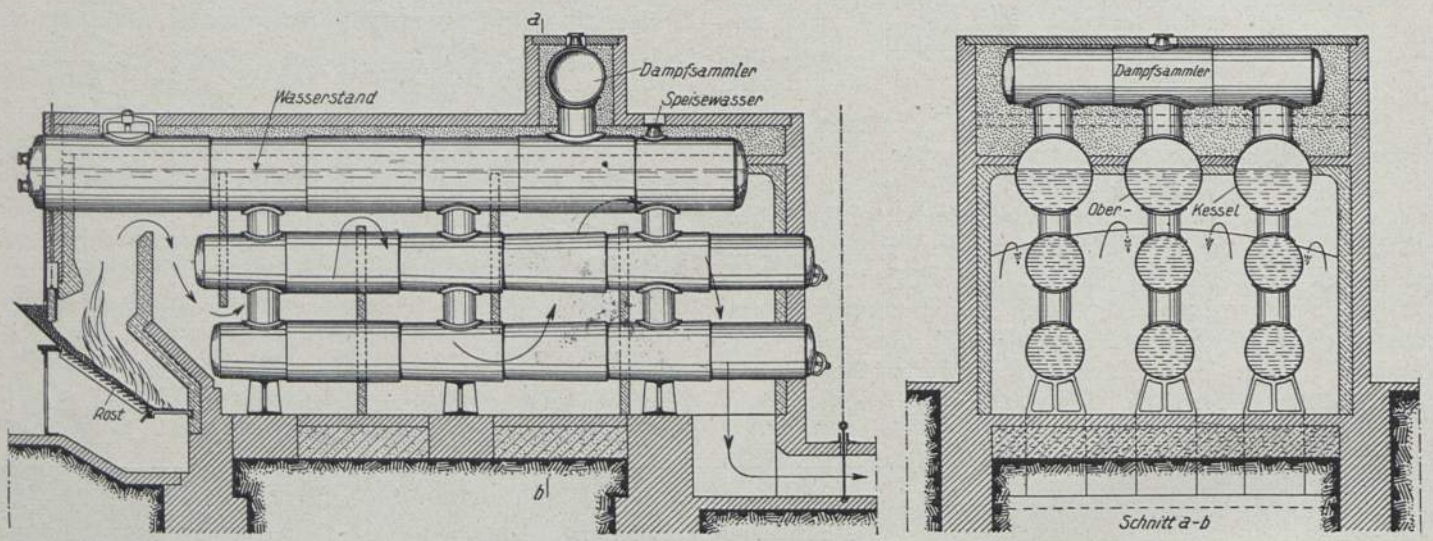
Schon ein Dampfkessel, in dessen Innerem eine Spannung von wenig mehr als 20 Atmosphären herrscht, ist einer Bombe nicht ganz unähnlich. Wehe, wenn er sich entladet! Trotzdem wagt man es heute, noch sehr viel höhere Drücke anzuwenden: 100 Atmosphären, 150 Atmosphären und in besonderen Fällen selbst mehr als 200. Die Tatsache eben, daß höchstgespannter Dampf die Energie ganz besonders billig liefert, zwang zur Überwindung aller Schwierigkeiten.

Die in den zweiten Spalten unserer Zahlentafel angegebenen Drücke sind absolut gemessen. Der Nullpunkt der Stufenleiter ist hier das vollständige, theoretische Vakuum. Ein Kessel, in dem ein Druck von 1 Atmosphäre absolut herrscht, ist überhaupt keiner Pressung ausgesetzt, da ja auf seinen Wänden von außen her ebenfalls der Druck von 1 Atmosphäre lastet. Die Meßinstrumente an den heutigen Dampfkesseln, die Manometer, zeigen nun in Deutschland sowie in zahlreichen anderen Ländern nicht den absoluten, sondern den Überdruck, d. h. den Druck über die Außenluft an. Es ist 2 Atmosphären Überdruck = 3 Atmosphären absolut. Das vorher errechnete Beispiel über den Gesamtdruck bezieht sich also auf einen Kessel, dessen Manometer eine Dampfspannung von 35 Atmosphären anzeigt; tatsächlich herrscht darin ein Druck von 36 Atmosphären.

*

Es ist begreiflich, daß man in der Jugendzeit der Dampfmaschine, als gute Baustoffe noch nicht zur Verfügung standen und keine Erfahrungen über vorteilhafte Herstellungs-Methoden und -Formen vorlagen, sich nicht getraute, Dampfspannungen anzuwenden, die erheblich über dem Atmosphärendruck lagen. Wir wissen, daß Watt sein Leben lang mit Spannungen von weniger als 2 Atmosphären gearbeitet hat.

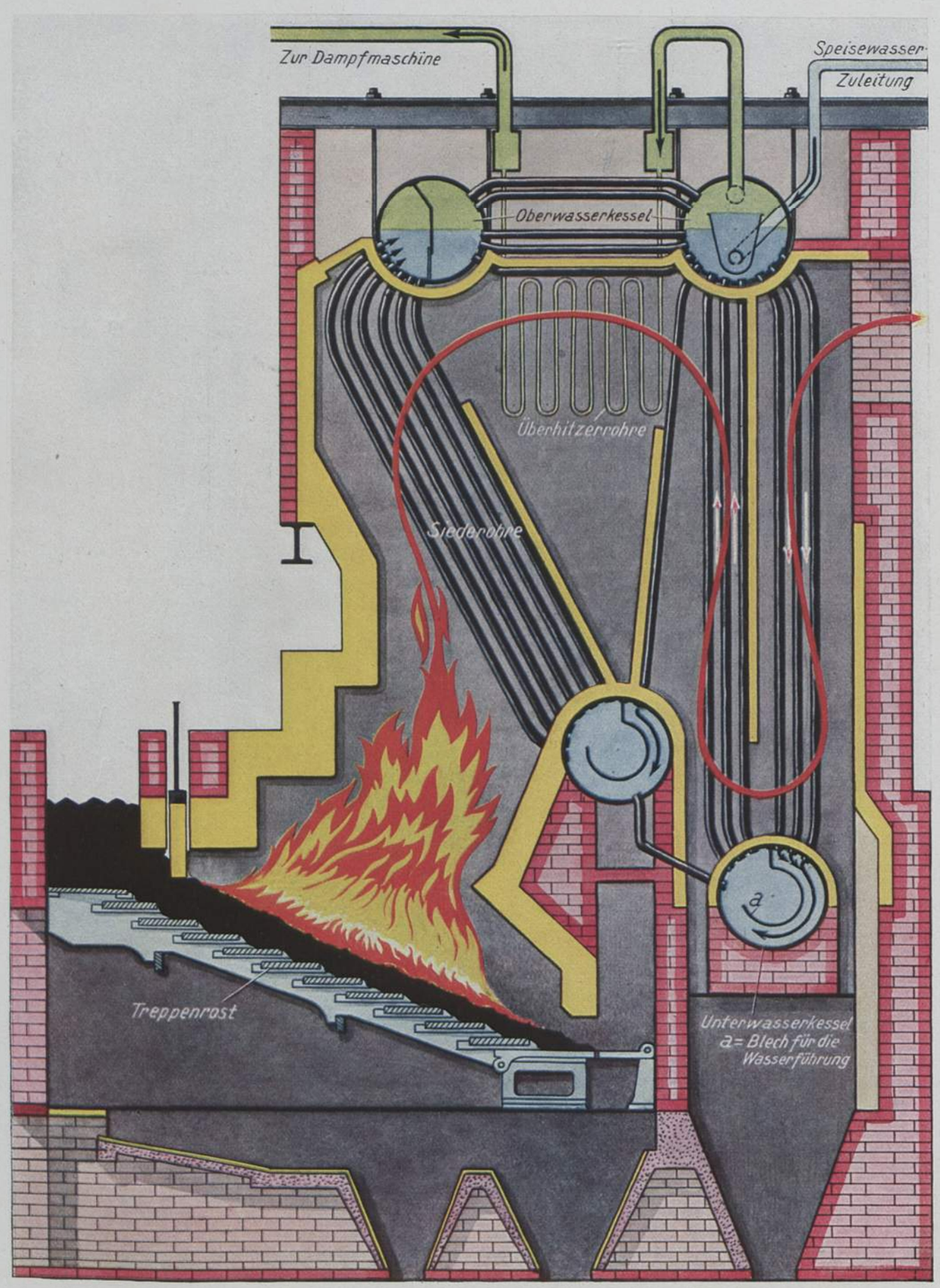
Die ältesten Newcomen-Maschinen erhielten den Dampf noch aus den Kesseln, die tatsächlich nichts anderes waren als große runde Kochtöpfe. Man begnügte sich zuerst damit, diese durch einen flachen, lose aufgelegten Deckel zu verschließen, der häufig nur eine Granitplatte war. Kessel, die ganz aus Steinen gefertigt waren, ja Dampfgefäße aus Holz sind gar nicht so selten angewendet worden. Die feuerberührten Böden hölzerner Kessel mußten natürlich geschützt werden; sie wurden mit Eisenblech beschlagen.



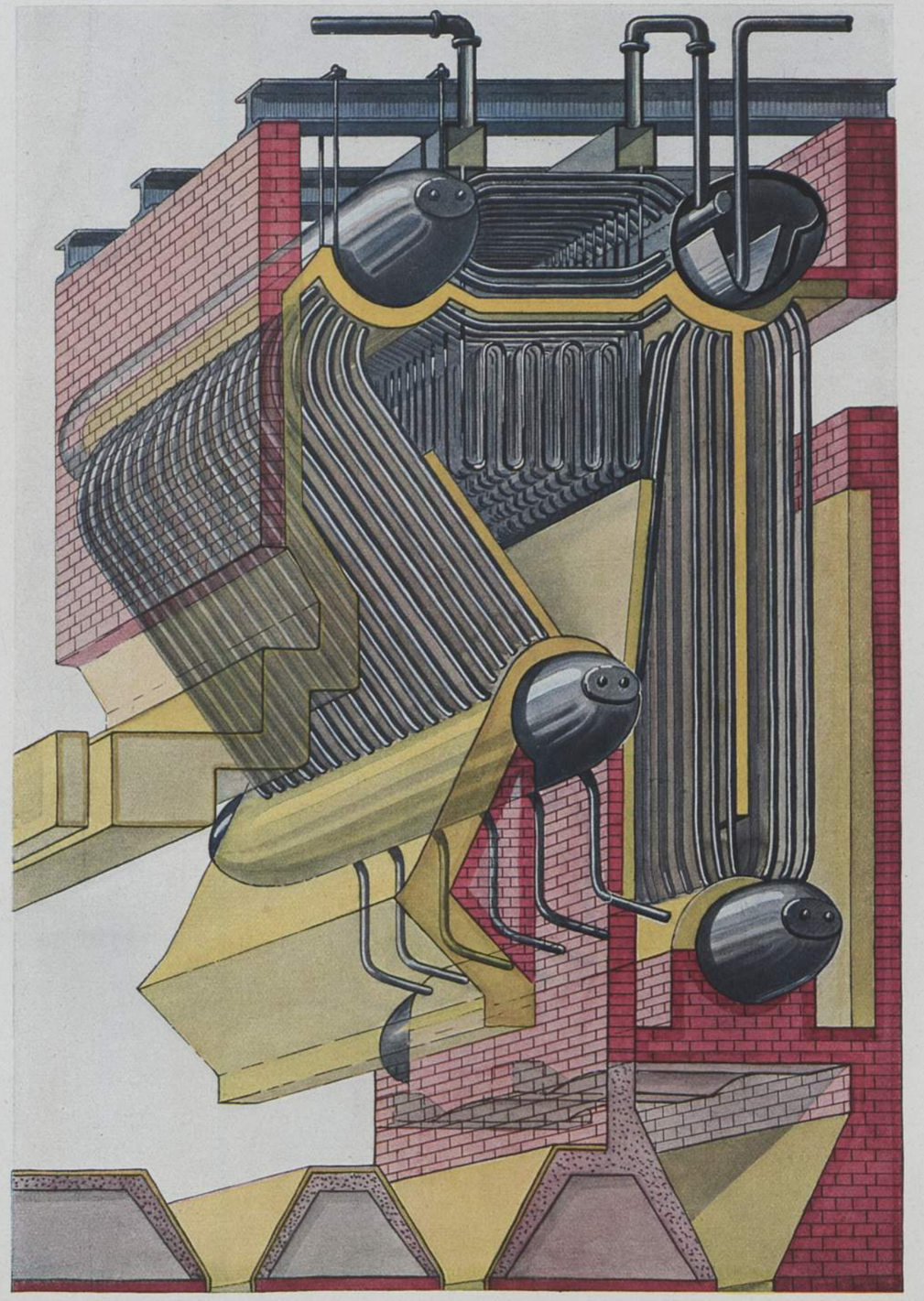

484. Drei Mehrfach-Walzenkessel zu einem Batteriekessel verbunden
Der Weg der Heizgase wird durch eingebaute Querwände geregelt

Der Vater Trevithicks soll dann um 1770 die gewölbte Kesselhaube aus Metall eingeführt haben. Sie gab dem Gefäß einen ordentlichen Verschluß und vergrößerte zugleich den Dampfraum. Die schwierigen runden Wandformen ließen sich damals nur aus Gußeisen herstellen. Die Kessel hatten einen gewölbten Boden, unter dem sich die Feuerung befand. Das Gewicht des Gefäßes ruhte auf einer Einmauerung, von welcher der Feuerraum umschlossen wurde (Bild 305, Seite 173).

Watt brauchte für seine Maschinen mit höherer Leistungsfähigkeit größere Kessel. Er verließ die runde Form und machte die Gefäße lang gestreckt. Wegen ihrer Ähnlichkeit mit einem Koffer der damals üblichen Bauart wurden sie Kofferkessel genannt (Bild 479). Von dieser Art waren auch die ersten Dampferzeuger auf Schiffen. Kofferkessel mit geraden Seitenwänden zeigten jedoch keine genügende Widerstandsfähigkeit gegen den Innendruck. Watt ging daher später dazu

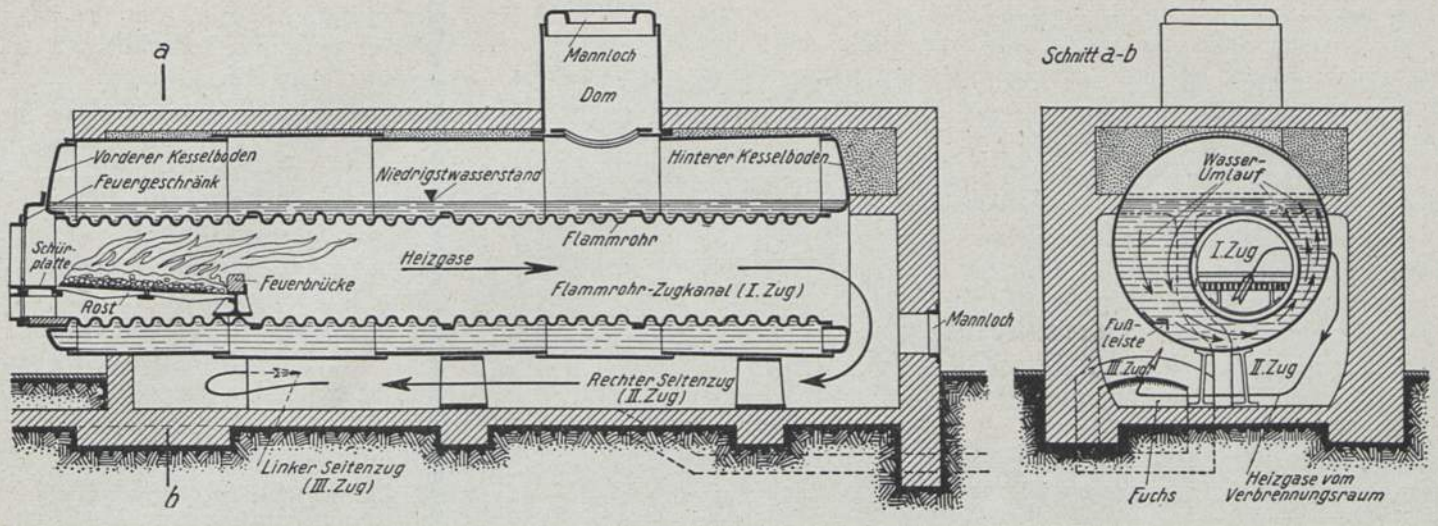



1. Schnitt durch die Kesselanlage mit Anordnung der Feuerzüge.
Rote Linie: Weg der Heizgase — Schwarze und weiße Pfeile: Wasserumlauf — Pfeile im grünen Grund: Dampfumlauf



2. Perspektivische Ansicht des Kessels mit dem Mauerwerk

Steilrohrkessel
Bauart von L. & C. Steinmüller, Gummersbach (Rheinland)




485. Cornwall- oder Flammrohrkessel

über, die Seitenwände ebenso nach innen zu wölben, wie man es bereits früher mit dem Boden getan hatte, um ihm größere Steifigkeit zu geben (Bild 480).

In dieser Form sind dann die Kessel lange Zeit verwendet worden, bis die immer weiter steigenden Dampfdrücke Konstruktionen völlig anderer Art notwendig machten. Es wurde deutlich, daß Hochdruckkessel am besten in Zylinderform gebaut werden. Sie ist bis zum heutigen Tag herrschend geblieben.

Der Zylinder fordert für bestimmten Inhalt und bestimmten Druck die geringste Wandstärke, was mit den Regeln der Festigkeitslehre leicht zu beweisen ist. Das Gefäß läßt sich durch kaltes Biegen flacher Bleche leicht herstellen, während alle anderen Kesselformen schwierige Bearbeitung der Platten in warmem Zustand erfordern. Alle modernen Kessel sind daher, so verschieden ihr Aussehen auch sein mag, beinahe ausschließlich aus zylindrischen Teilen zusammengefügt. Ausnahmen, die durch konstruktive Sonderforderungen erzwungen sind, finden sich nur bei den Lokomotiven, deren Feuerkisten gerade Wände haben, und bei den Wasserrohrkesseln in den hinten und vorn abschließenden Kammern. Gußeisen, das nicht verläßlich ist, wird heute als Kesselbaustoff nicht mehr verwendet. Die Wände bestehen immer aus Schmiedeisen oder Stahl.

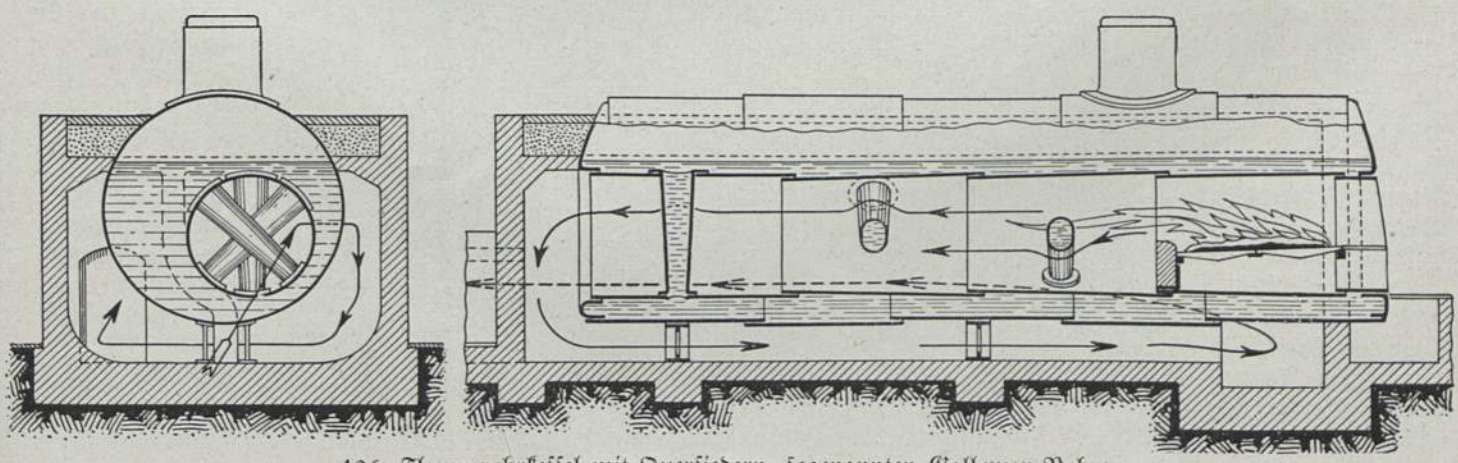
Bild 481 sei als Wegweiser den folgenden Ausführungen vorangestellt. Es zeigt in einer Übersichtszeichnung den Gesamtbau einer Dampfkesselanlage mit dem wichtigsten Zubehör. Als Behälter ist die einfachste Kesselart gewählt, ebenso hat die Feuerung die schlichtesten Formen. Trotzdem kann allgemein Gültiges an Hand des Bildes besprochen werden.

Der Heizer hat an seinem Platz die Vorderwand der Kesseleinmauerung vor sich. Diese wird droben von dem Vorkopf des Kessels durchdrungen. In bequemer Höhe darunter liegt das Feuergeschränk. Es besteht aus einem breiten, schweren, gußeisernen Rahmen, der im Mauerwerk befestigt ist, der Feuertür, Aschenfalltür und der Schürplatte vor dem Rost; diese dient dem Heizer zum Auflegen der Schürrisen, krücken- oder hakenförmiger Geräte.

An die Schürplatte schließt sich der Rost, dessen Fläche ein wenig nach hinten geneigt ist. Er ist aus einzelnen Stäben gebildet, die einander nur mit schmalen Ansätzen berühren, so daß lange Spalte dazwischen liegen. Die Roststäbe sind auf Trägern gelagert, deren Stütze wieder das Mauerwerk ist. Asche und kleinstückige Rückstände, die sich beim Verbrennungsvorgang bilden, sinken durch die Rostspalte nach unten in den Aschenfall. Dieser wird von Zeit zu Zeit durch die davor liegende Öffnung geleert.

Bei großen Kesselanlagen befindet sich im Boden des Aschenraums eine Öffnung, die für gewöhnlich durch einen wagerechten Schieber verschlossen ist. Wenn dieser aufgezogen wird, stürzt der Abfall in einen untergesetzten Wagen und kann auf diese Art bequem beseitigt werden, ohne daß eine lästige Staubentwicklung am Heizerstand stattfindet.

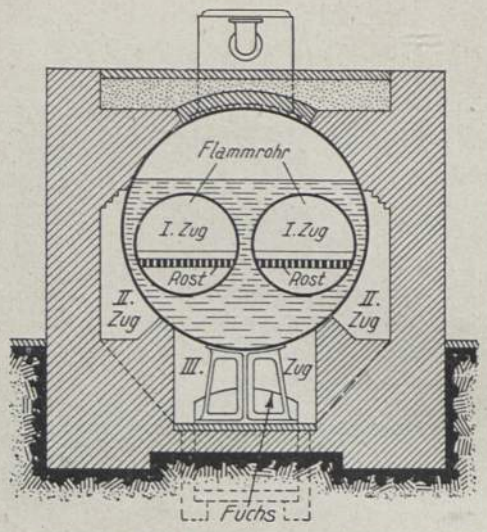
Den Abschluß des Verbrennungsraums nach hinten bildet die Feuerbrücke, eine kräftige, 30 bis 40 Zentimeter hohe, auf



486. Flammrohrkessel mit Quersiedern, sogenannten Galloway-Rohren

das Mauerwerk gesetzte Leiste aus feuerfesten Steinen. Sie hat unter anderem die Aufgabe, das Abfallen von Teilen der Rostbeschickung in die weiter hinten liegenden Räume zu verhindern.

Die Mauern, welche die gesamte Anlage kastenförmig umschließen, vermindern nach Möglichkeit die verlustbringende Wärmeausstrahlung zur Außenluft. Sie hüllen den eigentlichen Kessel ein und umgeben auch das Feuer so, daß die von den Brennstoffen entwickelte Hitze hauptsächlich an die Kesselwandung abgegeben wird. Die gleichzeitige Erwärmung des Mauerwerks selbst läßt sich natürlich nicht vermeiden. Würde aber das Feuer offen brennen, so wären die Wärmeverluste so groß, daß der Kessel das von ihm Verlangte nicht leisten könnte.




487. Schnitt durch einen Zweiflammrohrkessel
mit Anordnung der Feuerzüge

Zur Unterhaltung des Verbrennungsvorgangs ist die Zuleitung von Luft, genauer gesagt von großen Mengen Sauerstoff erforderlich, der aus der Luft genommen wird. Am Hinterende des Kessels wird daher ein Unterdruck erzeugt, der ständig Luft durch Spalte des Rostes und das darauf liegende Brennmaterial hindurchsaugt. Die Luft tritt durch die Aschenfalltür ein, die gleichzeitig ein Regelorgan ist. Sie kann in verschiedenen Lagen festgestellt werden, und die Größe des Durchgangsquerschnitts zwischen ihrem unteren Rand und dem Mauerwerk der Vorderwand beeinflußt die in der Zeiteinheit dem Rost zuströmende Luftmenge.

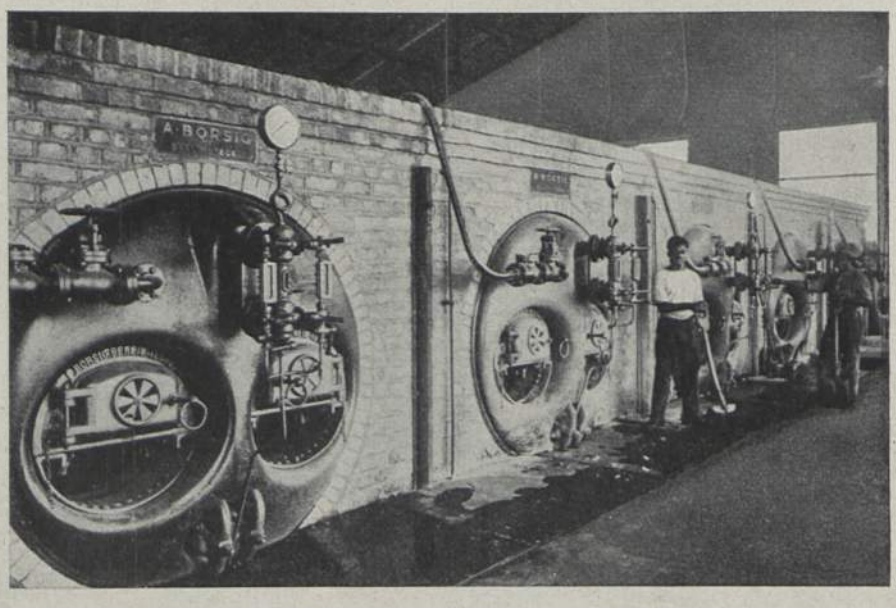
Man läßt nicht nur gerade so viel Luft zuströmen, daß der in ihr enthaltene Sauerstoff vollständig in der aufgelegten Brennstoffschicht verbraucht wird, sondern gibt einen Überschuß, so daß Sauerstoff in erheblichen Mengen auch noch in den darüber liegenden freien Raum gelangt. Hier ermöglicht er den brennbaren Gasen, die sich aus dem Feuerungsstoff entwickeln, die Verbrennung und sorgt auch dafür, daß möglichst wenige der vom Luftzug emporgerissenen rußbildenden Kohlenstoffteilchen unverbrannt weiter ziehen.

In dem Feuerraum herrscht eine Temperatur von etwa 1200 Grad. Der Kessel erhält Wärmezufuhr unmittelbar durch die Strahlung des Feuers und weiter durch die Heizgase, die über die Feuerbrücke hinwegstreichen und ihn umspülen. Auf unserem schematischen Bild gehen die Heizgase geradenwegs unter dem Kessel entlang und werden dann abgeführt. In Wirklichkeit kommt ein so rascher Abfluß nicht vor, denn er würde einen nicht zu verantwortenden Verlust bedeuten. Die nach der gezeichneten Art geleiteten Heizgase hätten beim Eintritt in den Rauchkanal noch eine Temperatur von etwa 700 Grad, also einen sehr erheblichen Wärmebesitz, der für die Einwärmung des Kessels verloren ginge.

Deshalb spart man in der Mauerung nicht bloß Einen Gang für die Gase aus, sondern sieht deren mehrere vor. Bei den meisten Anlagen einfacherer Art werden die Gase dreimal am Kessel entlang geführt. Sie streichen zum Beispiel erst unterhalb des Kessels nach hinten, kehren in einem ausgesparten Verbindungsgang am Kesselende um, gehen auf der linken Seite wieder nach vorn und werden, nachdem sie am vorderen Abschluß vorübergestrichen sind, auf der rechten Seite endgültig zum Rauchkanal geführt. Die Aussparungen im Mauerwerk, die das Fließbett für die Gase bilden, nennt man Feuerzüge oder kurz Züge. Die gesamte Zuganlage ist eine in drei Ebenen sich krümmende Schlange und kann daher in einer Übersichtszeichnung nur schwer dargestellt werden. Auf den Bildern 482 und 483 ist eine Veranschaulichung versucht.

Im Verlauf der späteren Ausführungen werden wir zahlreiche verschiedenartige Zuganordnungen an Hand von Querschnittbildern kennenlernen. Häufig führt der erste Zugkanal auch durch das Innere des Kessels hindurch.

Der Oberrand des höchstgelegenen Zugs muß nach gesetzlicher Vorschrift mindestens zehn Zentimeter unter dem niedrigsten für den Kessel zugelassenen Wasserstand liegen. Es ist notwendig, die Kanäle so geräumig zu machen, daß ein Mensch in liegender Stellung überall hineingelangen kann; die Züge müssen, wie der technische Ausdruck lautet, befahrbar sein. Denn es sammeln sich in ihnen Ruß und Flugasche an, die von Zeit zu Zeit beseitigt werden müssen. Selbstverständlich kann ein Befahren der Züge nur dann erfolgen, wenn die Anlage stillgesetzt, der Kessel kalt geworden ist. Mannlöcher, die an verschiedenen Stellen im Mauerwerk vorgesehen und durch gußeiserne Türen verschlossen sind, ermöglichen das Eindringen in jeden Teilstrang.




488. Batterie von Zweiflammrohrkesseln
A. Borsig, Berlin-Tegel

In den langen Zügen geben die Feuergase nun einen sehr beträchtlichen Teil ihres Wärmeinhalts an den Kessel ab. Sie gelangen in den Rauchkanal mit 250 bis höchstens 300 Grad. Der jetzt noch entstehende Wärmeverlust muß in Kauf genommen

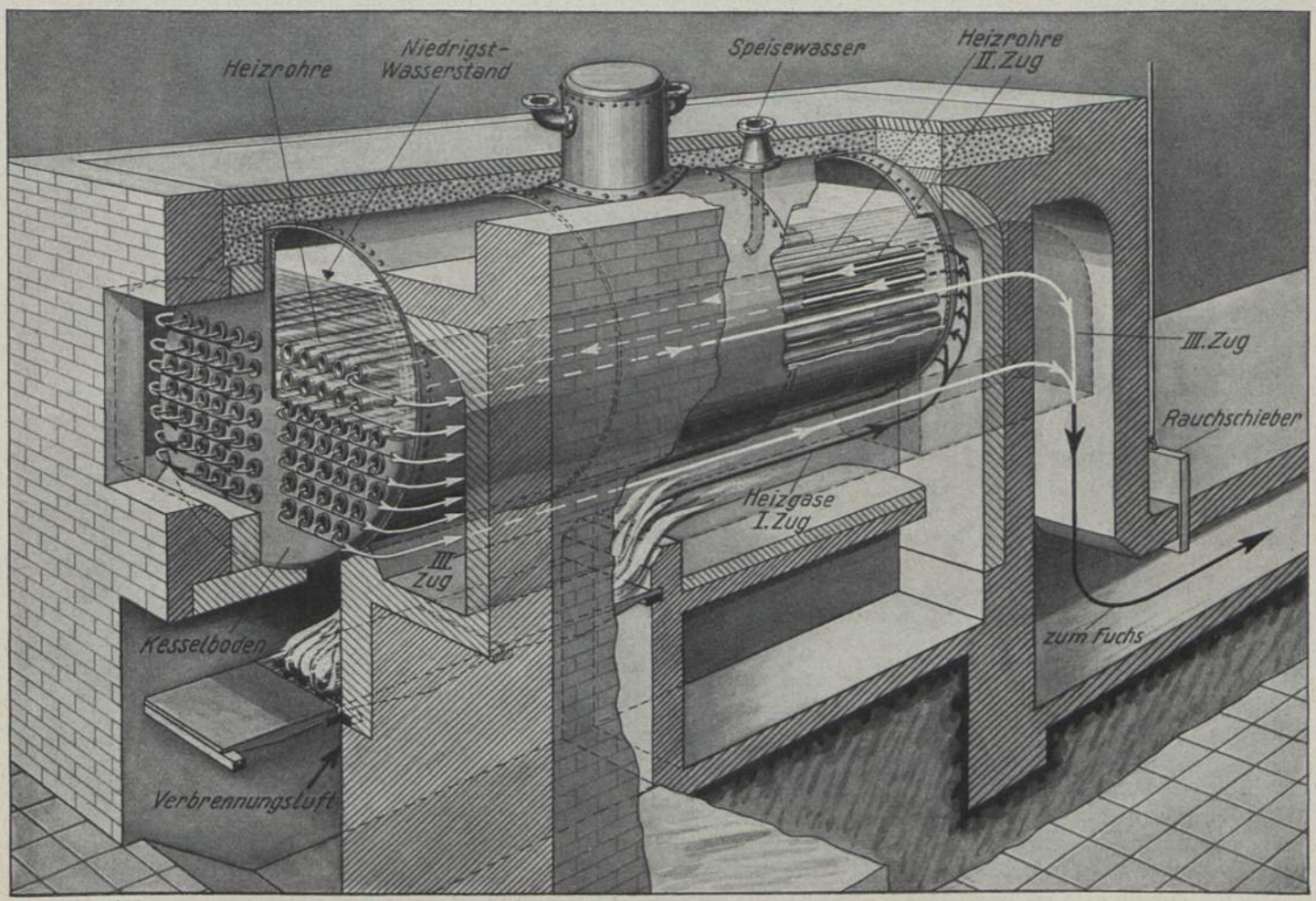
werden, da er für ein kräftiges Ansaugen der Verbrennungsluft unbedingt erforderlich ist. An den Rauchkanal schließt sich ein meist wagerecht laufender Gang, der Fuchs, der zum Schornstein führt. Der heiße, in dessen Innerem aufsteigende Gasstrom ist auf später zu erörternde Art der Erzeuger des saugenden Unterdrucks.

Im Fuchs befindet sich eine Klappe, die mittels Kette vom Heizerstand her aufgezogen oder hinabgelassen werden kann. Indem der Wärter mit diesem Rauchschieber den freien Durchgangsquerschnitt des Fuchses bald verengt, bald vergrößert, regelt er sehr viel wirksamer als durch die Einstellung der Aschfalltür die Luftzufuhr für die Feuerung.

Der Teil der Kesselwandung, der innen vom Wasser

Unten befindet sich der Wasserraum, der stets mit Flüssigkeit gefüllt ist. Jeder Kessel hat einen genau vorgeschriebenen Niedrigstwasserstand, den der Wärter nicht unterschreiten darf, wenn er sich nicht einer groben, nach dem Gesetz mit Strafe belegten Pflichtverletzung schuldig machen will. Denn es entstünde in solchem Fall die Gefahr, daß stark erhitzte Kesselteile in Glut geraten, erweichen und durch den Innendruck zersprengt werden.

Über dem Niedrigstwasserspiegel liegt der Speiseraum, der wechselnd bald Wasser, bald Dampf enthält. Bei hochgespeistem Kessel befindet sich Wasser darin; wenn dieses bis zur Untermarke abgesunken ist, Dampf. Der Höchstwasserstand ist nicht genau bestimmt, da seine Überschrei-




489. Heizrohrkessel

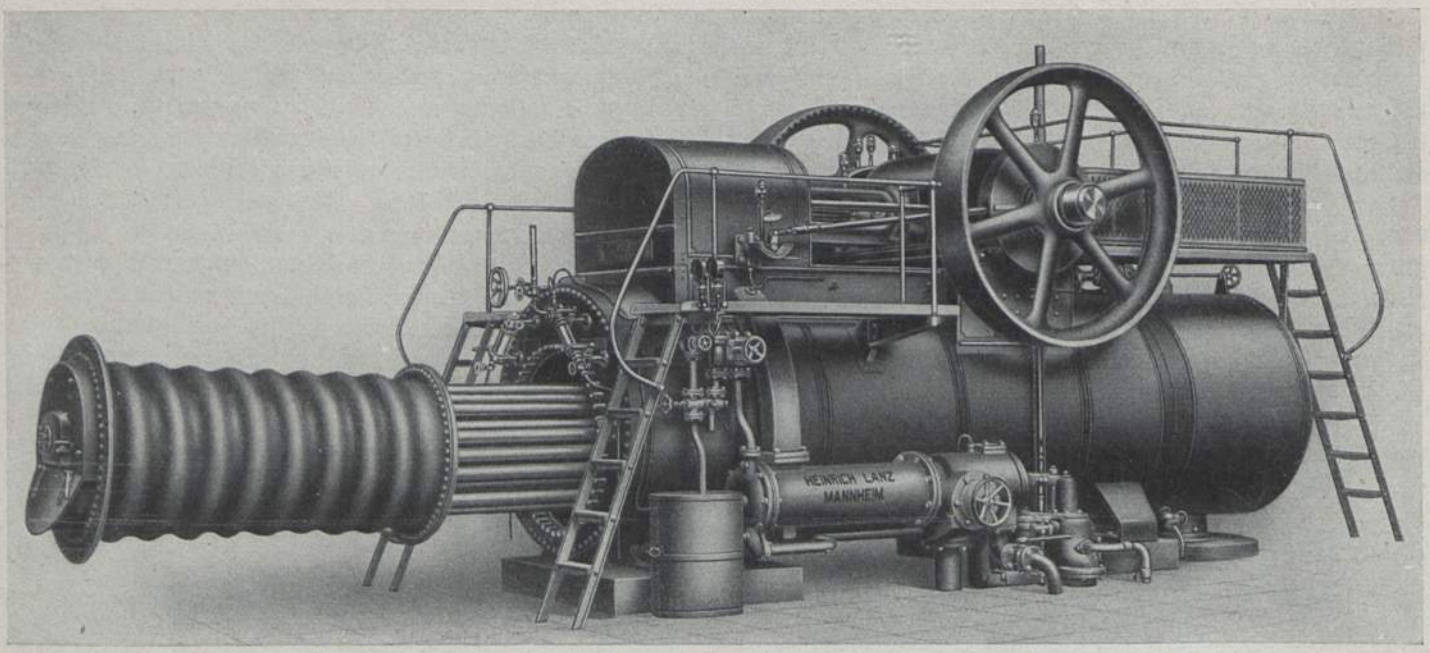
bedeckt, außen von den Heizgasen bestrichen wird, heißt die Heizfläche. Von ihrer Ausdehnung ist die Menge des stündlich entwickelten Dampfs, also die Leistungsfähigkeit des Kessels, hauptsächlich abhängig. Die Größe der Heizfläche wird daher von den Fabriken für jede erzeugte Kesselart genau angegeben. Die Dampfentwicklung hängt aber weiter auch von der Art des Feuerns ab. Ein sehr kräftiges Feuer läßt natürlich in der gleichen Zeit mehr Dampf im Kessel entstehen als ein niedrig gehaltenes. Darum ist die Nennung der Heizflächengröße keine eindeutige Angabe über die Leistungsfähigkeit einer Anlage.

Der Kessel im engeren Sinn, also das von den eisernen Wänden allseitig umschlossene Gefäß, enthält drei übereinander liegende Räume, die aber nicht durch Zwischenwände voneinander getrennt sind.

tung keine Gefahr bringt, wohl aber einen Stillstand der Maschinenanlage hervorrufen kann, weil der Kessel alsdann nicht genügende Dampfmengen liefert.

Bei regelrechtem Betrieb ist also der Oberteil des Kessels stets mit Dampf gefüllt. Der Dampfraum darf nicht zu klein bemessen sein, damit der Dampf einigermaßen ruhig abströmen kann. Er soll, nachdem er eben aus dem Wasser entstanden ist, Zeit haben, die mitgerissenen feinen Wassertröpfchen abzusetzen. Denn in die Maschine muß möglichst trockener Dampf gelangen, weil das in die Zylinder oder die Turbinenkammern eindringende Wasser schädigend wirkt, den Wirkungsgrad der Maschine hinabmindert.

Um einigermaßen trockenen Dampf zu gewinnen, bringt man das Entnahmerohr, das zur Maschine führt, stets am Scheitel des Kessels an. Nicht selten ist gerade wie bei den Loko-




490. Heißdampf-Lokomobile mit teilweise ausgezogenem Heizrohrkessel
Bauart Heinrich Lanz, Mannheim

motiven auch bei den ortfesten Kesseln ein Dom aufgesetzt, der zugleich den Dampfraum etwas vergrößert. Hier ist auch das Sicherheitsventil angebracht, das zu hohes Ansteigen des Dampfdrucks verhindert, indem es in solchen Fällen selbsttätig einen Ausgangsquerschnitt freigibt. Das Hauptabsperrventil liegt am Beginn des Entnahmerohrs, eine zweite Sperrvorrichtung befindet sich an anderer Stelle der Leitung, wo sie bequem zugänglich ist.

Fast alle Kessel sind nach hinten geneigt und am tiefsten Punkt mit einem verschließbaren Ablaß versehen, damit das Gefäß für Ausbesserungen und Untersuchungen völlig entleert werden kann. Das Speiserohr, durch das dem Kessel das Wasser zugedrückt wird, ist meist hinten und von oben her eingeführt. Seine Öffnung muß stets einige Zentimeter unter dem Niedrigstwasserstand liegen. Der Dom oder eine andere Stelle des Kessels erhält eine durch fest aufschraubbaren Deckel zu verschließende Öffnung, das Mannloch, durch welches das Kesselinnere befahren werden kann.

Die sehr verschiedenen Anforderungen, die im neuzeitlichen Dampfmaschinenbetrieb an die Kessel gestellt werden, haben zahlreiche Formen entstehen lassen. Ein Kessel, dem bald viel, bald wenig Dampf entnommen werden soll, muß anders ausgebildet werden als ein solcher, der gleichmäßig beansprucht wird. Das eine System eignet sich zur Abgabe großer Dampfmengen, das andere mehr für geringere Ansprüche. Die Forderung der raschen Anheizbarkeit hat Sonderarten hervorgerufen, ebenso der Wunsch, hohe Dampfdrücke gefahrlos erzeugen zu können. Nicht unwichtig ist auch die Platzfrage. Wo viel Raum zur Aufstellung des Kessels zur Verfügung steht, kann man eine einfachere Gestaltung wählen, als wenn der Platz beschränkt ist.

Große Dampfmengen, die ohne Schaden rasch abgezapft oder langsam ausgelassen werden können, enthält der einfache Walzenkessel. Er ist nichts weiter als ein zylindrisches Rohr, aus genügend starken Blechen gefügt, vorn und hinten durch einen gewölbten Deckel verschlossen. Seine Herstellung ist einfach und billig, die Wartung leicht. Man fertigt ihn in sehr bedeutenden Größen bis zu 2 Metern Durchmesser und 10 Metern Länge an.

Diese Grundform des Großwasserraum-Kessels wird jedoch heute nur noch selten ausgeführt, weil das Gewicht des Gefäßes, bezogen auf seine Heizfläche, sehr groß ist, und weil er viel Raum in Anspruch nimmt. Das Anheizen nach Betriebspausen dauert sehr lange, da jedesmal große Wassermengen, die sich nicht bewegen, zum Kochen gebracht werden müssen.

Günstiger liegen die Verhältnisse bereits bei dem Mehrfach-Walzenkessel. Er besteht aus zwei oder drei Zylindern, deren Achsen in einer Senkrechten liegen. Das oberste Gefäß springt so weit vor, daß die Feuerung darunter gelegt werden kann. Senkrechte Stutzen verbinden die Teile vorn und hinten miteinander. Beim Anheizen entwickelt ein solcher Kessel rascher Dampf als der einfache, insbesondere deshalb, weil bei ihm bereits ein recht lebhafter Umlauf des Wassers stattfindet. Sobald nämlich das im Oberkessel vorn liegende Wasser erwärmt ist, wird die hier auf die Unterkessel lastende Säule leichter als die gleiche Masse am Hinterende. Diese sinkt durch den hinteren Stutzen in den Unterkessel, drängt das darin befindliche Wasser nach oben, und so kommt immer wieder neues wärmeaufnahmefähiges Wasser in die stärkst beheizte Zone. Die Feuergase werden so geführt, daß sie erst den Ober- dann den Unterkessel bestreichen.

Wenn eine sehr große Heizfläche gefordert wird, dann ordnet man auch drei Walzenkessel übereinander an und setzt 2, 3, ja bis zu 9 solcher Reihen nebeneinander (Bild 484). Die Unterkessel bleiben unverbunden, aber die Dampfräume der Oberkessel werden durch ein querliegendes zylindrisches Gefäß, den Dampfsammler, zusammengeschlossen, der an die Stelle des Doms tritt.

Man nennt solche Anlagen Batteriekessel. Sie sind wohl zu unterscheiden von den Kesselbatterien, die aus mehreren völlig selbständigen, also nicht durch einen gemeinsamen Dampfsammler verbundenen Gefäßen bestehen. Während mehrere Batteriekessel eine gemeinsame Feuerung erhalten, wird jeder Teil einer Kesselbatterie gesondert befeuert.

Die Mehrfachkessel haben bei gleicher Heizfläche geringeres Gewicht als die einfachen, und sie beanspruchen weniger Grundfläche, während ihre Höhenerstreckung allerdings größer ist.

Die Walzenkessel, gleichgültig ob sie einfach oder mehrfach sind, können nur von außen her befeuert werden. Der zugehörige Verbrennungsraum liegt entweder unter dem Hauptkessel oder vor diesem. Unterfeuerung und Vorfeuerung haben aber den gemeinschaftlichen Nachteil, daß der Verbrennungsraum bei ihnen nur zu einem geringen Teil von Kesselwandung umgeben ist. Während der Anheizperiode sind die Heizgase gezwungen, auch das einhüllende Mauerwerk stark anzuwärmen. Die Dampfentwicklung würde rascher beginnen, und auch später würde die Ausnutzung der Feuergase wirtschaftlicher sein, wenn es möglich wäre, die Feuerung in den Kessel hineinzusetzen, sie so anzuordnen, daß sich ringsum Kesselwandung, wasserberührte Heizfläche, befindet.

Ein Kesselsystem solcher Art ist nun tatsächlich in der englischen Landschaft, der die erste Dampfmaschine diente, in Cornwall, entwickelt worden. Der Cornwall- oder Flammrohrkessel ist wohl noch heute der verbreitetste aller Dampferzeuger.

Das Flammrohr ist ein lichter Zylinder von 0,65 bis 1,1 Metern Durchmesser, der den Walzenkessel von vorn bis hinten durchzieht. Die Wandung des eingelegten Zylinders wird durch Flansche mit dem vorderen und hinteren Kesselboden verbunden. Die Feuerung befindet sich im Flammrohr selbst, und dieses bildet den ersten Zug für die Heizgase. Es kommt also deren gesamter Wärmeinhalt gerade dann, wenn er am stärksten ist, ausschließlich wasserberührten Wandungen zugute.

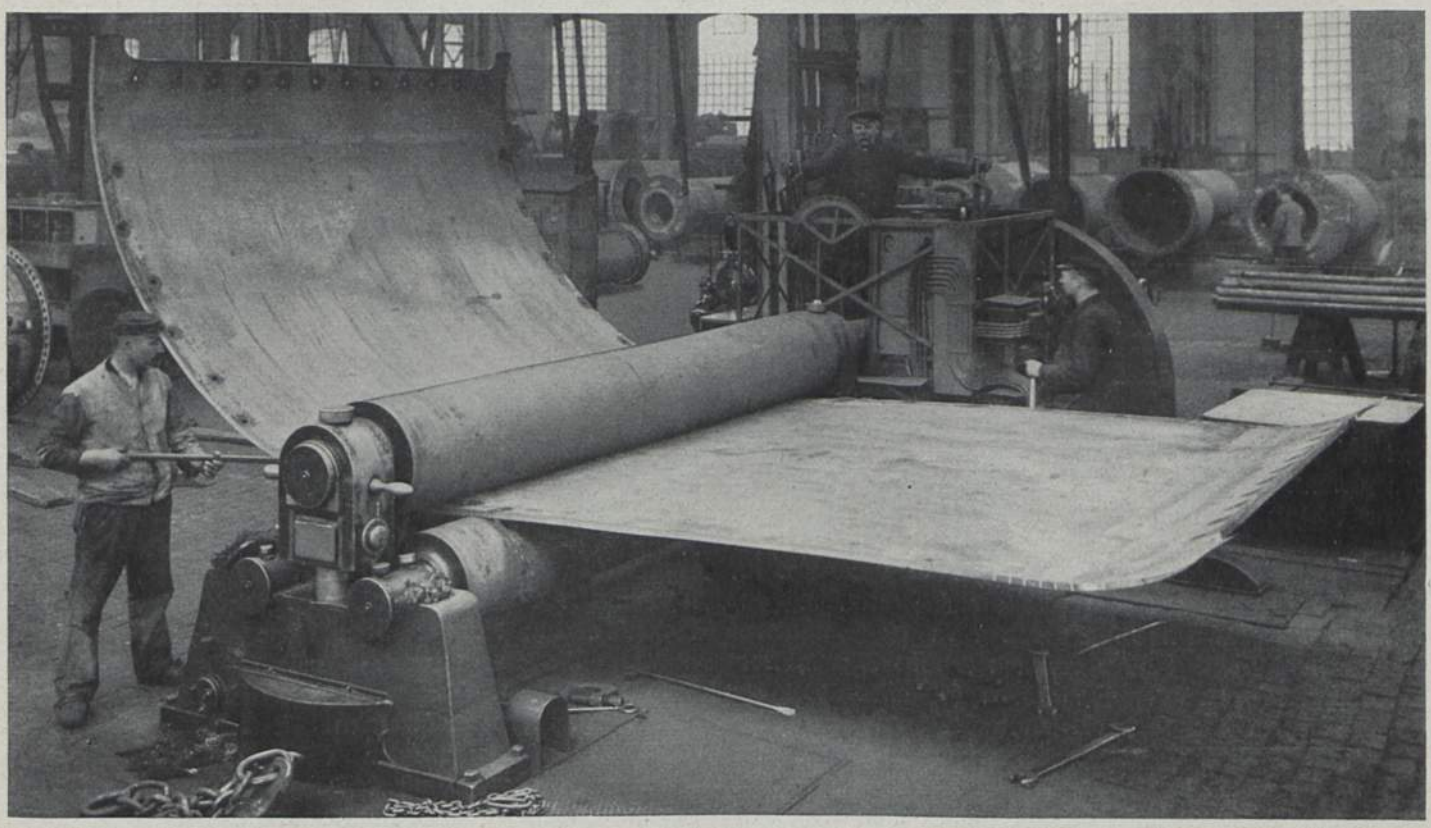
Früher pflegte man das Flammrohr in die Kesselmitte zu legen, heute wird es stets nach unten und zur Seite gerückt. Denn der Seitenrohrkessel hat einen lebhafteren Wasserumlauf. Die Bewegung findet in der Richtung der Pfeile statt, wenn man, wie auf Bild 485 dargestellt, den zweiten, außen entlangführenden Zug an die Rohrseite legt. Der dritte Zug führt alsdann auf der anderen Seite zum Fuchs.

Die seitliche Rohrlage bietet den weiteren Vorteil, daß der Kessel leichter befahrbar ist. Der Revisionsbeamte und die Reinigungsarbeiter können auf einer Fußleiste aus Winkeleisen, die meist vorgesehen wird, darin stehen; die tiefste Stelle, dort wo Schlamm und Kesselstein, die aus dem Speisewasser stammen, sich am stärksten abzulagern pflegen, ist bequem zugänglich.

Die Flammrohre sind nur in Kesseln mit geringem Dampfdruck in der einfachsten Weise aus zusammengenieteten, glatten Blechen gefügt. Wenn sie höheren Pressungen ausgesetzt sind, muß man ihre Rundsteifigkeit steigern. Dies geschieht dadurch, daß die Flammrohrwände eine gleichmäßig durchgehende Wellung erhalten. Die Wellen leisten dem Kesselinnendruck, der sie ausbeulen will, einen besonders starken Widerstand (Bild 485).

Obgleich Flammrohrkessel von mehr als 10 Metern Länge gebaut werden, braucht das durchgehende Rohr doch keine Unterstützung. Es kann von Boden zu Boden freitragend durchlaufen. Denn wenn der Kessel gefüllt ist, schwimmt das Rohr im Wasser. Es findet sogar ein Auftrieb des Hohlkörpers statt, der sich aber auf mancherlei Arten, zum Beispiel durch eine geringe Vergrößerung der Wandstärke, ausgleichen läßt. Hier und da ist in der Mitte des Kessels ein Rücken angebracht, auf den sich das Rohr auflegen kann, wenn das Wasser abgelassen ist. Damit die Bewegungen des Rohrs, die bei der Erhitzung stattfinden, hierdurch nicht behindert werden, läßt man den Rücken ein wenig unterhalb der Normallage des Flammrohrs enden. Dieses berührt die Stütze erst dann, wenn eine kleine unschädliche Durchbiegung nach unten stattgefunden hat.

Das kalt an die Böden geflanschte Rohr dehnt sich bei der Erwärmung aus. Die Deckel des Kessels dürfen hierdurch nicht zu stark beansprucht werden. Deshalb ist es gut, daß die

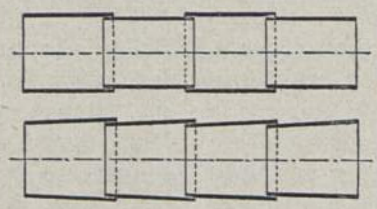


491. Blechbiegemaschine für Kesselbleche bis 30 Millimeter Stärke
R. Wolf A.G., Magdeburg-Buckau

gewellten Flammrohrwände die Dehnung bequem aufnehmen. Die Rohre können sich strecken oder kürzer werden, ohne daß an den Enden starke Zug- oder Druckkräfte auftreten.

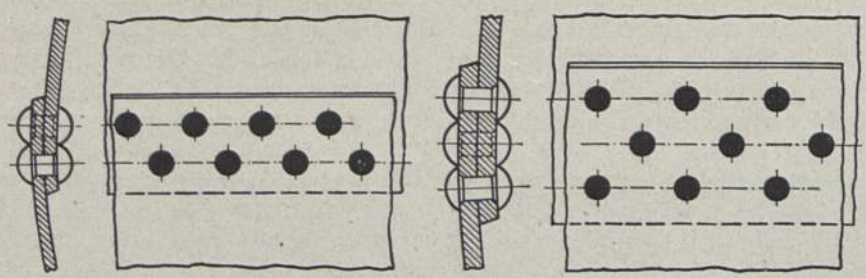
Wenn das Innere des Flammrohrs völlig frei ist, so strömen die Heizgase rasch und glatt hindurch. Der Wärmeinhalt der Gasmassen, die durch die Mitte des lichten Raums eilen, kommt oft nicht genügend an der Heizfläche zur Wirkung. Es werden darum Quereinbauten in die Flammrohre gesetzt, die ein Durcheinanderwirbeln des Gasstroms verursachen. Die am häufigsten verwendete Gattung solcher Quereinlagen stammt von Galloway. Er fügt Rohre ein, die gekreuzt angeordnet sind und Wasser enthalten (Bild 486). Diese Quersieder vergrößern den Wasserraum des Kessels und bilden auch innere Versteifungen des Flammrohrs. Dessen Befahrbarkeit ist allerdings damit aufgehoben, die Reinigung der Wände von Ruß und Flugasche muß nun durch Abblasapparate erfolgen.

Wenn die Rostfläche, die zur Bereitung genügender Dampfmengen erforderlich ist, nicht mehr in Einem Flammrohr untergebracht werden kann, dann werden zwei oder drei solcher Einlagen in den Kessel gesetzt, und jedes Rohr erhält eine besondere Feuerung. Die Zuganordnung für einen Zweiflammrohrkessel stellt Bild 487 im Querschnitt dar. Jedesmal bildet das Flammrohr den ersten Zug, alsdann streichen die Gase an den Seiten entlang und gehen unter dem Kessel zum Fuchs.



492. Reihung der Kesselschüsse

Gerade der Zweiflammrohrkessel (Bild 488) wird sehr viel angewendet, denn er ist noch verhältnismäßig einfach in der Konstruktion, sehr dauerhaft, braucht nicht allzu oft gereinigt zu werden und gestattet rasch wechselnde Entnahme von wenig oder viel Dampf, ohne daß der Wasserspiegel allzu lebhaft in Wallung kommt und den Dampf zu stark mit Tröpfchen durchsetzt. Die Notwendigkeit aber, große Heizflächen auf geringem Raum unterzubringen, die heute bei den hohen Kosten für den Grund und Boden von Fabrikbauten immer mehr hervortritt, hat zur Entwicklung von Kesselsystemen weit schwierigerer Bauart geführt.



493. Anordnung der Niete

Wenn man in einen Flammrohrkessel an Stelle von zwei oder drei Rohren mit großen lichten Durchmessern viele Rohre von geringen Querschnitten setzt, so vergrößert sich die Heizfläche bedeutend. Man erhält auf gleichem Raum einen Kessel von weit größerer Leistungsfähigkeit. Freilich muß nun auf den Vorteil der Innenfeuerung verzichtet werden, der Rost läßt sich nur außerhalb der Kesselwandung anordnen. Die schmalen Röhren von etwa 10 Zentimetern Durchmesser, die nicht mehr befahren werden können, werden Heizrohre genannt. Wir wollen festhalten, daß der Heizrohrkessel (Bild 489) ein Walzenkessel mit sehr vielen engen Flammrohren ist. Diese werden nicht mehr mit Flanschen an die Böden gesetzt, sondern durch besondere Vorrichtungen fest in die Deckel eingewalzt, indem man die Rohrenden unter Ausübung sehr starken Innendrucks etwas aufweitet.

Die Heizrohre bilden bei ortfesten Anlagen meist den zweiten Zug, weil sie allzu große Hitze schwer vertragen. Von der Feuerung streichen die Heizgase unter dem Kessel entlang nach hinten, alsdann durch die Rohre wieder nach vorn und darauf an beiden Seiten zum Fuchs. Die Wärmeabgabe an das Wasser ist trotzdem besser als bei Anwendung von Flammrohren, obgleich hierbei der erste Zug durch den Kessel führt, also die heißesten Gase durch dessen Inneres gehen. Denn infolge der geringen Rohrlichtweite und wegen der Vergrößerung der Abgabefläche findet in den Heizrohren eine weit innigere Berührung mit den von Wasser bedeckten Wandungen statt. Aus dem gleichen Grund lassen sich die Kessel dieses Systems recht rasch anheizen.

Die Heizrohrkessel werden besonders viel bei beweglichen Anlagen verwendet. Hierbei muß dem Bündel der engen Rohre aber stets ein Flammrohr oder eine Mehrzahl von diesen zugeordnet werden, weil bewegliche Kessel nicht eingemauert werden können. Die Flammrohre nehmen als erster Zug die heißesten Gase auf. Heizrohrkessel mit untergelagerten Flammrohren sind die Dampferzeuger für Schiffe, die in Band III auf den Seiten 164 und 165 dargestellt wurden. Die Heizgase streichen durch die Flammrohre nach hinten, ziehen durch die Heizrohre wieder nach vorn und gehen hier ausnahmsweise an der Vorderseite des Kessels in den Schlot.

Heizrohrkessel sind stets bei Lokomotiven zu finden. Bei ihnen ist das vorgelagerte Flammrohr nicht rund, sondern zu einer geradwandigen Feuerkiste erweitert. Band II enthält auf den Seiten 206 und 208 Näheres hierüber.

Heizrohrkessel haben endlich auch die Lokomobilen (Bild 490). Hier liegt das Flammrohr gleichfalls vor dem Heizrohrbündel; es hat aber jetzt die Grundform mit gewellten Wänden. Damit das Rohrsystem möglichst bequem von den außen sich ansetzenden Ablagerungen befreit werden kann, pflegt man es ausziehbar zu machen. Die gesamte Anordnung kann nach Lösung einiger Schrauben aus dem Gehäuse herausgenommen werden. Diese Einrichtung hat sehr viel zur Verbreitung der Lokomobilen als ortfeste Krafterzeuger beigetragen, worüber in Abschnitt 27 auf Seite 252 einiges gesagt ist.

Bei sämtlichen bisher behandelten Kesselarten ist das Gefäß, in dem sich Wasser und Dampf befinden, eine einheitliche große Walze. Die Wände solcher geräumigen Zylinder werden heute stets aus großen flachen Blechen hergestellt. Ein einzelnes Blech ergibt immer, wenn der Durchmesser des Kessels nicht allzu groß ist, eine volle Rundung. Um die gewünschte Länge zu erhalten, müssen mehrere Bleche aneinander gereiht werden. Man nennt diese einzelnen Abteilungen Schüsse. Die Zahl der Quernähte, also der Verbindungen, die kreisförmig um den Zylinderumfang herumlaufen, ist je nach der Kessellänge verschieden. Jeder Schuß besitzt jedoch, von den Riesenkesseln abgesehen, nur Eine Längsnaht.

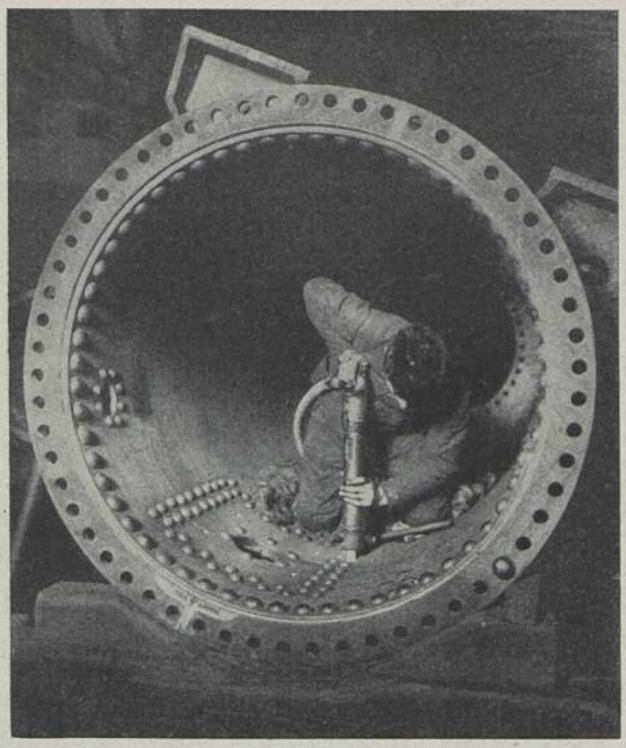
Als der Kesselbau sich vom Gußeisen abwandte, hatten die Ingenieure keine so bequemen Möglichkeiten. Es konnten damals

nur kleine Bleche hergestellt werden, die mit der Hand ausgeschmiedet werden mußten, weil Walzmaschinen noch nicht bekannt waren. Die so hergestellten Bleche zeigten starke Unregelmäßigkeiten in den Wandstärken, sie hatten keineswegs immer die gleiche Form. So entstanden Kesselwände, die heute aussehen, als seien sie das Ergebnis einer nachträglichen Flickarbeit. Der auf Bild 479 dargestellte Kessel von Watt ist ein Beispiel für die mühevolle Arbeit, die in jener Zeit in den Kesselschmieden geleistet werden mußte.

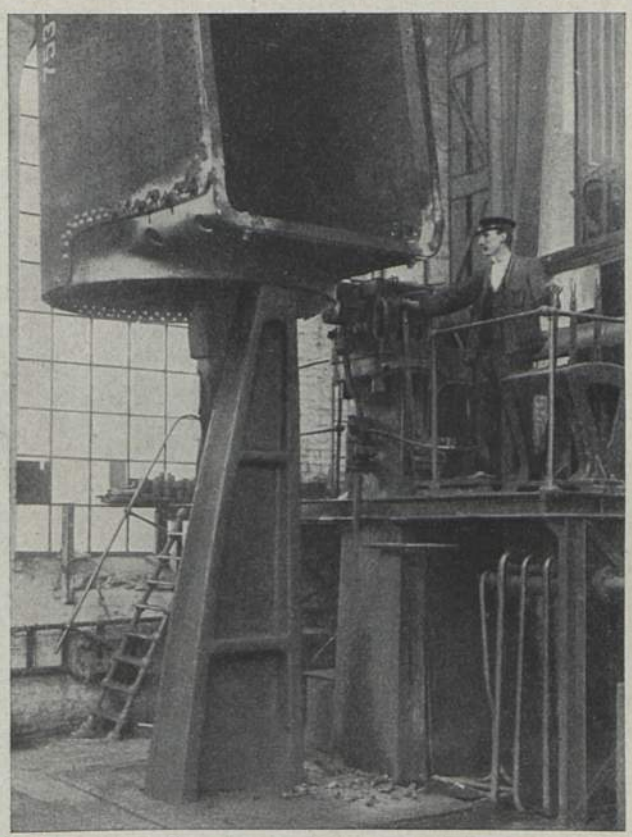
Wenn heute ein Kesselschuß hergestellt werden soll, dann wird ein Blech genommen, das in der Hütte genau und völlig gleichmäßig auf die gewünschte Dicke gewalzt und etwas länger ist als der abgewälzte Zylinderumfang. Das Blech kommt kalt auf die Biegemaschine (Bild 491). Diese hat zwei untere Walzen, die sich in festen Lagern drehen, während eine obere Walze verschiebbar gelagert ist. Indem diese dritte Walze immer tiefer in den Zwischenraum der beiden anderen niedergedreht wird, rundet sich das Blech beim Hin- und Herziehen mehr und mehr. Durch angelegte Schablonen wird festgestellt, wann die richtige Kreislinie erreicht ist. Die Endkanten des Blechs werden alsdann durch Handschmiedearbeit oder auf Pressen so gebogen, daß sie übereinander liegen.

Damit die Schüsse aneinander gereiht werden können, wobei der eine den anderen überlappen muß, gibt man entweder jedem zweiten einen kleineren Durchmesser als dem vorhergehenden und dem folgenden, oder man macht jeden Schuß leicht kegelförmig, so daß die Teile teleskopartig zusammengeschoben werden können (Bild 492).

Vorher sind bereits die Löcher gebohrt worden. Die Herstellung dieser Öffnungen durch das billigere Stanzen ist heute nicht mehr üblich, weil hierbei das Kleingefüge des Eisens rings um das Loch in ungünstiger Weise verändert wird, leicht kleine Einrisse entstehen, die später bei der Einwirkung des Drucks weiter gehen können. Das „Nähen" der Bleche auf eine andere Art als durch Nieten kommt nirgend mehr vor.



494. Nieten der Kesselbleche mittels Preßlufthammer
R. Wolf A.G., Magdeburg-Buckau



495. Nieten der Kesselbleche durch die feststehende hydraulische Nietmaschine
A. Borsig, Berlin-Tegel

Wie bereits bei der Besprechung des Schiffbaus in Band III auf Seite 149 gesagt wurde, ist das Niet ein eiserner Bolzen, dem bereits vor der Benutzung der eine Kopf angestaucht wurde. Warm wird der Schaft durch die genau aufeinander gelegten Löcher der zu vereinigenden Blechenden gesteckt und hierauf der zweite Kopf mittels rasch arbeitender Preßlufthämmer (Bild 494) oder durch die still aber machtvoll drückenden Stempel von Wasserpressen (Bild 495) hergestellt. Den starken Kraftwirkungen muß sich von der anderen Seite ein kräftiger Gegendruck entgegenstemmen. Das erkaltende Niet zieht alsdann die Blechenden sehr fest zusammen, während der Schaft das Bohrloch nicht völlig ausfüllt.

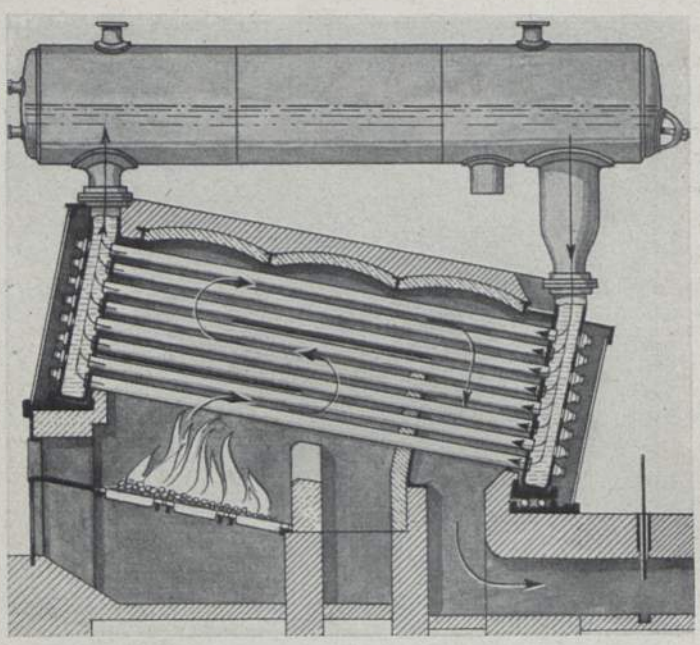
Für Kessel, die nur geringe Drücke auszuhalten haben, genügt schon eine Nietnaht an jeder Verbindungsstelle; sonst werden zwei oder drei Nähte meist in Zickzack-Anordnung hergestellt (Bild 493). Um die Dichtigkeit der Verbände zu erhöhen, wird die außenliegende Blechkante, die sorgfältig schräg gehobelt ist, durch Stemm-Meißel noch einmal kräftig auf das darunter liegende Blech niedergeschlagen.

Die Niet-Verbindungen haben immerhin den Nachteil, daß die Bleche durch die eingebohrten Löcher geschwächt werden müssen. Es wird daher immer mehr üblich, die Längsverbindungen durch Zusammenschweißen herzustellen. Man schreckt heute nicht mehr davor zurück, so große Feuer zu unterhalten, wie sie hierfür notwendig sind. Die Dampfhämmer und Schmiedepressen liefern genügend Kraft zur Vereinigung der glühend gemachten Blechenden.

Die gewölbten Kesselböden mit ihren vorspringenden Rändern werden gleichfalls aus ebenen Blechen hergestellt. Hierzu sind Preßvorrichtungen besonderer Bauart, gewaltige Kümpelpressen, notwendig, weshalb die Kesselfabriken die Böden gewöhnlich fertig von den Hüttenwerken beziehen.

Welche Schwierigkeiten es früher machte, die Kessel dicht zu bekommen, zeigen Berichte aus der Zeit, als Trevithick die ersten Hochdruckmaschinen baute.

„Auf der Herland-Grube", so erzählt Matschoß, „bliesen die Kessel so stark durch, daß man es kaum wagte, nahe an sie heranzutreten. Aufgelöstes Tauwerk wurde in die Fugen geschoben, aber das genügte nicht. Man mußte noch ganze Körbe voll Pferdemist und Kleie hineinstopfen. Dennoch war das Kesselhaus fast immer mit Dampf gefüllt. Trevithick ließ den Kessel mit Asche bedecken, damit die Maschinenwärter, die sich vor dem Hochdruckdampf fürchteten, diesen weniger sahen. Er selbst stand oft mitten in solcher Dampfwolke im Kesselhaus und arbeitete mit bewundernswerter Ruhe an seiner Maschine."



496. Wasserrohrkessel mit Anordnung der Feuerzüge

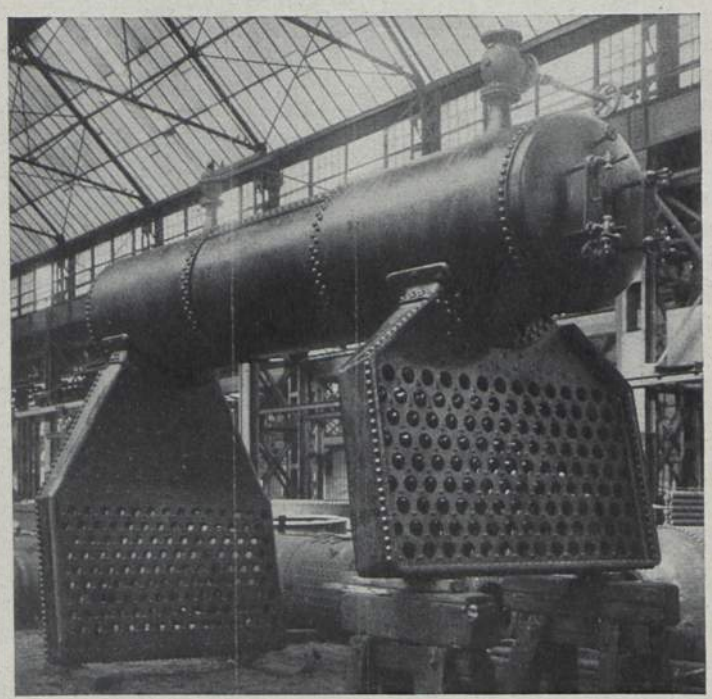
Sowohl in den Walzen- wie in den Flammrohr- und Heizrohrkesseln befinden sich Wasser und Dampf stets in zusammenhängender Masse in Einem Gefäß. Daher werden die Anordnungen mit dem gemeinschaftlichen Namen Großraumkessel bezeichnet. Eine Schwächung der Kesselwand, die so weit geht, daß der Innendruck einen Riß verursacht oder gar ein Stück heraussprengt, führt bei diesen Kesseln stets zu einer Katastrophe. In kürzester Zeit entladet sich der gesamte Inhalt durch die Öffnung, es entsteht eine Explosion.

Wäre es nicht möglich gewesen, eine Bauart zu finden, die Ereignisse solcher Art verhindert, dann hätte man wohl nie den Mut gefunden, höhere Dampfdrücke als etwa 15 Atmosphären anzuwenden. Es ist aber gelungen, Kessel so zu bauen, daß ohne Behinderung des Wasserumlaufs und der Dampfbildung doch eine sehr weitgehende Unterteilung des Gefäßes vorhanden ist. Von den Kopfenden abgesehen, befinden sich in solchen Behältern Wasser und Dampf an den Stellen, die von den Feuergasen bestrichen werden, also allein durchbrennen können, ausschließlich in dünnen Rohren.

Die Verbindungen zwischen diesen sind so eingerichtet, daß bei Verletzung einer Rohrwand nur immer der geringe Inhalt dieses einen Organs sofort nach außen dringen kann, während die Entleerung der anderen Teile verzögert nachfolgt. Als explosionssicher, wie sie wohl bezeichnet werden, sind diese Kessel trotzdem nicht anzusehen. Sie mindern aber die Gefahr selbst bei sehr hohen Drücken auf ein erträgliches Maß.

Die Wasserrohrkessel, von denen wir jetzt sprechen, haben zugleich das geringste Gewicht für das Quadratmeter Heizfläche, sie beanspruchen wenig Raum und lassen sich sehr rasch anheizen. Ihre Leistungsfähigkeit kann durch Anwendung scharf wirkender Feuerungen sehr gesteigert werden. Ohne die Wasserrohrkessel wäre es nicht möglich gewesen, Dampfmaschineneinheiten mit einer Leistung bis über 100000 Pferdestärken zu schaffen. Denn wenn der Dampf hierfür in Großraumkesseln erzeugt werden müßte, würden diese einen so bedeutenden Raum einnehmen, daß in den langen Zuleitungen zu der Maschine unerträgliche Verluste durch Kondensation entstünden. Man hätte, um dies zu verhindern, die Maschine in mehrere örtlich getrennte Einheiten zerlegen müssen. Der Hochleistungs-Wasserrohrkessel ist ein unentbehrlicher Genosse der Großturbine.

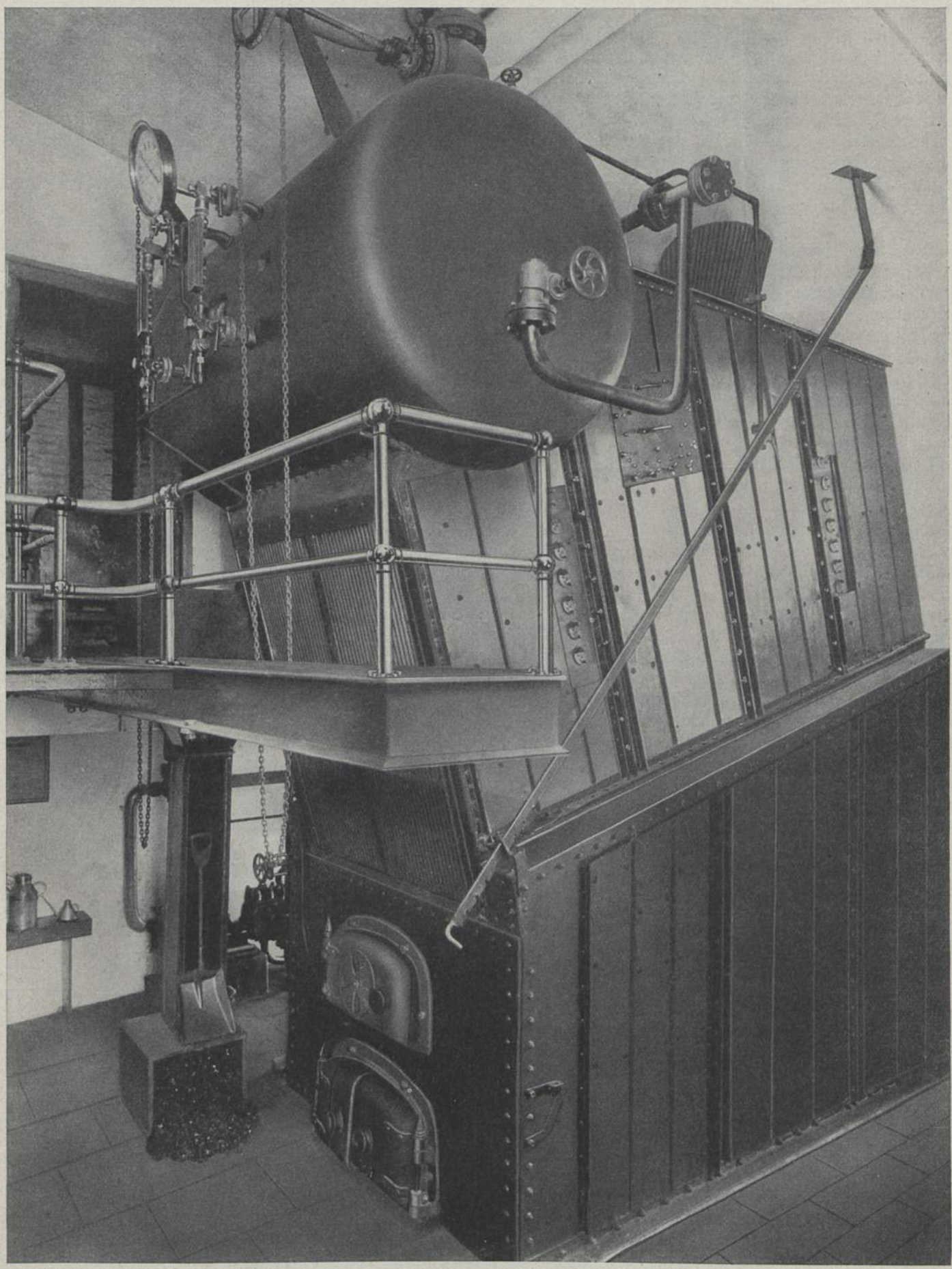
Man kann sich einen Kessel dieses Systems aus dem Mehrfach-Walzenkessel entstanden denken. Wird auf die Befahrbarkeit des walzenförmigen Gefäßes verzichtet, so kann dessen Durchmesser schrumpfen. Man läßt ihn nun gleich bis auf etwa 10 Zentimeter hinuntergehen und kann dann auf geringem Raum viele Dutzend nahtlos gezogener Rohre unterbringen, die eine sehr große Heizfläche ergeben. Sie sind vorn und hinten, gerade wie die Heizröhren, in je eine Platte eingewalzt, vor der aber nun eine allseitig geschlossene Kammer ausgebildet wird. Die Außenwand der Kammer (Bild 497) ist überall dort durchbohrt, wo gegenüber in der Innenwand ein Rohr endet. Die Löcher sind durch Deckel verschlossen.



497. Oberkessel eines Wasserrohrkessels mit den beiden Kammern
Die Heizrohre werden in die inneren Löcher der Kammern eingesetzt, die äußeren mittels Deckel verschlossen. A. Borsig, Berlin-Tegel

Bei unserem Kessel befindet sich das Wasser im Inneren der Rohre und in den Kammern. Das System ist nicht von einem eisernen Mantel umgeben, sondern liegt völlig frei in der Mauerung. Die Rohre sind entweder nach vorn oder nach hinten geneigt.

Ein Nachteil des Wasserrohrkessels ist es, daß er nur sehr geringe Wassermengen aufnehmen kann, woraus anderseits der Vorteil der raschen Durchheizbarkeit folgt. Er eignet sich also an und für sich nicht für schwankende



498. Hochleistungskessel von 82 Quadratmeter Heizfläche
Deutsche Babcock & Wilcox Dampfkesselwerke A.-G., Oberhausen (Rheinland)

Dampfentnahme. Dieser Fehler kann aber dadurch beseitigt werden, daß man einen geräumigen walzenförmigen Oberkessel aufsetzt, der von den Feuergasen nicht berührt wird und als Puffer dient. Es tritt damit wieder ein Großraum hinzu, dieser ist aber ungefährlich, da er ja nicht geheizt wird. Die Verbindung zwischen Unter- und Oberkessel wird durch Verjüngungen der Endkammern hergestellt. Der Oberkessel ruht in den Kammerhälsen, gegen die er sich je mit einem Schlitz öffnet.

Der Umlauf im Wasserrohrkessel ist durch die Pfeile in Bild 496 gekennzeichnet. Sämtliche Rohre, welche die Verbindung zwischen den beiden Kammern bilden, sind parallel geschaltet, so daß der Wasserstrom gleichmäßig durch alle hindurchdringen kann. Vorn bildet sich ein schaumiges Gemisch aus Wasser und Dampfblasen, das leichter ist als die hinten und tiefer liegende Wassermenge. Das Gemisch wird also durch den Kammerhals in den Oberkessel gedrängt, während aus dessen hinterem Teil, in den eingespeist wird, ständig Wasser nach unten fließt. Es kommt also auch hier immer wieder wärmeaufnahmefähige Flüssigkeit über die Feuerung.

Die Heizgasführung ist gleichfalls durch Pfeile in Bild 496 gekennzeichnet. Es werden nun nicht mehr Kanäle in der Mauerung ausgebildet, die Gase streichen vielmehr zwischen den Rohren hindurch, wobei sie die Wärme ausgezeichnet an die einzelnen dünnen Wasserzylinder abgeben. Um den Weg der Gase ausreichend zu verlängern, sind steinerne Längswände in der gezeichneten Art eingefügt.

499. Teilkammer eines Sektionskessels
A. Borsig, Berlin-Tegel

Es sei noch einmal zusammengefaßt: Flammrohre sind weite befahrbare Hohlräume, durch welche die Heizgase streichen; Heizrohre fassen ebenfalls Heizgase, sind aber eng; in den Wasserrohren, die auch Siederohre genannt werden, befindet sich das Wasser innen, sie werden außen von den Heizgasen umspült.

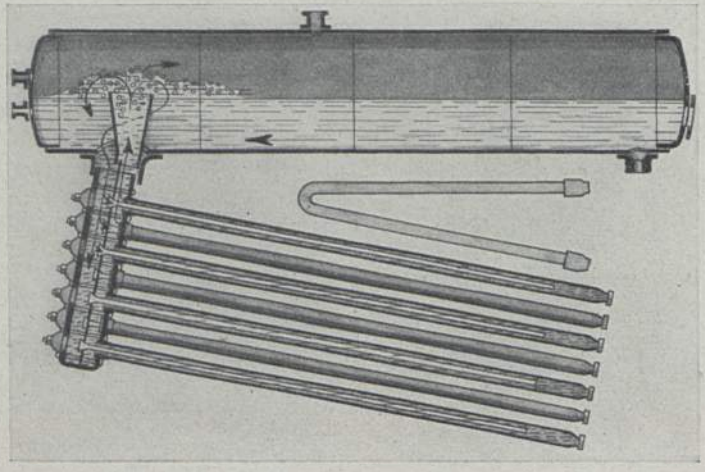
Die Kammern von Wasserrohrkesseln müssen geradlinige Wandungen haben, was für ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber hohem Druck nicht günstig ist. Die beiden Längswände werden daher durch Stehbolzen gegeneinander versteift, das sind starke Stifte, die mit Gewinden hüben und drüben eingeschraubt sind. (Siehe auch Band II, Seite 206.) Die Bohrungen in der Außenwand sind notwendig, damit man das Innere der Rohre durch entsprechend geformte Vorrichtungen reinigen kann. Auch ist es nur hierdurch möglich, ein schadhaft gewordenes Rohr hinauszuziehen und durch ein anderes zu ersetzen, ohne daß der ganze Kessel auseinandergenommen zu werden braucht.

Die Deckel sind so geordnet, daß der Druck sie an die Dichtungsflächen preßt. Sie haben daher einen größeren Durchmesser als die Löcher; sie werden von innen aufgesetzt und mittels Bolzen und Mutter von außen her gehalten. Die Mutter ruht auf einem federnden Bügel, dessen Spannung das Losewerden verhindert. Damit die gewöhnlich kreisrunden Deckel in die Kammer eingeführt werden können, muß mindestens Ein Loch in der Wand elliptischen Querschnitt haben. Ist die lange Achse der Ellipse größer als der normale Lochdurchmesser, so gehen die Deckel hier hindurch, und auch der Verschluß der elliptischen Öffnung selbst läßt sich einführen, wenn man hierbei die kurze Achse des Deckels in Richtung der langen Achse stellt.

Um die Explosionssicherheit der Wasserrohrkessel zu erhöhen, erschien es wünschenswert, die zusammenhängenden Großräume, die immerhin in den Endkammern vorhanden sind, zu unterteilen. Dies ist der Firma Babcock & Wilcox, die in New York, London und zu Oberhausen im Rheinland Fabriken unterhält, in ausgezeichneter Weise gelungen.

Eine wagerechte Verbindung der einzelnen Rohrreihen ist nicht notwendig. Der Wasserumlauf findet in ausreichender Weise auch dann statt, wenn nur die senkrechten Reihen zusammenhängen. Man teilte daher die Wasserkammern in viele senkrechte Abteilungen oder Sektionen auf, wodurch eine große Zahl selbständiger, in der wagerechten Reihung voneinander getrennter Kammern entsteht. In jeder dieser Sektionen enden vorn wie hinten zwei senkrechte Rohrreihen.

Es wäre am einfachsten gewesen, die Teilkammern als Kasten mit geraden Seitenwänden auszubilden. Dann hätten aber die Rohre der zwei in jeder Sektion zusammengefaßten senkrechten Reihen mit Zwischenräumen nebeneinander gelegen, es wären glatte Durchzugbahnen für die Feuergase entstanden, die ein allzu rasches Durchschlagen ohne Umstreichen jedes einzelnen Wasserrohrs ermöglicht hätten. Die Teilkammern haben deshalb die in Bild 499 dargestellte geschlängelte Form erhalten. Die beiden Rohrreihen sind nun ineinandergeschoben, die Heizgase müssen beim Aufsteigen ihre Richtung fortwährend ändern, werden durcheinandergewirbelt und geben weit besser ihren Wärmebesitz an die Rohrwandungen ab. Die schlangenförmigen Fugen zwischen den einzelnen Kammerabteilungen der Sektionskessel werden sorgfältig gedichtet, so daß der Gasstrom nicht nach außen schlagen kann.

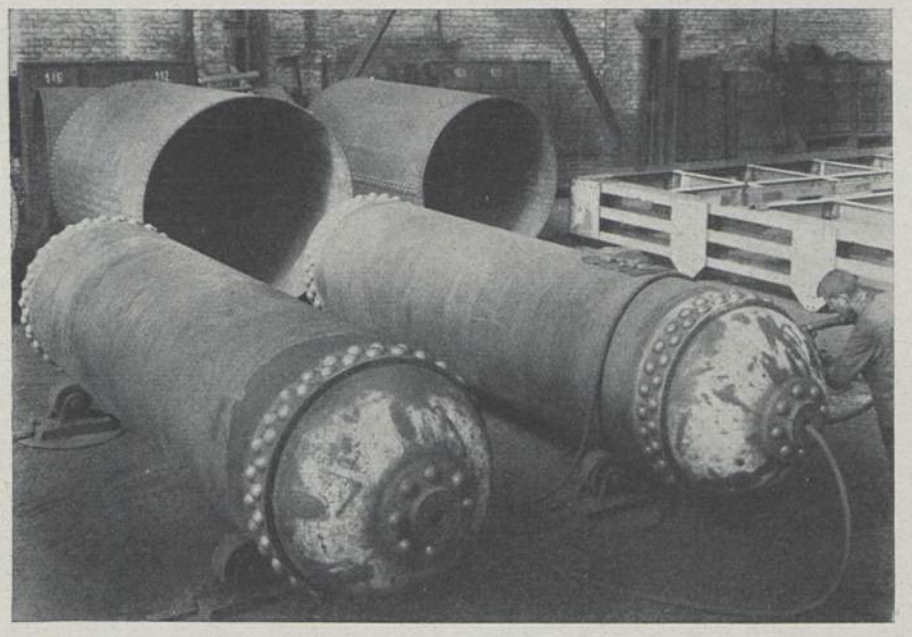


500. Dürr-Kessel, Wasserrohrkessel mit einer Kammer

Während des Betriebs sieht man an der Stirnwand eines Wasserrohrkessels weder die Kammerwände noch die darin befestigten Verschlüsse, weil zur Verhütung unnötiger Abkühlung eiserne Türen, meist aus Wellblech bestehend, davor gesetzt sind (Bild 498).

Der normale Wasserrohrkessel wird zum Hochleistungs-Dampflieferer durch gedrängteste Heizflächen-Anordnung, eine sehr große und intensiv zu betreibende Feuerung,

durch sehr geschwinden Wasserumlauf in seinem Inneren infolge möglichster Verkürzung der Rohrlängen. Die Wandungen haben einen außerordentlichen Hitzeansturm auszuhalten. So sind zum Beispiel bei dem Hochleistungskessel von Babcock & Wilcox die beiden unteren Rohrreihen von den anderen durch einen Zwischenraum getrennt, damit sie in ihrer ganzen Länge von der sehr hohen Hitzestrahlung aus der Feuerung getroffen und von den heißesten Feuergasen vollständig umspült werden können. Dieser Kessel, der auf Tafel XIX, 2 mit allem Zubehör dargestellt ist, hat, damit der Überhitzer günstig angebracht werden kann, eine nach vorn geneigte Lage. Über dem Oberkessel befindet sich noch ein Sammler, aus dem möglichst trockener Dampf für den Überhitzer entnommen wird.

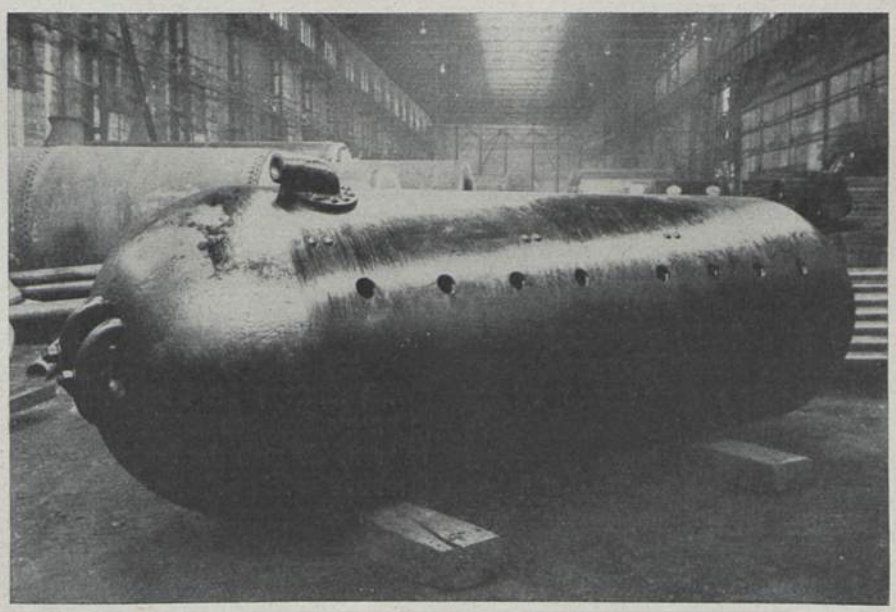


501. Nahtlose Kesseltrommeln mit angenieteten Böden
Jacques Piedboeuf G. m. b. H., Düsseldorf

Es werden auch Wasserrohrkessel mit nur Einer Kammer an der Stirnseite ausgeführt. Hinten sind die Rohre geschlossen, und es besteht dort kein Zusammenhang zwischen ihnen. Dennoch stellen sie nicht tote Wassersäcke dar, es geht auch in ihnen ein lebhafter Wasserumlauf vor sich; denn sie sind doppelwandig ausgebildet.

Es ist in jedes Außenrohr ein Innenrohr gesteckt, und die Enden der beiden Rohrgattungen sind so in die dreiwandige Kammer eingewalzt, daß diese zur Doppelkammer wird. Das aus dem Oberkessel niedersinkende Wasser gelangt in die vordere Kammerhälfte und durch Öffnungen in der Zwischenwand zu den Innenrohren. Diese sind hinten offen, es findet ein Rücklauf durch die Außenrohre zur hinteren Kammerhälfte statt, die wiederum mit dem Oberkessel in Verbindung steht.

Hauptvertreter dieser Gattung ist der Dürr-Kessel (Bild 500), der früher sehr viel auf Kriegsschiffen verwendet worden ist. Denn er kann ohne Gefahr verhältnismäßig rasch angeheizt werden, weil jedes der hinten frei endenden Rohre sich ohne jedes Hindernis auszudehnen vermag.



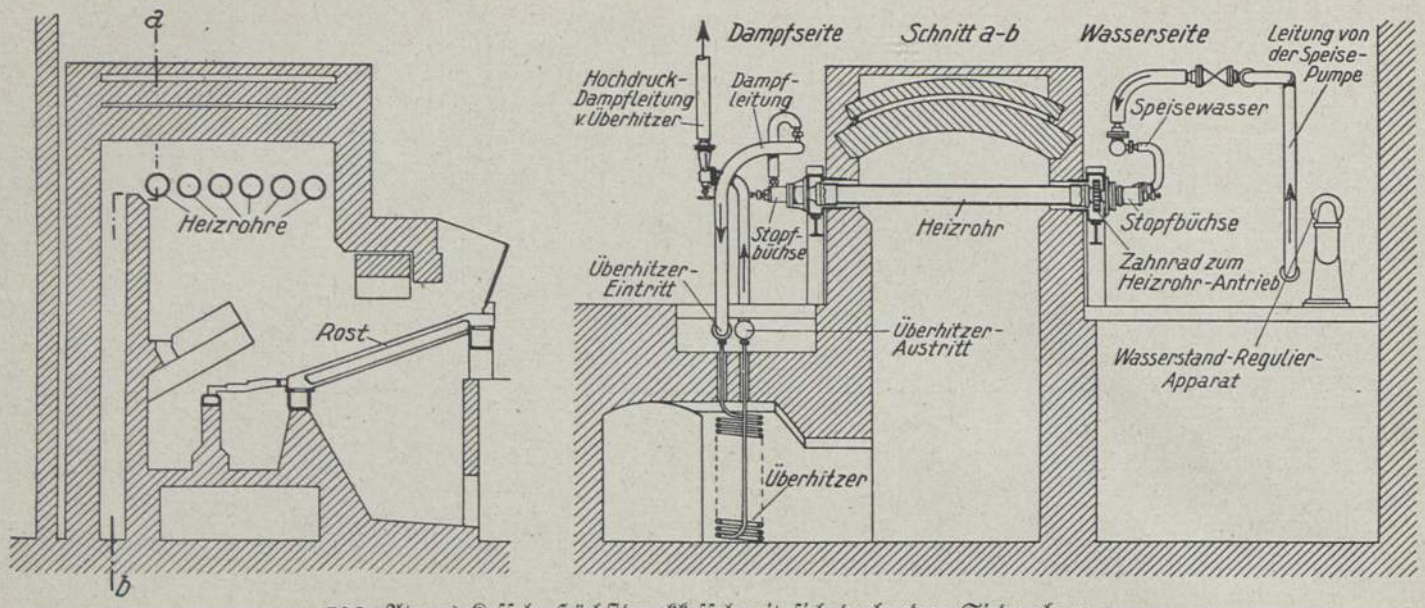
502. Nahtlose Kesseltrommel mit gekümpelten Böden
Jacques Piedboeuf G. m. b. H., Düsseldorf

Heute herrscht auf den Kriegsschiffen jedoch der Krummrohrkessel vor, der bei Bedarf am allergeschwindesten Dampf von hoher Spannung liefern kann. Denn in jedem der ganz dünnen Rohre befindet sich stets nur wenig Wasser, das äußerst schnell durch und durch erwärmt und in Dampf verwandelt wird; die Dehnung der geschwungenen Rohre wird an den Enden, wo sie eingewalzt sind, gar nicht mehr fühlbar. Kessel dieser Art sind bereits in Band III auf Seite 166 abgebildet. Da die gekrümmten Rohre nur sehr schwer zu reinigen sind, so fordern sie Speisung mit Wasser, das keine Niederschläge gibt. Das Kondensat von Turbinen eignet sich hierfür vortrefflich.

Eine Stellung zwischen dem Schräg- und dem Krummrohrkessel nimmt der Steilrohrkessel ein mit nahezu senkrecht stehenden Rohren, die leicht ausgewechselt werden können und sich bequem reinigen lassen. Ein Hauptvertreter ist der Steinmüller-Kessel (Tafel XVIII).

Er ist unter Fortfall aller flachwandigen Teile nur aus zylindrischen Körpern gebildet, die besonders geeignet sind, hohen Druck auszuhalten. Auch die Inhalte der wagerechten Trommeln mit größeren Durchmessern sind gering, so daß die Explosionssicherheit nirgend durch größere Anhäufungen gemindert ist. Von diesen Zylindern werden außerdem die Feuergase völlig ferngehalten, indem sie sorgfältig durch Ummauerung mit Schamottesteinen gegen die Züge isoliert sind. Die beiden oberen Trommeln sind Sammelgefäße, die beiden unteren nur aus konstruktiven Gründen vorhanden, damit nämlich das Überströmen von einem Rohrsystem zum anderen bequem stattfinden kann. Rascher Wasserumlauf und damit sehr intensive Dampfentwicklung sind gewährleistet.

Das vom Vorwärmer herkommende Wasser wird in die hintere Obertrommel eingeführt. Das Speiserohr liegt wagerecht in einer oben offenen Rinne und ergießt in diese das Wasser, das




503. Atmos-Kessel, Höchstdruckkessel mit sich drehenden Siederohren
Bauart der Aktiebolaget Atmos, Stockholm

am oberen Rand überläuft. Während des Arbeitens fällt das Wasser in den beiden senkrechten Rohrreihen gleichmäßig ab; sobald die Feuerung sich aber einige Zeit im Gang befindet, wird die obere Gruppe der beiden senkrechten Rohrreihen von heißeren Gasen getroffen als die andere. Das Abfallen findet jetzt nur durch die hinterste senkrechte Rohrreihe statt, in der vorderen senkrechten Rohrreihe steigt das Wasser dauernd in die Obertrommel auf. Damit der Übergang zwischen den beiden Gruppen unten durch die untere Trommel nicht auf dem kürzesten Weg stattfindet, ist ein eigentümlich geformtes Blech in die Trommel auf ihrer ganzen Längsausdehnung eingelegt. Es zwingt das Wasser, die Trommelwandung vollständig zu berühren und das Gefäß gleichmäßig zu erwärmen. Früher, als das Umlaufblech noch nicht vorhanden war, hat öfter ein Verziehen der Trommel stattgefunden, weil der obere Teil stärker erwärmt wurde als der untere. Da in den beiden senkrechten Rohrgruppen Dampfbildung noch fast gar nicht stattfindet, kann man sie als einen zweiten, sehr kräftig wirkenden Vorwärmer ansehen.

Das heiße, in die hintere Obertrommel zurückgelangende Wasser findet Gelegenheit, von neuem abzufallen, und zwar durch die Überführungsrohre in die untere vordere Trommel. Schon auf diesem Weg wird es von recht heißen Feuergasen getroffen, und es hat einen gewaltigen Hitzeansturm auszuhalten, wenn es in den besonders zahlreichen vordersten Rohren wiederum zu einer Obertrommel aufsteigt. Bei diesem Übergang findet intensivste Dampfbildung statt.

Es besteht auch eine unmittelbare Verbindung zwischen den beiden unteren Trommeln, die aber nur durch wenige Rohre gebildet wird. Diese werden hauptsächlich während der Anheizperiode durchströmt, bei welcher der Aufstieg zur hinteren Obertrommel durch die senkrechten Rohre wegen deren geringer Durchwärmung nur schwach vor sich geht.

Die vordere Obertrommel ist, da sie durch wagerechte Rohre mit der hinteren Obertrommel kommuniziert, stets zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Der einströmende Dampf muß die Wasserdeckung der Rohrenden durchdringen, wodurch die Heftigkeit seiner Ausströmung gemindert wird. Dampfentnahme findet bei der vorderen Obertrommel nicht statt, weil hier durch das heftige Aufkochen des gesamten Inhalts sehr viel Wassertröpfchen mitgerissen werden, der Dampf also zu naß ist. Durch die oberen wagerechten Rohre strömt er in die hintere Obertrommel, wo er den größten Teil des mitgerissenen Wassers absetzt, also trockner wird. Am Scheitel der hinteren Obertrommel setzen die Verbindungsrohre an, die den Dampf zu den Überhitzerschlangen führen. Diese sind nebeneinandergeschaltet, werden also sämtlich gleichzeitig durchflossen, und sie enden in einem gemeinsamen Rohr. Der nun trockene überhitzte Dampf wird von hier aus der Maschine zugeleitet.

Da, wie wir auf Seite 279 gehört haben, die Energiebereitung in Dampfkesseln immer wirtschaftlicher wird, je mehr man mit der Spannung des Dampfs hinaufgeht, haben die Ingenieure schon seit langem die Erzeugung von Höchstdruckdampf angestrebt. Die Technik der Kesselherstellung zog noch vor einigen Jahren eine Grenze, die bei etwa 20 Atmosphären lag. Heute nun fühlt man sich frei, man kann praktisch Kessel für jegliche Beanspruchung herstellen. Im allgemeinen wird jedoch über 35 Atmosphären nicht hinausgegangen, da nur bis hierher die Kurve der wirtschaftlichen Dampfbereitung sehr stark steigt; sie wird darüber hinaus flacher, zeigt aber deutlich, daß auch im Allerhöchstdruck-Bereich immer noch Gewinn herauszuholen ist.

Man darf auch niemals vergessen, daß mit wachsender Dampfspannung die Baukosten für die Kesselanlage ganz bedeutend zunehmen. Material und Arbeitsverfahren, die äußerste Sorgfalt erfordern, werden teurer. Es gibt auch heute noch keine erprobten Turbinen, die mit Dampf von mehr als 40 Atmosphären betrieben werden könnten. Aber es ist kein Zweifel, daß sie bald vorhanden sein werden, da zu der billigen Bereitung der Beaufschlagungsenergie für sie noch der Vorteil sich gesellt, daß ihre Abmessungen sehr gering werden; die Maschinen werden deshalb einen sehr guten mechanischen Wirkungsgrad haben. Es wird nicht lange währen, bis man vor hochgewölbte Riesen-Dynamos so kleine Antrieb-Maschinen gespannt sehen wird, daß man sie in den Drehraum des Generator-Ankers hineinstellen könnte.

Steilrohr-Kessel sowohl wie Sektions-Kessel können mit Höchstdrücken betrieben werden. Freilich müssen die Einzelteile größere Wandstärken erhalten, als sie bisher üblich waren, und als Baustoff kann nicht mehr das gewöhnliche Eisen verwendet werden, sondern nur ein Sonderstahl, der

mit Nickel legiert ist. Die Dicke der Wandungen verbietet es auch durchaus, die Kammern oder zylindrischen Trommeln zu nieten. Diese Verbindungsart ist nicht mehr zulässig, da der hohe Nietdruck, der bei der Dicke der zusammenzufügenden Bleche angewendet werden müßte, die Festigkeit des Materials beeinträchtigen würde.

Die schmalen Sektionen werden schon seit langem aus je einem ebenen Blech gepreßt. Man hat nun auch gelernt, die zylindrischen Trommeln aus Blöcken, die vorher gelocht sind, durch Schmieden oder Walzen ohne jegliche Längs- oder Quernaht herzustellen. Sie werden entweder als glatte Zylinder gefertigt, an welche die Endverschlüsse dann kunstvoll angenietet werden müssen, oder mit halbkugeligen Enden, die mittels Kümpelpressen in schwierigem Verfahren ohne Veränderung der Wandstärken gebildet werden (Bilder 501 u. 502). Ein Handloch und ein Mannloch, die später Verschlußdeckel erhalten, bleiben bei der Herstellung immer offen, damit das Innere der Trommeln für die Reinigung durch Werkzeuge oder durch Befahren zugänglich bleibt. Es ist erstaunlich, bis zu welchen Abmessungen diese nahtlosen Kesseltrommeln gefertigt werden können. Man stellt heute beiderseits gekümpelte Zylinder bis zu 1½ Metern Innendurchmesser und 11 Metern Länge bei einer Wandstärke von 3,5 Zentimetern her.

Für ganz hohe Drücke sind Sonderformen der Dampferzeuger entstanden wie der Atmos-Kessel (Bild 503), der nach Angaben von Blomquist in Schweden gebaut wird, und der Benson-Kessel in England. Das Streben geht dahin, möglichst trockenen Dampf zu gewinnen, da Beimengung von Wassertröpfchen in den Turbinen sehr störend wirkt, und intensivste Bestrahlung der Siederohre durch das Feuer zu ermöglichen, indem die innere Kühlung der Rohre gesichert ist. Zum Schutz der Mauern, welche die schärfst betriebenen Feuerungen umgeben, sind in den steinernen Wänden öfter Kanäle angelegt, die von Kühlwasser durchflossen werden.

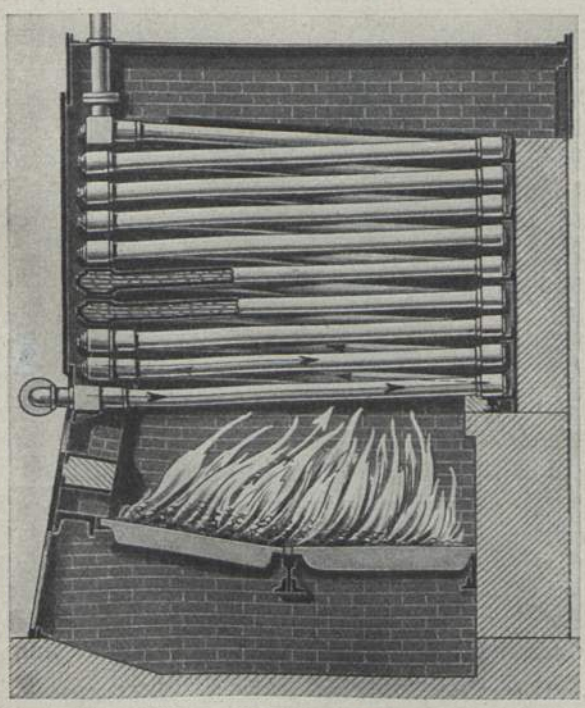
Der Atmos-Kessel, der für 100 Atmosphären gebaut wird, hat ein ganz neues Element in die Kessel-Technik eingeführt, nämlich das sich drehende Siederohr. Bis zu seinem Erscheinen haben ja alle Kesselteile geruht. Die 6 bis 10 wagerechten Siederohre des Atmos-Kessels, die eine lichte Weite von 25 Zentimetern und 15 Millimeter Wandstärke haben, werden in Kugellagern durch einen Zahnrad-Antrieb ziemlich rasch um ihre Längsachsen gedreht. Sie machen 300 Umläufe in der Minute. Die Folge ist, daß das eingespeiste Wasser, da es schwerer ist als der Dampf, sich durch die Fliehkraft an die inneren Rohrwandungen anlegt, diese wie ein Mantel auskleidet und das Erglühen einzelner Abschnitte sicher verhindert, das bei dem hohen Innendruck ja äußerst gefährlich wäre. Die Speisung wird so geregelt, daß das Rohr stets mit einem Wassermantel von 4 bis 5 Zentimetern Dicke belegt ist.

Die aus dem Wasser sich entwickelnden Dampfblasen sammeln sich im Inneren jedes Rohrs, und es werden, ebenfalls infolge der Fliehkraft, keine Wassertröpfchen mitgerissen. Der trockene Dampf wird durch je eine Leitung abgeführt. Am anderen Rohrende findet die Einführung des vorgewärmten Speisewassers statt, das chemisch rein sein muß. Durch je ein Flügelrad wird das Wasser vor dem Eintritt in die Rohre bereits in eine drehende Bewegung versetzt.

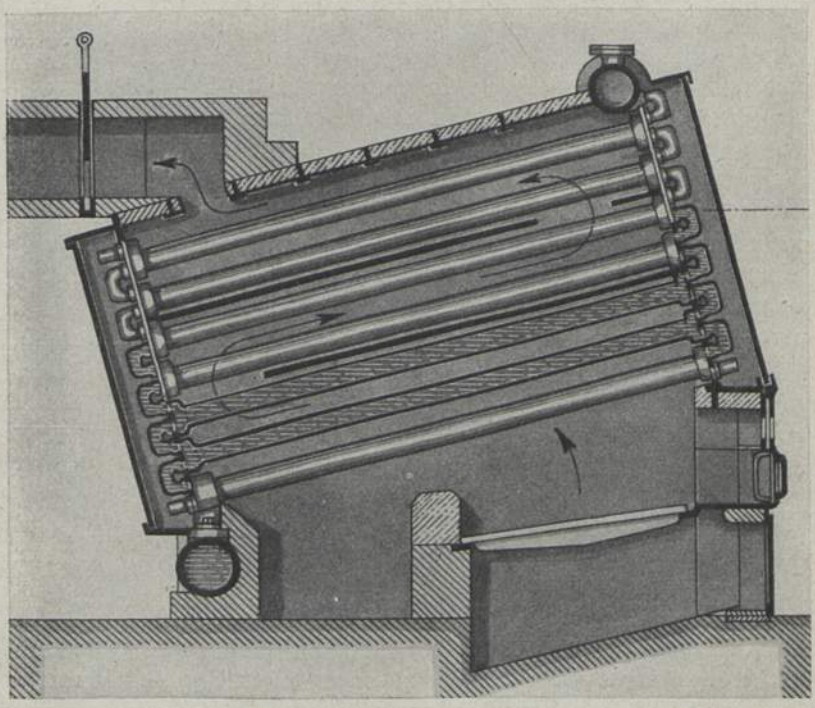
Die Anschlüsse der sich drehenden Teile des Atmos-Kessels an die stillstehenden bei so außergewöhnlich hohem Druck und einer Dampfwärme von mehr als 300 Grad konnten nur durch schwierigste Konstruktionen hergestellt werden. Es ist Blomquist gelungen, Stopfbüchsen zu bauen, die zuverlässig und für lange Dauer dichthalten.

Das Verfahren von Benson ist höchst eigenartig. Er nutzt die seltsamen Erscheinungen bei der „kritischen Temperatur" des Dampfs aus.

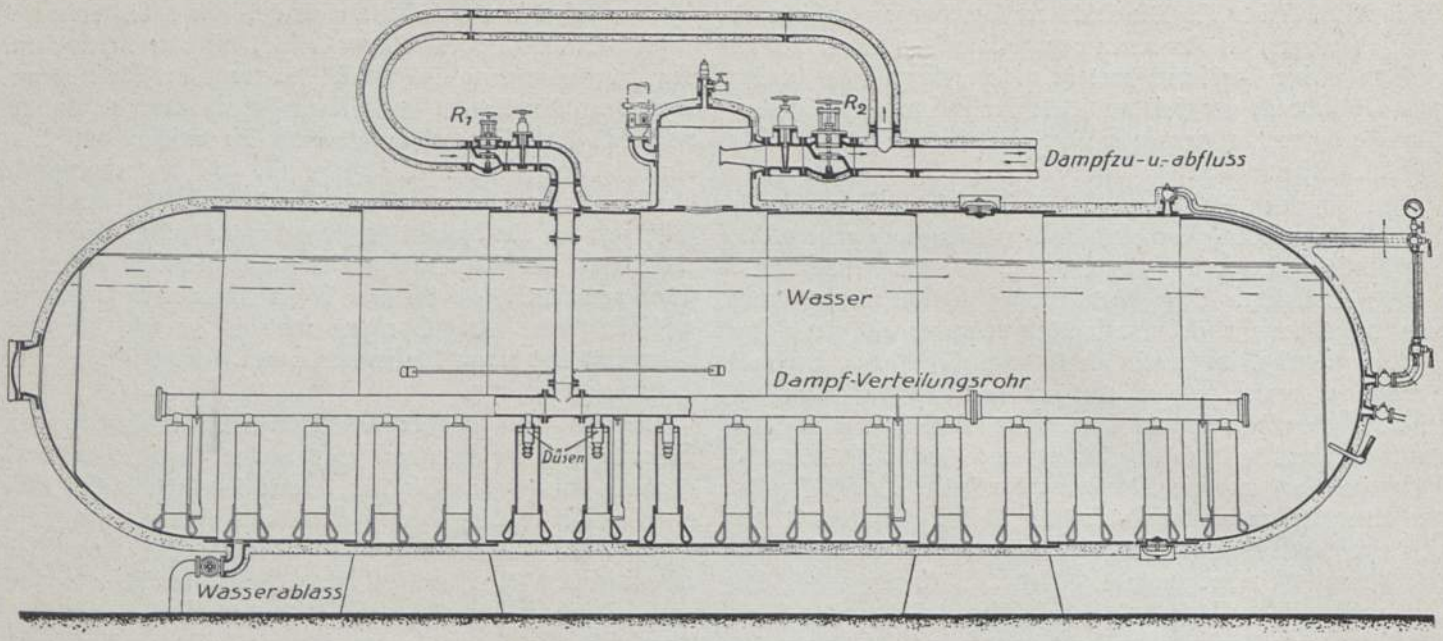
Wenn man Wasser höher und höher erhitzt, ohne daß es imstande ist, sich in Dampf zu verwandeln, was nur durch dauernde Steigerung des Drucks verhindert werden kann, dann wird dieses Wasser in seiner Fügung Dampf immer ähnlicher. Die Zusammenlagerung der Moleküle wird immer lockerer, und wenn das Wasser auf 374 Grad Celsius



504. Gliederkessel, System Belleville



505. Gliederkessel, System Root




506. Schnitt durch einen Dampfspeicher von Ruths

gebracht ist, wozu ein auflagernder Druck von 225 Atmosphären gehört, dann ist es physikalisch von Dampf nicht mehr zu unterscheiden. Es braucht jetzt nur noch eine geringe weitere Erwärmung ohne Steigerung des Drucks stattzufinden, um die gesamte Masse mit einem Schlag in Dampf zu verwandeln, und zwar in völlig trockenen Dampf, da ja gar kein Wasser übrigbleibt. Geschieht diese jähe Umwandlung nicht in dem Erhitzungs-Gefäß selbst sondern außerhalb, dann kann man dieses nicht als Kessel bezeichnen, sondern muß es als Vorwärmer ansehen.

Benson bringt nun tatsächlich das Wasser in einem Vorwärmer, der unmittelbar beheizt wird, auf einen Druck von 225 Atmosphären. Die Dampfenergie, die er aus diesem Wasser später erzeugt, wird also durch verhältnismäßig geringen Aufwand von Brennstoff, d. h. sehr billig, gewonnen. Die Dampferzeugung findet in einem an den Vorwärmer geschlossenen, nicht sehr großen Rohrschlangen-System statt, das die auftretenden Wärmespannungen gut auszuhalten vermag, und zwar durch besondere Heizung dieses Systems. Das so lästige Aufkochen, das bei allen normalen Kesselarten nicht vermieden werden kann und Ursache des Mitreißens von Wassertröpfchen durch den Dampf ist, fällt hier gänzlich fort.

Da Maschinen zur Verarbeitung eines Drucks von 225 Atmosphären nicht vorhanden sind, führt Benson nun eine Entspannung auf 105 Atmosphären herbei. Dadurch wird der Dampf wieder naß, und es ist daher notwendig, ihn in einem Überhitzer nachträglich auf 420 Grad zu bringen. Daß durch dieses vielgestaltige Verfahren ein besonders geeigneter Beaufschlagungsstoff für den Betrieb von Turbinen auf wirtschaftlichste Art erzeugt wird, kann nur durch ausgedehnte Rechnungen nachgewiesen werden.

In den „Allgemeinen polizeilichen Bestimmungen über die Anlegung von Landdampfkesseln", die vom früheren Bundesrat erlassen worden sind und deshalb für ganz Deutschland Gesetzeskraft haben, lautet ein Paragraph:

„Dampfkessel für mehr als 6 Atmosphären Überdruck und solche, bei welchen das Produkt aus der Heizfläche in Quadratmetern und der Dampfspannung in Atmosphären Überdruck für einen oder mehrere gleichzeitig in Betrieb befindliche Kessel zusammen mehr als 30 beträgt, dürfen unter Räumen, die häufig von Menschen betreten werden, nicht aufgestellt werden. Das gleiche gilt für die Aufstellung von Dampfkesseln über Räumen, die häufig von Menschen betreten werden, mit Ausnahme der Aufstellung über Kellerräumen. Innerhalb von Betriebsstätten und in besonderen Kesselräumen ist die Aufstellung solcher Dampfkessel unzulässig, wenn die Räume mit fester Wölbung oder fester Balkendecke versehen sind.

„Dampfkessel, die in Bergwerken unterirdisch oder auf Kraftfahrzeugen aufgestellt werden, und solche, welche ausschließlich aus Wasserrohren von weniger als 100 Millimetern Lichtweite oder aus derartigen Rohren und den zu ihrer Verbindung angewendeten Rohrstücken bestehen, unterliegen den vorstehenden Bestimmungen nicht, Dampfkessel letzterer Art auch dann nicht, wenn sie mit Schlammsammlern und Oberkesseln, die nur als Dampfsammler dienen, versehen sind. Auf Wasserkammerrohrkessel mit Rohren unter 100 Millimetern Lichtweite finden die Bestimmungen des Absatzes 1 dann keine Anwendung, wenn ihre Rohre nahtlos hergestellt sind, die Wandungen ihrer Oberkessel von den Heizgasen nicht berührt werden und ihr Dampfdruck 6 Atmosphären Überdruck nicht übersteigt."

Es geht hieraus hervor, daß kein Kessel der bisher erwähnten Gattungen unter oder über bewohnten oder Geschäftsräumen aufgestellt werden darf, wenn der Druck darin mehr als 6 Atmosphären beträgt. Diese einschränkende Bestimmung ist durchaus notwendig. Denn häufig genug haben Ereignisse in Amerika, wo eine derartige Vorschrift nicht besteht, gezeigt, daß bei der Explosion eines solchen mit Hochdruck betriebenen Dampfkessels das Gebäude, in dem er steht, vollständig bis in die höchsten oder tiefsten Stockwerke zerstört wird. Für „Betriebsstätten", worunter hauptsächlich Fabriken zu verstehen sind, hat der Gesetzgeber notgedrungen eine Ausnahme zulassen müssen.

Es ist besonders betont, daß auch Wasserrohrkessel mit Kammern bei mehr als 6 Atmosphären Überdruck dem Verbot unterliegen. Nur dann fällt jede Einschränkung weg, wenn sie „ausschließlich aus Wasserrohren von weniger als 100 Millimetern Lichtweite oder aus derartigen Rohren und den zu ihrer Verbindung angewendeten Rohrstücken

bestehen". Der Gesetzgeber sieht also als explosionssicher nur solche Kessel an, die keine Kammern, also auch nicht die kleinen Sektionen haben, sondern aus gar nichts anderem als Rohrgängen zusammengefügt sind.

Kessel solcher Art, denen also bei höheren Drücken allein die Aufstellung in Wohn- oder Geschäftshäusern vorbehalten ist, wo sie als Dampflieferer für Dynamo-Maschinen nicht selten sind, werden Gliederkessel genannt. Die Hauptarten sind der Belleville- und der Root-Kessel.

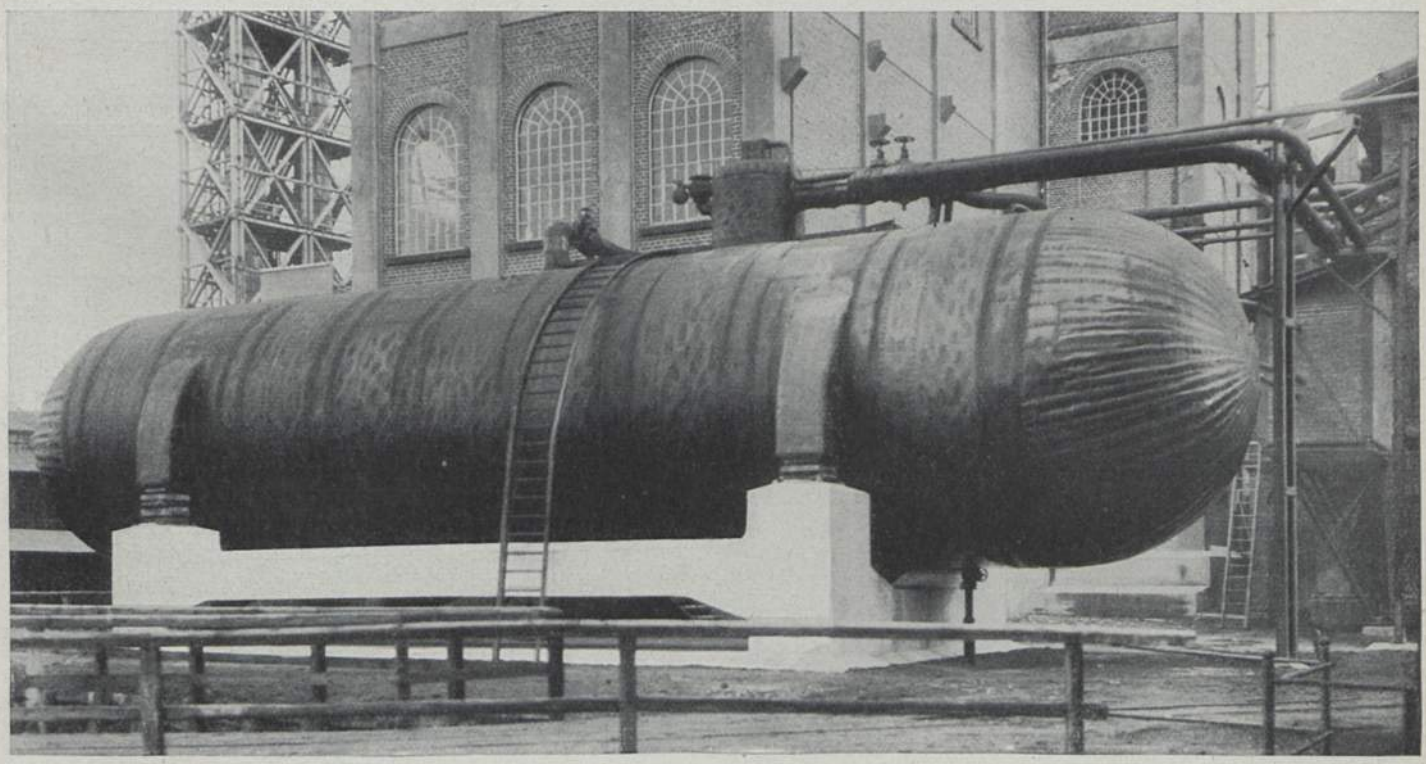
Belleville ordnet mehrere Rohrschlangen wagerecht nebeneinander an. Jede Schlange wird aus zwei senkrechten Rohrreihen gebildet. Wir sehen auf Bild 504, daß die Rohre der ersten Reihe sämtlich nach hinten, die der zweiten Reihe nach vorn aufsteigen. Ein Rohrstutzen verbindet jedes Rohrende in der ersten Reihe mit dem folgenden der zweiten und umgekehrt. Das Wasser wird jeder Schlange unten zugeführt und hat nun sämtliche Rohre nacheinander bis obenhin zu durchlaufen, um dann als Dampf in das Sammelgefäß zu strömen. Die Rohre je zweier Reihen sind also hier nicht wie beim Sektions-Wasserrohrkessel mit Kammern nebeneinander, sondern ohne solche hintereinander geschaltet. Es ergibt sich hieraus ein langsamer Umlauf, der ungünstig für die Dampferzeugung ist. Der Belleville-Kessel ist heute nur noch wenig in Benutzung.

Das Root-System (Bild 505) schließt sich sehr eng an die Art der Sektionskessel an. Wiederum sind je zwei senkrechte Rohrreihen zu einer Abteilung zusammengefaßt. Es fehlt aber auch hier die Kammer; jedes Rohr hat nur einen Kopf, an den zwei Rohrkrümmer ansetzen. Aus diesem Kopf geht das Wasser oder der Dampf durch den Krümmer in den nächsten Kopf und aus diesem wieder in den folgenden. Während in den Sektionen ein glattes Aufsteigen möglich ist, müssen Wasser und Dampf hier vielfach gekrümmte Wege zurücklegen. Dafür sind aber nirgend größere Ansammlungen vorhanden, beim Bersten irgendeiner Stelle kann die Entladung immer nur durch enge Querschnitte hindurch erfolgen.

Alle Wasserrohrkessel, wie sie auch gebaut sein mögen, haben nur wenig Sammelräume. Der Wasservorrat in ihrem Innern kann stets nur gering sein, und sie sind deshalb wenig geeignet, wechselnde Dampfmengen herzugeben. Einen Großraumkessel darf man in dem einen Augenblick schwach beanspruchen, in dem nächsten sehr viel Dampf von ihm fordern, ohne daß er dies irgendwie übelnimmt. Denn es befindet sich stets eine so große Menge Wasser in ihm, bereit, bei Verringerung des auf ihr lastenden Drucks zu verdampfen, daß eine Überforderung nicht leicht an den Kessel herantreten kann. Die Tatsache hat zu dem Gedanken geführt, Wasserrohrkessel, die in einem Betrieb mit stark wechselndem Dampfbedürfnis arbeiten, mit einem Großraumkessel zu verbinden. Dieser darf freilich, wenn die Gesamtanlage wirtschaftlich sein soll, keine eigene Heizung haben, sondern muß feuerlos betrieben werden. Der Nebenkessel soll kein Dampferzeuger sein, sondern nur ein Dampfsammler. Der Franzose Rateau hat zuerst die geeignete Ausführungsform angegeben, von dem Schweden Ruths ist sie vervollkommnet und dem praktischen Betrieb vorzüglich angepaßt worden.

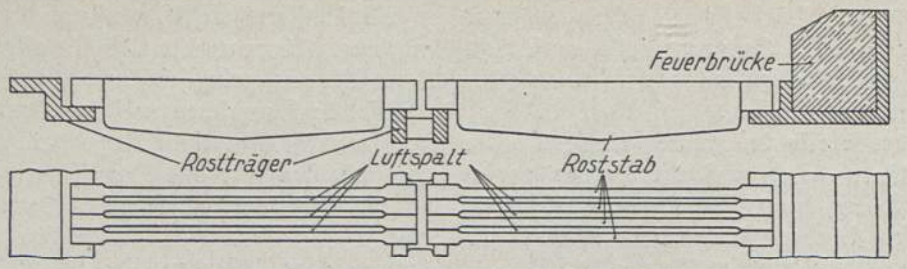
Die Wasserrohrkessel-Batterie liefert jetzt immer nur eine mittlere Dampfmenge, wie sie dem Durchschnittsbedarf des Werks entspricht. Die Feuer auf den Rosten können dauernd in gleicher Weise betrieben werden, in der Art also, welche die beste Ausnutzung des Brennstoffs ergibt. Draußen im Hof neben dem Kesselhaus lagert ein aus starken Blechen zusammengenieteter Speicher von der Form, die Bild 507 zeigt. Er ist in Wärmeschutzmasse, zum Beispiel Kieselgur, eingehüllt, die von einem Mantel aus dünnen Blechen überdeckt wird. Der Speicher ist bis zu etwa drei Vierteln seines Raums mit Wasser angefüllt, und von einem Dampfeinlaßrohr, das unter dem Wasserspiegel liegt (Bild 506), tauchen zahlreiche, mit langen trichterförmigen Mundstücken versehene Düsen in das Wasser hinein.

Wenn wenig Dampf aus den Kesseln entnommen wird, öffnet der hierdurch entstehende Überdruck, längst ehe er das



507. Dampfspeicheranlage von Ruths

Sicherheitsventil aufzuschlagen vermag, ein Überströmventil $R_1$ in der Leitung, die zum Speicher führt, und tritt in diesen ein. Indem er aus den Mundstücken im Speicher herausdringt, erhitzt der Dampf das Wasser, das selbst nun verdampft und zunächst den leeren Raum über seinem Spiegel anfüllt. Der Druck im Speicher wächst aber mehr und mehr, er lastet auf dem Wasser und verhindert dessen weitere Verdampfung, wenn es auch immer mehr erhitzt wird. Der Wärmeinhalt des nachdringenden Dampfs wird in dem Wasser gespeichert.




508. Aufriß und Grundriß des Planrosts

Nun aber fordern große Heiz- oder Kochvorrichtungen sehr viel Dampf an. Nachdem hierdurch zunächst der Kesseldruck erniedrigt worden ist, schließt sich das Überströmventil $R_1$; $R_2$ öffnet sich, die weitere Dampfentnahme erfolgt aus dem Speicher. Der Druck in diesem sinkt. Hierdurch kann das überhitzte Wasser verdampfen, große Dampfmengen werden frei und decken den Bedarf. Vorzüglich ersonnene Regeleinrichtungen sorgen dafür, daß der Druck des Dampfs, der den Bedarfsstellen zuströmt, immer gleich bleibt. Er ist selbstverständlich stets geringer als die Kesselspannung.

Wenn er geräumig genug gebaut wird, ist der Speicher stets bereit, die größten Dampfmengen herzugeben, die für kurze Zeit nötig sind. Es werden Gefäße hergestellt, die einen Rauminhalt bis zu 400 Kubikmetern haben und etwa 20 Meter lang sind. Die Wirkung der Ruths-Speicher hat große Ähnlichkeit mit der Arbeitsweise der elektrischen Akkumulatoren. Diese läßt man vielfach durch Dynamo-Maschinen aufladen, wenn von ihnen wenig elektrische Arbeit entnommen wird; sie liefern alsdann Zusatz-Energie in Zeiten starken Bedarfs.

*

Die Überführung des Kesselwassers in Dampf erfolgt durch Wärmeentwicklung aus festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen. Als feste Heizmaterialien kommen in der Hauptsache in Betracht: Steinkohle, Braunkohle, Torf, Holz, Baumrinde, Sägespäne, Stroh und auch Gerberlohe. Steinkohle hat den höchsten Heizwert, das heißt sie entwickelt bei vollständiger Verbrennung aus einem Kilogramm die meisten Wärmeeinheiten oder Kalorien. Dieser Heizstoff wird bei uns am häufigsten angewendet, und wir wollen ihn im folgenden den Erörterungen hauptsächlich zugrunde legen.

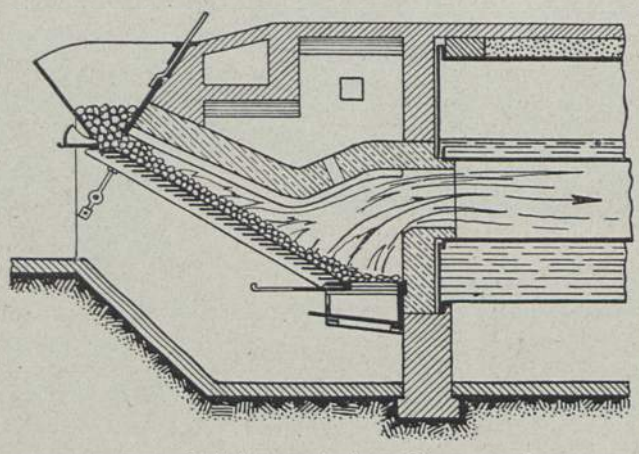
Die Verbrennung ist ein chemischer Vorgang, bei dem die brennbaren Bestandteile des Heizstoffs sich mit dem Sauerstoff der Luft verbinden. Hierbei entstehen Wärme- und Lichterscheinungen.

Die Hauptbestandteile der Kohle sind Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel. Um den Verbrennungsprozeß einzuleiten, ist es zunächst notwendig, den Heizstoff auf die Entzündungstemperatur zu erhitzen. Diese beträgt für Steinkohle 325 Grad. Wenn nun genügend Luft, das heißt ausreichende Sauerstoffmengen, zugeführt werden, so verbrennt der Kohlenstoff zu Kohlensäure ($CO_2$), der Wasserstoff zu Wasser ($H_2O$) und der Schwefel zu schwefliger Säure ($SO_2$). Enthalten die abziehenden Heizgase nur diese Bestandteile und den als Ballast mitgeführten Stickstoff der Luft sowie überschüssigen Sauerstoff, dann heißt die Verbrennung vollkommen. Ist aber die Sauerstoffzuführung ungenügend, so geht der Kohlenstoff nicht in Kohlensäure, sondern in Kohlenoxydgas (CO) über. Damit ist ein sehr erheblicher Wärmeverlust verbunden. Denn 1 Kilogramm Kohlenstoff ergibt bei Verbrennung zu Kohlensäure 8140 Kalorien, dagegen bei Umwandlung in Kohlenoxydgas nur 2440 Kalorien.

Die zweite Art der Verbrennung heißt unvollkommen. Sie muß, wenn ein guter Nutzeffekt der Dampfkesselanlage erzielt werden soll, vermieden werden. Die Beobachtung der Heizgase auf ihren Kohlensäuregehalt ist deshalb sehr wichtig.

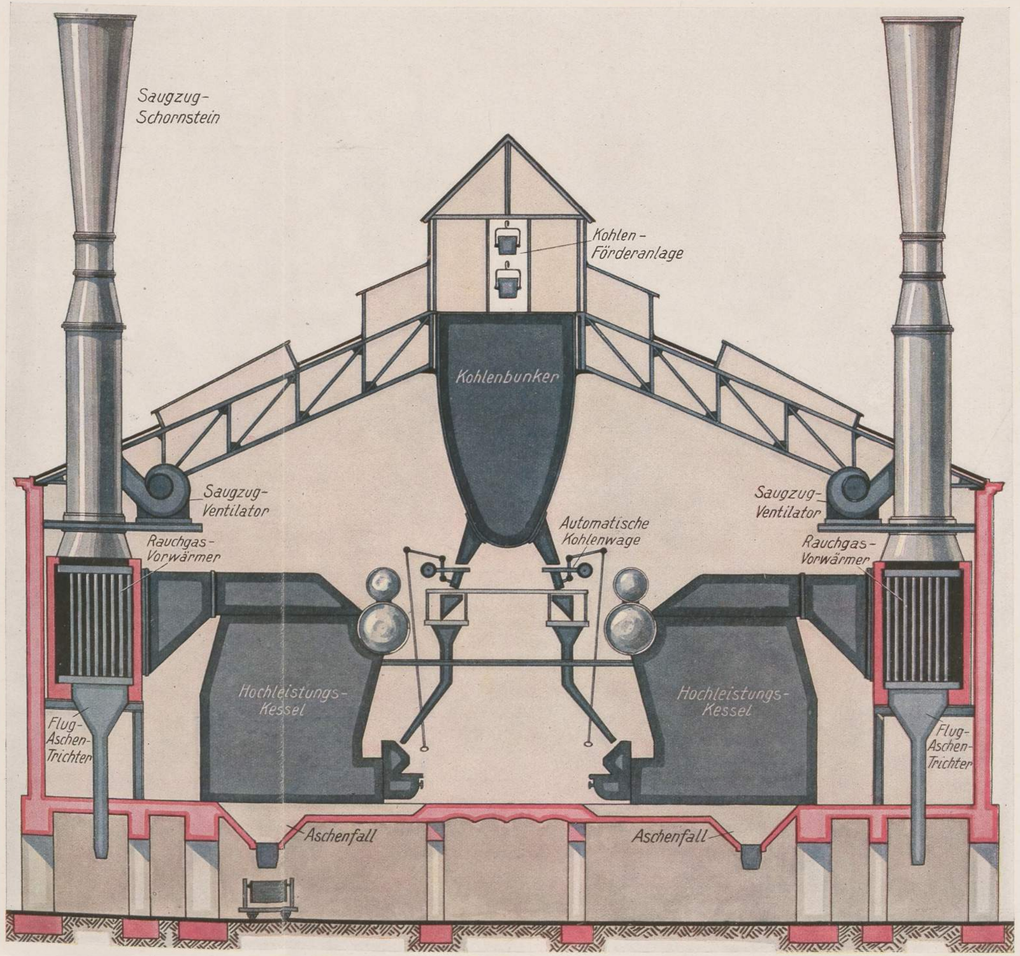
Neben reinem Kohlenstoff und reinem Wasserstoff gibt die Kohle auch chemische Verbindungen der beiden Gase in verschiedenen Zusammensetzungen ab. Der Kohlenstoff in diesen Kohlewasserstoffen macht, wenn er verbrennt, die Flamme leuchtend. Es ist dringend notwendig, daß sogleich sämtliche Kohlenstoffteilchen verbrannt werden. Geschieht dies nicht, so scheiden sie sich als feste Partikelchen ab und bilden den Ruß und Rauch. Dieser ist nichts anderes als Abgas, das fein verteilten Kohlenstoff enthält. Schon ganz geringe Beimengen genügen, um ihn tiefschwarz erscheinen zu lassen.

Das Qualmen der Schornsteine ist immer schon von den Anwohnern als schwere Belästigung empfunden worden. Wir haben auf Seite 201 gehört, daß die Aufstellung der ersten Dampfmaschine in Berlin wegen der Furcht vor dem Kohlenrauch um mehr als ein Jahrzehnt aufgehalten worden ist. Es gibt viele gesetzliche Vorschriften, die den Schornsteinen das Qualmen verbieten, aber dem Gesetzgeber ist es so wenig wie dem Ingenieur bis heute gelungen, eine völlig rauchlose Verbrennung herbeizuführen.

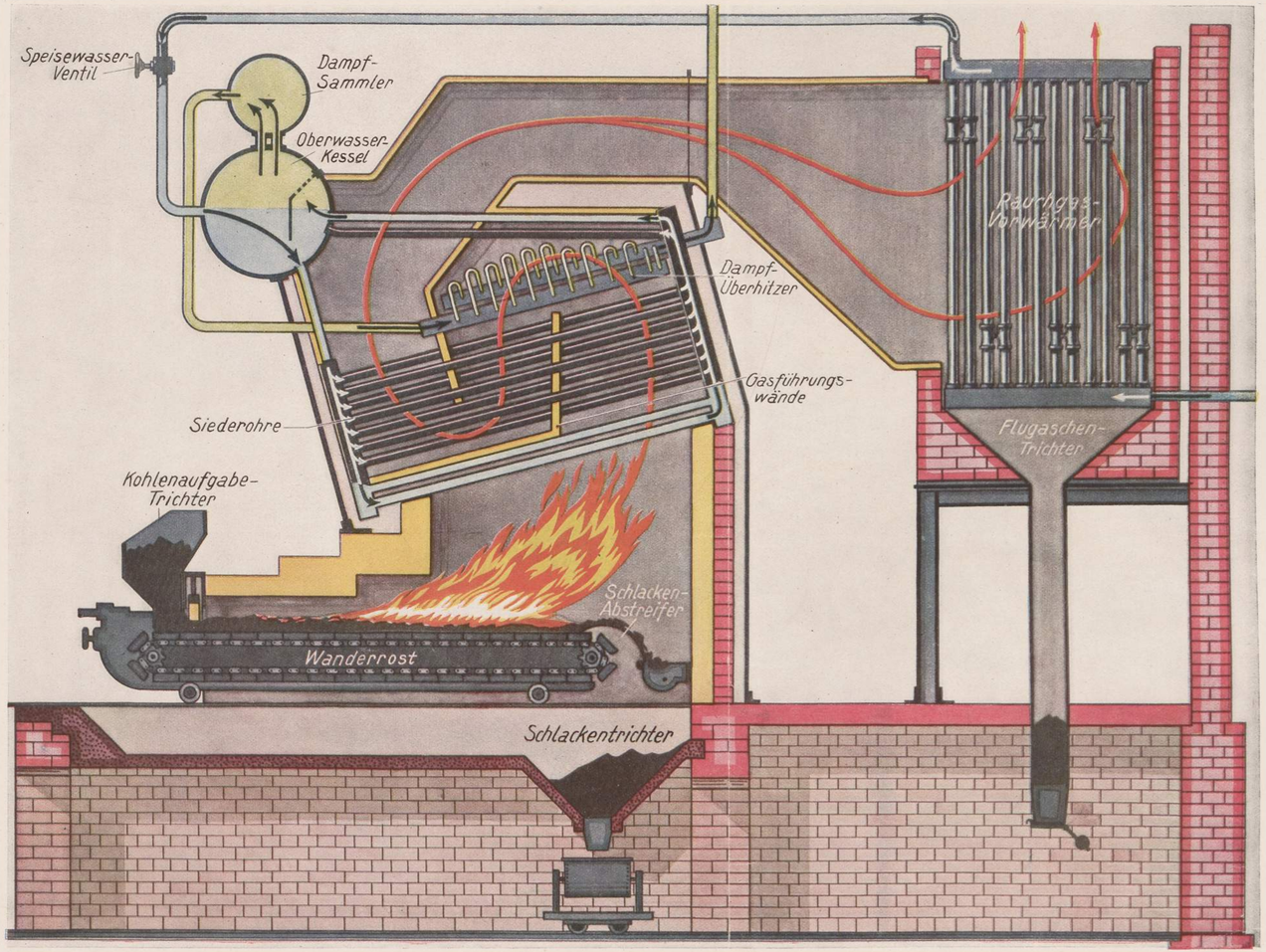


509. Schnitt durch einen Treppenrost

Die Bemühungen um solche Vorrichtungen sind sehr alt. Watt hat sich bereits ein Patent hierauf erteilen lassen. Rauchminderung wird erzielt durch Einführung von Oberluft in die Feuerung, das heißt durch das Einlassen von Luft oberhalb der brennenden Schicht. Es muß eine gute Durchmischung der Gase mit ihr stattfinden, was hier und da durch Einblasen eines Dampfschleiers bewirkt wird.




1. Schnitt durch das Kesselhaus mit zwei Wasserrohrkesseln und hochliegendem Kohlenbunker.

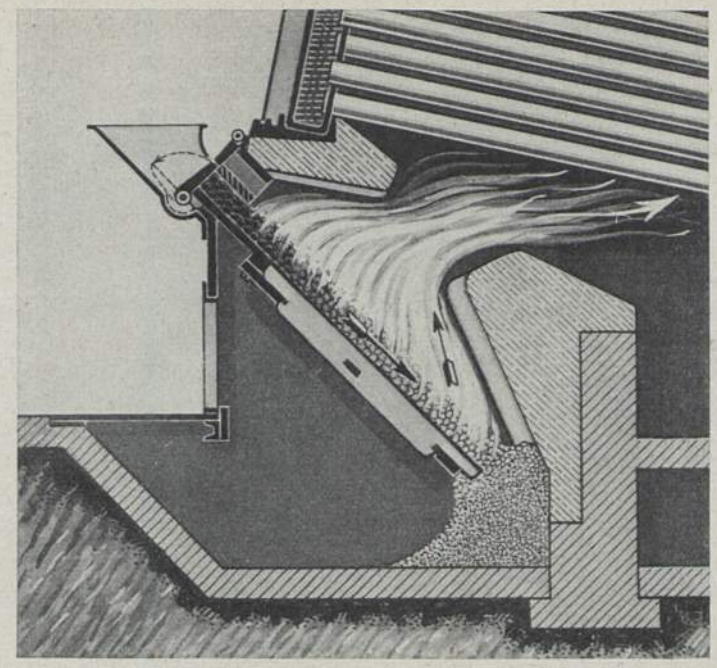



2. Schnitt durch einen Wasserrohrkessel mit Wanderrost und hintergebautem Vorwärmer
Rote Pfillinie: Weg der Heizgase — Pfeile im blauen Grund: Wasserumlauf — Pfeile im grünen Grund: Dampfumlauf

Moderne Hochleistungskessel-Anlage
Deutsche Babcock & Wilcox Dampfkesselwerke A.-G., Oberhausen (Rheinland)

Ein gutes Beispiel hierfür ist die Marcotty-Feuerung, die in Band II, auf Seite 221, bei den Lokomotiven besprochen wurde.

Damit die Kohle möglichst viel Wärme an die Kesselwandungen abgibt, muß die Verbrennung sehr vollkommen sein, wozu, wie wir schon wissen, eine genügende Luftmenge gehört. Es darf aber auch nicht zu viel Luft eingeblasen werden, weil der Überschuß unnötig mit erwärmt werden muß. Der Wärter hat darum den Zug sorgfältig zu regeln. Das Hauptgerät hierfür ist der Rauchschieber im Fuchs, dem stets die richtige Stellung zu geben ist.



510. Schrägrostfeuerung

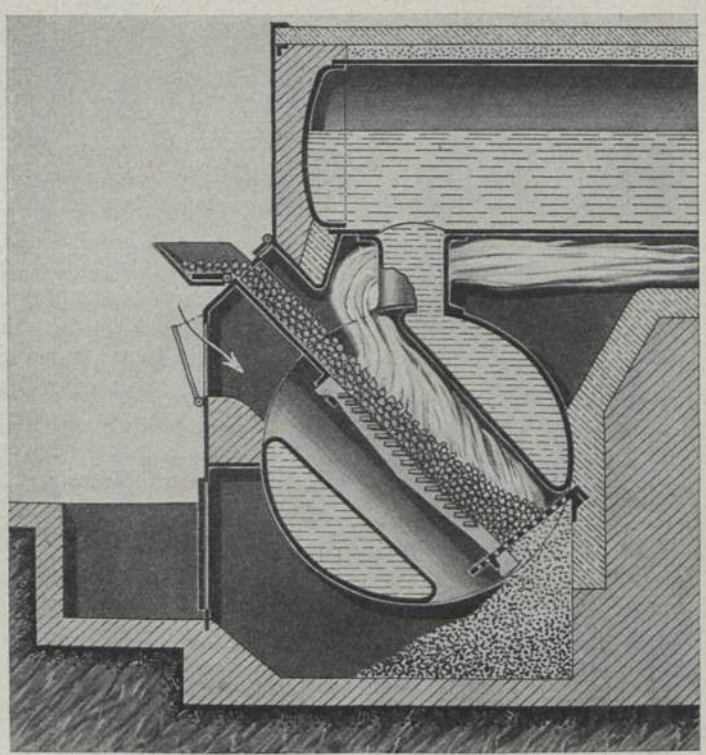
Diese muß für die wechselnden Verhältnisse im Feuerraum aus der Erfahrung gefolgert werden. Denn unmittelbar nach der Beschickung mit der Schaufel ist mehr Luft erforderlich, als wenn die Schicht stark niedergebrannt ist. Ebenso braucht man mehr Luft, wenn der Kessel stark geht, also intensiver beschickt wird, als wenn man ihn bei geringen Ansprüchen an die Dampfentwicklung schont. Wir werden bald noch hören, daß die Sorgfalt des Heizers durch verschiedene Apparate beobachtet, die Ergebnisse seiner Tätigkeit sogar durch schriftliche Aufzeichnungen, die selbsttätig erfolgen, noch nach Wochen festgestellt werden kann.

In dem Verbrennungsraum herrscht eine Temperatur von 1200 bis hinauf zu 1600 Grad. Da Schmiedeisen bei 600 Grad bereits zu glühen beginnt, bei 1300 Grad in Weißglut gerät und bei Annäherung an 1800 Grad schmilzt, so ist es dringend notwendig, daß die von außen her geheizten Flächen des eigentlichen Kessels stets von innen gekühlt werden, damit sie nicht die Temperatur des Verbrennungsraums annehmen, wodurch sie erweichen würden und leicht zersprengt werden könnten. Die Kühlung erfolgt durch das Wasser, das gierig die Wärme aufnimmt und sie von der Wandung abführt. Zu niedriger Wasserstand im Kessel, der geheizte Flächen bloßlegt, ist die häufigste Ursache von Explosionen.

Die Feuerbrücke, die am Ende des Rostes aus feuerfesten Steinen 30 bis 40 Zentimeter hoch aufgemauert ist, hat ihren Anteil an der Luftführung im Verbrennungsraum. Sie bewirkt, daß die von unten her eintretende Luft die Brennstoffschicht in senkrechter Richtung durchstreicht, also so, daß sie den geringsten Widerstand findet. Außerdem wird die Luft von der Brücke länger im Verbrennungsraum zurückgehalten, als sie sonst darin verweilen würde, bevor sie den Rauchkanälen zuströmt. Hierdurch wird die Mischung mit den aus der Kohle entwickelten Gasen begünstigt. Bei der Lokomotive, für die man eine besonders gründliche Rauchverbrennung haben will, ist die Feuerbrücke zu einem langen Schirm ausgebildet. (Siehe Band II, Bild 366 auf Seite 210.)

Jeder Brennstoff enthält mineralische Bestandteile, die feuerbeständig sind. Sie bleiben in Pulverform zurück und bilden die Asche. Erdige und steinige Beimengungen schmelzen, backen zu großen Kuchen zusammen und müssen als Schlacke entfernt werden.

Flüssige Brennstoffe sind das Rohpetroleum und die verschiedenen bei der Reinigung des Petroleums zurückbleibenden Öle. Ein Beispiel für die Art, wie sie unter dem Kessel verbrannt werden, ist in Band III auf Bild 245, Seite 169, gegeben. Gasförmige Brennstoffe entstehen beim Betrieb der Hochöfen, deren Kronen sie als Gichtgase entströmen, in den Koksöfen, in denen die gasigen Bestandteile unter Luftabschluß aus den Kohlen getrieben werden, und in besonderen Gaserzeugern oder Generatoren. Hier wird eine sehr hohe Kohleschicht erhitzt und von Luft durchzogen, wobei ein besonders im nächsten Abschnitt näher zu besprechendes Produkt, das Generatorgas, hervorgebracht wird. Auch Naturgase, die durch Bohrlöcher fertig aus der Erde strömen, kommen in Betracht.



511. Schrägrostfeuerung von Tenbrink

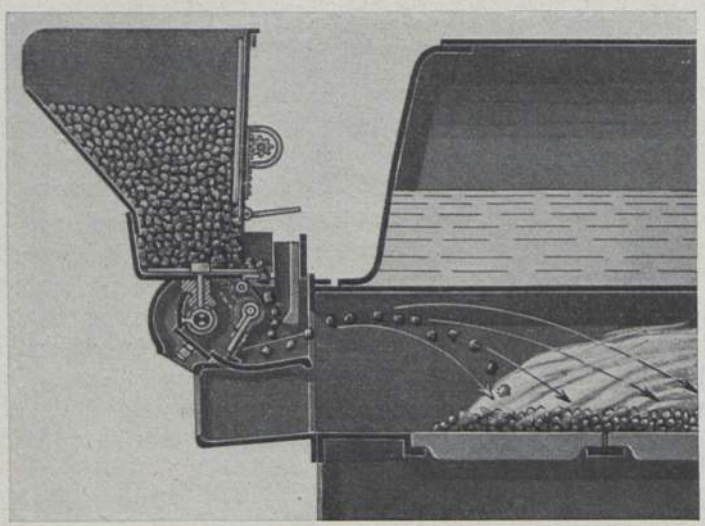
Die Gase der drei zuerst genannten Arten werden aber gegenwärtig viel häufiger als zur Feuerung von Dampfkesseln für den Betrieb von Großgasmaschinen verwendet. Das Naturgas ist meist zu arm an brennbaren Stoffen, um hierfür gebraucht zu werden.

Es gibt heute zahlreiche Ingenieure, die das unmittelbare Verfeuern von Kohle unter dem Dampfkessel als einen Raubbau betrachten. Sie möchten, daß statt dessen

nur die Gase verheizt werden, die bei einer Vorbehandlung der Kohle anfallen. Denn es ist möglich, aus der Kohle eine sehr große Menge höchst wertvoller Stoffe zu gewinnen. Sie liefert vor allem den Teer, auf den sich fast die gesamte Farb- und Sprengstoffgewinnung gründet. Ferner können Öle wie das Benzol und Toluol, Arzneimittel, Ammoniak, Riech- und Desinfektionsstoffe daraus gewonnen werden. Alle diese wertvollen Produkte gehen bei unmittelbarer Verfeuerung verloren.

Es ist jedoch, wie insbesondere Klingenberg nachgewiesen hat, nicht richtig, dies als reinen Verlust zu buchen. Denn die Gewinnung der Wertstoffe erfordert die Einrichtung großer, teurer Anlagen, deren Betrieb manchmal die Aufwendung höherer Summen erfordert, als durch den Verkauf der Produkte eingenommen werden können. Nur bei sehr großen Anlagen ist ein sicherer Überschuß zu erzielen.

Aber auch vor deren Ausstattung mit Einrichtungen für Wertstoffgewinnung muß bedacht werden, daß nun zur Erzeugung der gleichen Dampfmengen die Verarbeitung sehr viel größerer Kohlenmengen notwendig ist. Deutschland darf aber auch heute noch keine Kohle unnötig verbrennen, die ja sein Haupthandelsartikel auf dem Weltmarkt ist. Deshalb ist vorläufig an die grundsätzliche Einführung der Kohlevergasung nicht zu denken. Die Methode bleibt aber ein Gegenstand von hoher Bedeutung, dem ständig Aufmerksamkeit zugewendet werden muß. Es kann durch Änderungen der Weltlage und durch Fortschritte in der chemischen Technik der Augenblick kommen, in dem jeder, der Kohle ohne Wertstoffgewinnung verbrennt, als ein Verschwender am Nationalvermögen angesehen werden muß. Ein großer Schritt in dieser Richtung ist inzwischen durch die Verflüssigung der Kohle nach den Verfahren von Bergius und Fischer getan worden.



512. Mechanische Rostbeschickung mittels Katapult

*

Wir haben bisher stets angenommen, daß als Auflager für den in den Feuerungsraum gebrachten Brennstoff der ebene oder Planrost dient. Diese Bauart ist zwar die einfachste und heute immer noch am weitesten verbreitete, aber längst nicht mehr die einzige. Zur besseren Nutzung der Brennmaterialien und um die Bedienung sehr großer Feuerflächen zu erleichtern, sind zahlreiche andere Rostanordnungen ersonnen worden. Wir werden diese kennenlernen, nachdem wir den Planrost (Bild 508) näher betrachtet haben.

Bei seiner Anwendung wird die Tragfläche für den Brennstoff aus einzelnen Stäben gebildet, die neben- und hintereinander liegen und mit ihren Köpfen auf Querlagern, den Roststrägern, ruhen. Zwischen den Stäben befinden sich lange, senkrecht zur Stirnmauer des Kessels stehende Spalte, die dadurch gebildet werden, daß jeder Roststab beiderseits an den Köpfen und meist auch in der Mitte je einen vorspringenden Anguß besitzt.

Die Gesamtheit der Spalte nennt man die freie Rostfläche. Sie dient, wie wir wissen, zur Durchführung der Verbrennungsluft und für das Abfallen der Asche in den hierfür unter dem Rost vorgesehenen Raum. Das Verhältnis der freien Rostfläche zur Gesamtfläche beträgt für Steinkohlenfeuerung 1:3 bis 1:5.

Die Stäbe werden fast ausschließlich aus Gußeisen gefertigt. Die Gießform, in der man sie herstellt, wird nicht wie gewöhnlich mit Sand überdeckt, sondern durch eine Eisenplatte abgeschlossen. Hierdurch kühlen die Oberflächen der Roststäbe sehr rasch ab, sie werden hart und besonders feuerbeständig. Trotzdem ist stets eine Kühlung der Roststäbe erforderlich, damit sie nicht verbrennen. Für die Temperaturminderung genügt meist die Luft, welche durch die Spalte streicht; bei sehr starker Beanspruchung aber müssen Hohlstäbe angewendet werden, durch die Wasser geleitet wird. Hier und da wird zur Kühlung auch Kesseldampf zugeführt, dessen Temperatur ja tief unter der Wärme im Verbrennungsraum liegt.

Handbedienung eines Planrostes stellt hohe Anforderungen an die Körperkraft des Heizers und an seine Geschicklichkeit. Die Kohle muß mit der Schaufel eingebracht und so verteilt werden, daß sie den Rost gleichmäßig bedeckt. Von Zeit zu Zeit ist die Schlacke, die zusammenbackt und nicht durch die Spalten fällt, nach vorn herauszuziehen, ohne daß während dieser Zeit die Dampfspannung im Kessel merklich sinkt. Sowohl das Beschicken wie das Abschlacken hat sehr rasch zu geschehen, weil durch das Offenhalten der Feuertür zu viel Oberluft eindringt, die den Verbrennungsraum abkühlt.

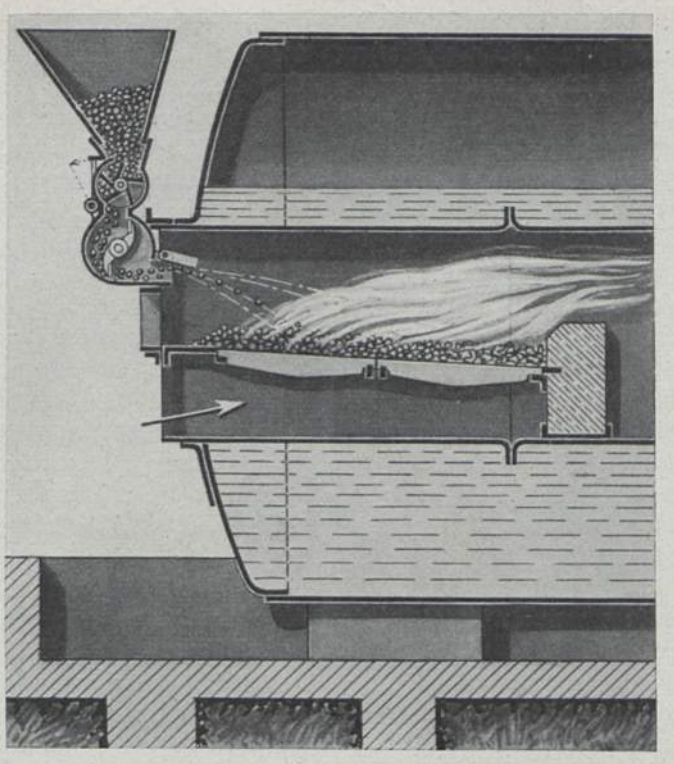
Es ist sehr sorgfältig darauf zu achten, daß das Beschicken immer dann stattfindet, wenn sich das Feuer in höchster Glut befindet. Sonst brennt die Kohle zu langsam an, es entwickelt sich sehr viel Rauch. Die richtige Einstellung des Zugs durch den Schieber im Fuchs derart, daß sowohl unmittelbar nach der Beschickung wie bei vollem Glühen der Kohle die rechte Luftmenge zuströmt, ist nur einem sehr erfahrenen Wärter und auch diesem nur in beschränktem Maß möglich. Außerdem kann ein Planrost von mehr als 2 Metern Länge durch Schaufelwurf nicht mehr gleichmäßig überdeckt werden. Wenn der Rost breiter als 1 Meter sein muß, ist es bereits notwendig, zwei Feuertüren einzurichten.

Aus allen diesen Gründen muß bei großen Feuerungen eine selbsttätige Förderung des Heizstoffs durch den Verbrennungsraum stattfinden. Sie geschieht entweder durch das Gewicht der Kohle, die sich über eine schiefe Ebene bewegt, oder mittels mechanischer Vorrichtungen.

Bei der Schrägrostfeuerung (Bild 510) erhalten die Roststäbe eine starke Neigung. Diese darf nicht größer sein als der Böschungswinkel des Brennstoffs, damit die Kohle nicht nach vorn überstürzt. Jedes Material hat einen solchen Böschungswinkel. In diesen stellt es sich von selbst ein, wenn es zum Beispiel gegen eine senkrechte Wand geschüttet war und diese dann fortgenommen wird.

Die oben auf den Schrägrost gebrachte Kohle wird zunächst durch die von unten her aufsteigende Hitze entgast. In der Feuerluke kommen die Gase mit der durchschlagenden Flamme in Berührung und werden sehr gründlich, ohne Rußbildung, verbrannt. In der Mittelzone glüht entgaste Kohle, also Koks, und weiter unten findet vollständige Verbrennung statt. Infolge des Zurückschlagens der Flamme sind die fortziehenden Gase fast völlig rauchfrei.

Schlacke und Asche sinken durch den freien Raum zwischen den Roststabenden und dem Fuß der Feuerbrücke hindurch. Es wird immer nur so viel von den Rückständen fortgenommen, daß der Brennstoff unten gestützt ist. Die Stabenden sollen immer etwas mit Schlacke bedeckt sein, damit sie nicht verbrennen.



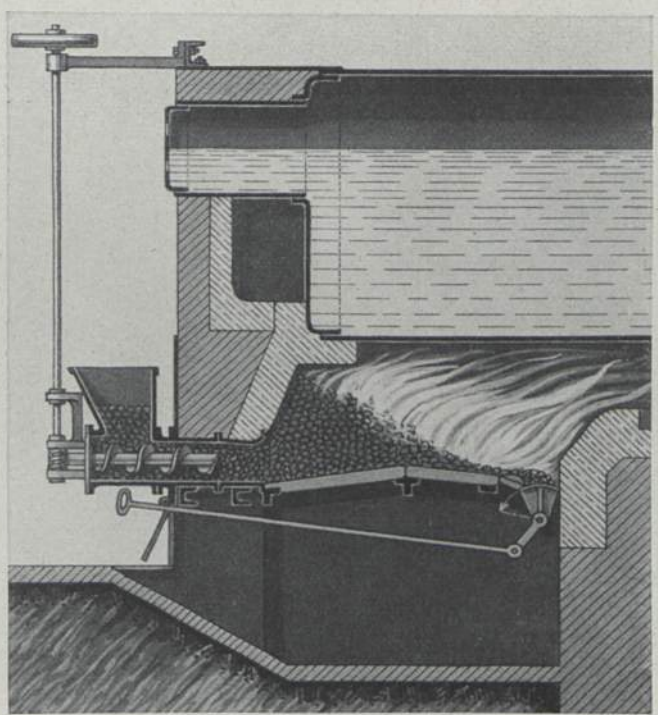
513. Mechanische Wurffeuerung mit rotierender Wurfwalze

Das Aufgeben des Brennstoffs erfolgt durch eine schräg liegende Feuertür. Darüber ist ein Schauloch angebracht, durch das der Heizer den Gang des Feuers beobachten kann. Mit eingeführten Schüreisen kann er bei Störungen, wenn zum Beispiel ein Anbacken stattgefunden hat, nachhelfen.

Die unteren Teile des Schrägrostes, in denen gerade die stärkste Hitzeentwicklung stattfindet, sind von den eisernen Kesselwandungen sehr weit entfernt. Um die hierdurch entstehenden Verluste zu vermeiden, wird oft ein besonderer Kesselteil hinzugefügt, der den Schrägrost unmittelbar umgibt. Es ist eine wagerecht quer in den Kessel zwischen die beiden Seitenmauern gelegte Walze, in der sich ein Schlitz zur Unterbringung der Feuerung befindet. Das Gefäß ist durch ein Rohr mit dem eigentlichen Kessel verbunden (Bild 511). Die Anordnung stammt von Tenbrink. Der nach ihm benannte Sieder, der Wasser in die unmittelbare Nähe des Schrägrostes bringt, verstärkt die Dampfbildung sehr lebhaft.

Eine Abwandlung des Schrägrostes für Beheizung des Kessels mit feinzerteilter Braunkohle, Schlammkohle oder Sägespänen ist der Treppenrost (Bild 509). Würde man auch bei dem feinkörnigen Material senkrechte Spalte zwischen den Stäben haben, so würden große Massen unverbrannt hindurchfallen. Die Roststäbe werden deshalb nicht mehr hochkant aufgestellt, sondern flach gelegt, und zwar parallel zur Stirnwand des Kessels, so daß ihre Köpfe zur Feuerbrücke hin gerichtet sind. Der Brennstoff ruht auf den Vorderteilen der oberen Stabflächen. Damit er dies vermag, ist immer der folgende Stab um ein Stück gegen den vorhergehenden nach vorn gerückt. Es entsteht also eine richtige Treppe. Die Spalte stehen nunmehr wagerecht. Die Neigung der Treppe hat wiederum dem Böschungswinkel zu entsprechen. Die Stäbe ruhen nach Art der Treppenstufen auf schrägen Wangen.

An den Treppenrost schließt sich unten ein kleiner Planrost an, welcher der Schlacke als Stütze dient. Damit diese leicht entfernt werden kann, ohne daß Luft am Fuß der Treppe eintritt, ist unter dem Planrost ein zweites Bodenstück angebracht. Wenn nun der Planrost nach vorn ausgezogen wird, fällt die Schlacke auf die Bodenplatte. Hierauf wird der Rost wieder eingeschoben, die senkrechte Abschlußklappe geöffnet, der Boden ausgezogen und von Schlacke befreit. Auf den einzelnen Roststäben sammelt sich Asche an, die nicht von selbst absinken kann. Sie muß von Zeit zu Zeit durch die wagerechten Spalte nach vorn abgezogen werden. Durch die Schlitze kann der Heizer auch bequem den Zustand der Feuerung beobachten und im Bedarfsfall mittels Schüreisen nachhelfen.



514. Unterschubfeuerung

Die Beschickung erfolgt meist nicht mehr von Hand, wie Bild 509 zeigt, sondern mittels eines Trichters oder Füllschachts, aus dem die Kohle selbsttätig nachsinkt oder dann, wenn eine Klappe zurückgezogen wird. Das Öffnen der Feuertür, das immer Ursache für das Eindringen „falscher Luft" ist, fällt nun fort.

Auch die mechanischen Beschickungsvorrichtungen für große Planroste arbeiten sämtlich mit dem Aufgabetrichter. Die Füllung des Trichters geschieht entweder von Hand durch Aufschaufeln von Kohle, die auf den Kesselhausboden geschüttet ist, oder von schräg nach unten laufenden Rinnen her, in welche die Kohle aus großen Bunkern im Dachgeschoß des Kesselhauses sinkt. Die Vor-

richtungen, die zum Heraufschaffen der Kohle vom Stapelplatz zu diesen Hochbunkern dienen, Förderschnecken, Bänder, Becherwerke und ähnliches, sind im Abschnitt 22 besprochen worden. Eine Gesamtübersicht über eine Hochbunker-Anlage gibt Tafel XIX,1. Wenn der Trichter zu einem Teil entleert ist, füllt ihn der Heizer in einfachster Weise durch Ziehen an einem Griff, der eine Klappe in der Zuführungsrinne öffnet.

Die selbsttätigen Feuerungen mit Beschickung aus Hochbunkern gestatten, mehrere große Feuer durch Einen Mann bedienen zu lassen. Die Schaufel ist in so ausgerüsteten Kesselhäusern ein unbekanntes Gerät; sie sind völlig frei von Kohlenstaub. In manchen derartigen Kesselhäusern hängen vernickelte Kohlenschaufeln und Schüreisen zur Erinnerung an vergangene Zeiten. Da zugleich eine gute Durchlüftung wegen des ständigen Abströmens großer Luftmengen durch die Feuerung stattfindet, ist die Arbeit der Bedienungsmannschaft leicht. Die bedauernswerte Gestalt des schwitzenden, vom Kopf bis zu den Füßen geschwärzten Heizers ist verschwunden. In Amerika, wo ja eindrucksvolle technische Schaustellungen beliebt sind, hat man öfters große Kesselanlagen durch weiß gekleidete Heizer bedienen lassen. Derartiges wäre auch bei uns an geeigneten Stellen während des regelmäßigen Betriebs ohne weiteres möglich.

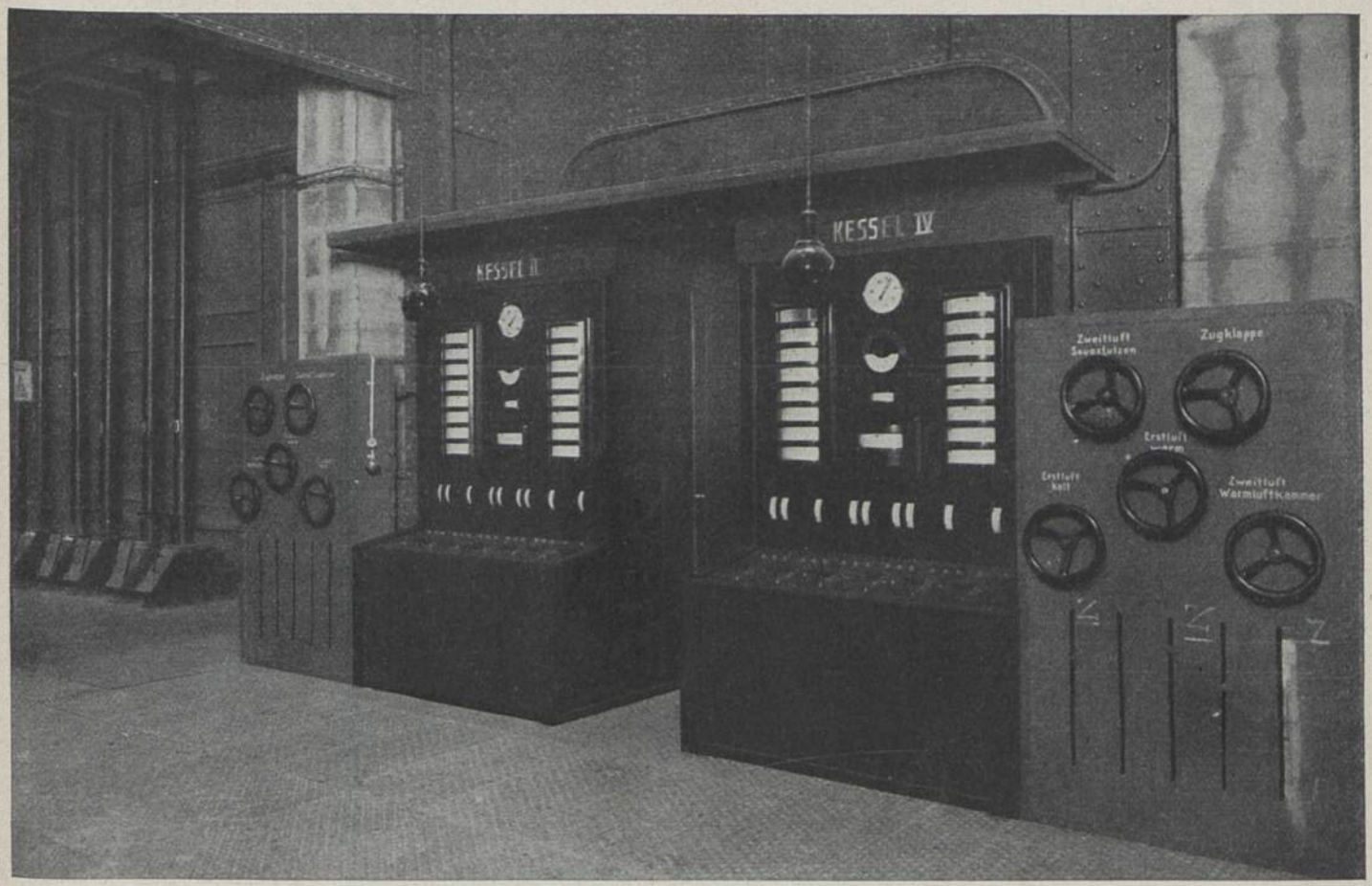
Bild 516 stellt die Gipfelleistung dar. Es zeigt den „Heizerstand" für zwei der riesigen Wasserrohrkessel in dem Großkraftwerk Klingenberg bei Rummelsburg, die aus Hochbunkern durch senkrechte Rinnen völlig selbsttätig mit Kohlenstaub beschickt werden. Hier gibt es weder rußige noch sauber bekleidete Bedienungsmänner, sondern — gar keine Heizer.

Die ersten Gattungen der mechanischen Vorrichtungen, die wir betrachten, die Wurffeuerungen, sind einfach als Schaufelersatz gedacht. Es wird von ihnen die Wirkung des Wurfgeräts in der Hand des Heizers nachgeahmt.

Auf Bild 513 sind unter dem Trichter zwei umlaufende Teile angebracht, die Speisewalze und der Werfer. Sie erhalten ihren Antrieb entweder von einer Transmission her oder durch einen Elektromotor mit verlangsamendem Vorgelege. Sowohl die Speisewalze wie der Werfer sind so lang wie der Rost breit ist. Mit ihren Fächern führt die Walze immer eine ganz bestimmte Kohlenmenge dem Wurfraum zu, wo sie vom Werfer erfaßt und nach vorn geschleudert wird. Dieses Gerät dreht sich 300- bis 400 mal in der Minute, hat also eine recht bedeutende Schleuderkraft, durch die es einen sehr langen Rost zu beschicken vermag.

Da der Anprall der Arme an die Kohlenhäufchen immer gleich stark ist, so würde ohne eine Zusatzeinrichtung der Brennstoff stets in die gleiche Roſtzone, zum Beispiel ganz nach hinten, befördert werden. Das darf selbstverständlich nicht sein. Um eine gleichmäßige Bedeckung des Rostes herbeizuführen, ist deshalb die Prellklappe angeordnet. Sie bewegt sich, um eine Achse schwingend, ständig auf und nieder. In ihrer untersten Stellung lenkt die Klappe die aufprallende Kohle so, daß diese in die vorderste Roſtzone fällt. Die verschiedenen Zwischenstellungen sind Ursache, daß jede Roſtzone in regelmäßigem Wechsel versorgt wird. Wenn zu große Kohlenstücke in die Speisewalze gelangen, durch welche die Anlage gefährdet werden könnte, dann öffnet sich von selbst eine Sicherheitsklappe und läßt das Stück hinausfallen.

515. Veraltetes Kesselhaus mit Wasserrohrkesseln
Die Rostbeschickung erfolgt noch von Hand




516. Moderner „Heizerstand". Bedienungstafeln für zwei Kessel mit Kohlenstaubfeuerung des Kraftwerks Klingenberg in Berlin-Rummelsburg

Der Heizbeamte kann an den beiden Tafeln sämtliche Vorgänge in den Kesseln beobachten und durch einfache Handgriffe die zu ihrer Wartung notwendigen Arbeiten verrichten. Jeder Heizbeamte bedient vier Kessel. Links im Hintergrund eine Gruppe von Brennern. AEG, Berlin

Bei dem Rostbeschickungsapparat mit Katapult (Bild 512) tritt an die Stelle des rotierenden Werfers eine hin und her gehende Platte. In bestimmten Abständen öffnet sich die wagerechte Füllklappe und läßt Kohle vorn auf das Wurfblech fallen. Die Schleuder wird stets langsam zurückgezogen, schnellt aber dann unter dem Zug einer kräftigen Feder sehr rasch vorwärts, den Heizstoff im Bogen fortschleudernd. Gleichmäßige Rostbeschickung wird hier dadurch erzielt, daß die Kraft der Zugfeder sich wechselnd von selbst in drei verschiedene Grade einstellt.

In sehr eigenartiger Weise wird die Kohle bei den Unterschub-Feuerungen zugeführt (Bild 514). Der Trichter entleert sich in ein Gehäuse, in dem eine Schnecke arbeitet. Diese schiebt die Kohle nicht, wie es sonst allgemein üblich ist, von oben her auf den Rost, sondern drückt sie von unten aus zu. Es wird hierdurch erreicht, daß die ausgetriebenen Gase durch die aufliegende hochglühende Schicht streichen müssen, wo sie gründlichst verbrennen. Die Anordnung gestattet auch die Verwendung sehr geringwertiger Kohle in Staub- und Grusform.

Bei den stillstehenden Treppenrosten für Braunkohle erfolgt die Bewegung des Heizstoffs nur durch die Schwerkraft. Die Neigung muß ein für allemal entsprechend dem natürlichen Böschungswinkel des Materials eingestellt werden, das auf dem Rost verbrannt werden soll. Es kann also immer nur derselbe Brennstoff aufgegeben werden, wenn man eine günstige Ausnutzung erzielen will. Der bewegliche Vorschubrost (Tafel XX), wie er z. B. von der Firma Steinmüller gebaut wird, gestattet Wechsel des Brennguts, sowohl in seiner Art wie in der Korngröße. Jede Stufe des Rosts besteht nun nicht mehr aus einer zusammenhängenden Platte, sondern ist vielfach unterteilt. Die ganze geneigte Rostfläche wird schachbrettartig aus einzelnen quadratischen Platten zusammengesetzt. Die Hälfte davon ist beweglich, und zwar so, daß — um im Bild zu bleiben — die schwarzen Felder des Schachbretts stillstehen, die weißen Bewegungen machen können. Diese Felder werden dauernd durch einen Antrieb von vorn nach hinten und wieder zurück geschoben. Die Bewegung der einen Plattenhälfte gegen die andere lockert den Brennstoff dauernd auf, so daß er immer gleichmäßig nach unten gleitet, sie verhindert das Zusammenbacken und die Bildung von Schlackenkuchen. Schürarbeit ist nicht mehr notwendig.

Der großartigste Gedanke, der je für die Einrichtung von Feuerungen ersonnen wurde, ist in den Anlagen mit Ketten- oder Wanderrost verkörpert. Hier wird die Kohle nicht mehr ruckweis gefördert, sie sinkt in ununterbrochenem Schub ruhig nieder und wird dennoch mit gleichmäßiger Schicht durch den ganzen Feuerraum geführt. Aufgabehöhe sowie der Verbrennungsvorgang sind von schönster Gleichmäßigkeit. Die Einrichtung wurde von dem Engländer Juckes erfunden, von Tailfer zuerst in Frankreich angewendet. Die Hochleistungskessel sind, wenn sie mit Steinkohle befeuert werden, heute stets mit Kettenrosten versehen, da diese die Möglichkeit geben, eine gewaltige Glutebene dicht unter den Wasserrohren anzuordnen (Bild 517 u. 518).

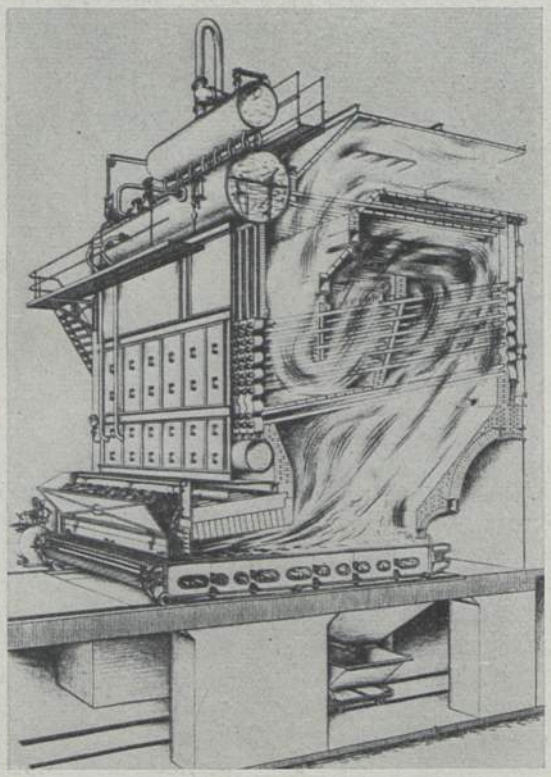
Eine sehr große Zahl kurzer Roststäbe ist mittels runder Bolzen so aneinandergefügt, daß eine endlose Kette ent-

steht, ein breites, in sich selbst zurücklaufendes, biegsames Band mit den nötigen Spalten zwischen den Stäben. Vorn und hinten biegt dieses Band über Walzen scharf um, so daß es unterhalb des Feuerungsraums rückwandern kann. Gezahnte Räder an den Enden der vorn liegenden Walzen fassen Rollen, die seitlich aus der Rostkette hervorragen, und treiben sie auf diese Art an.

Es gibt zwei Bauarten für Wanderroste. Entweder greifen die Querreihen der Roststäbe so ineinander, wie Bild 519 es zeigt, und dann bleibt die geschlossene Bandebene auch beim Übergang über die verhältnismäßig scharfe Rundung der Endwalzen erhalten, oder aber die Stäbe sind zu einzelnen Querreihen zusammengefaßt, die nur durch Verbindungsglieder aneinanderhängen. In dem Band entstehen dann beim Übergang von der unteren Ebene zur oberen und umgekehrt Lücken, die sich aber vollkommen schließen, wenn der gerade laufende Teil erreicht ist (Bild 518).

Die Kette wird auf ihrem Weg durch den Verbrennungsraum durch zahlreiche Rollen gestützt, die an den Seiten angebracht sind und auf wagerechten Schienen laufen. Woher die Antriebskraft genommen wird, ist gleichgültig. Jeder Rost kann seinen eigenen Elektromotor haben, oder es wird für eine Kesselbatterie, wie sie zum Beispiel auf Bild 519 zu sehen ist, eine gemeinsame Antriebswelle angeordnet, die unter Flur liegt, und von der die Kraft meist mittels Riemen für den einzelnen Rost besonders abgenommen wird.

Die Stärke der Befeuerung ist beim Gebrauch der Roste in doppelter Weise regelbar. Die Auslaßöffnung des Aufgabetrichters kann beliebig eingestellt werden, und auch die Geschwindigkeit des Kettenvortriebs läßt sich verändern. Die Verbrennung ist deshalb außerordentlich gut, weil die Gase, die zuerst auf den Vorderteil des Rostes ausgetrieben werden, über die sehr heiße Feuerzone am Rostende hinwegstreichen müssen, ehe sie in die Züge gelangen.



517. Wanderrostfeuerung an einem Wasserrohrkessel
Bauart von A. Borsig, Berlin-Tegel

Hinten ist alles Brennbare fast vollständig verzehrt. Die Schlacke stößt gegen einen aufliegenden Abstreifer, wird von diesem aufgenommen und gleitet, durch das nachfolgende Material geschoben, über den Rücken des Abstreifers in den Schlackenraum (Tafel XIX, 2). Aus diesem werden die Rückstände von Zeit zu Zeit ausgelassen. Am bequemsten ist es, wenn sie hierbei in einen Trichter fallen, der seinerseits im Keller unmittelbar in einen Wagen entleert werden kann. Kleine seitliche Öffnungen im Mauerwerk, die für gewöhnlich durch gußeiserne Türen verschlossen sind, gestatten dem Heizer das Beobachten des Feuers und das Einführen von Schüreisen.

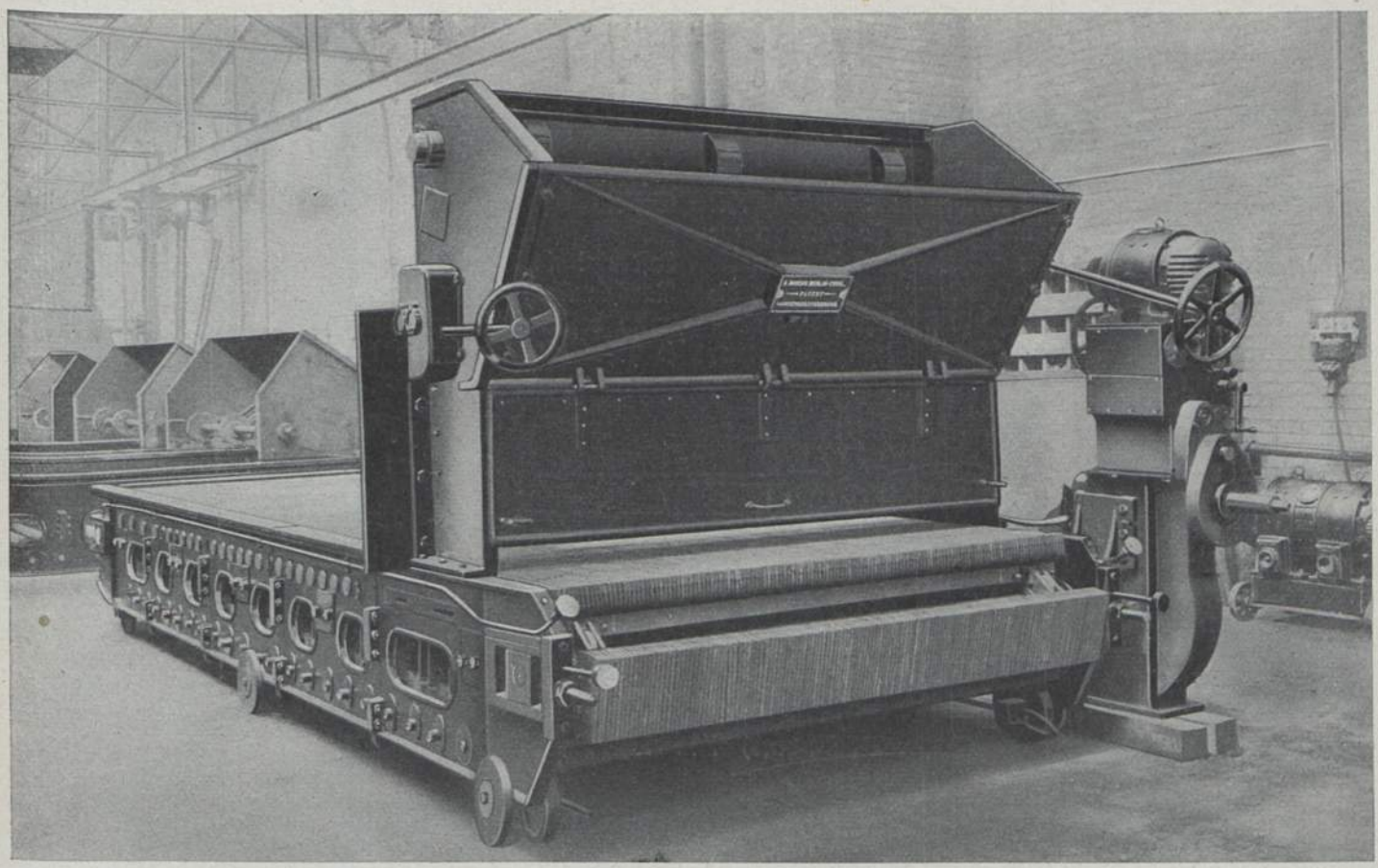
An Stelle der Abstreifer werden immer häufiger Stauer verwendet. Dort, wo der Kettenrost den hinteren Anschlußbogen beginnt, befindet sich über ihm, längs seiner gesamten Breite, eine Reihe schwerer Eisen, die pendelartig aufgehängt sind. Damit die Schlacke vom Rost hinunterfallen kann, muß sie die Pendel anheben. Sie sind so eingestellt, daß das erst geschehen kann, nachdem eine Stauung stattgefunden hat. Während deren Dauer werden die letzten brennbaren Teile in der Schlacke durch die Hitze verzehrt. Den Verschluß, den die Pendel bilden und der niemals geöffnet wird, weil die abfließende Schlacke stets den Schlitz zwischen Pendelenden und Rost ausfüllt, verhindert das Zuströmen „falscher Luft" von hinten.

Der Bau von Kesseleinheiten mit gewaltigen Abmessungen wird heute durch die Anwendung der Kohlenstaubfeuerung möglich. Denn selbst die Wanderroste dürfen eine gewisse Breite nicht überschreiten, wenn die Maschinenanlage, die sie doch darstellen, nicht zu schwerfällig werden soll, während die Kohlenstaubfeuer fast beliebig ausgebreitet werden können. Man setzt eben eine Heizvorrichtung dieser Art neben die andere, die Feuer vereinigen sich zu einem lückenlosen Band, und es entsteht keine Bedienungsschwierigkeit, da nur sehr wenig Wartungsmaßnahmen auszuführen sind.

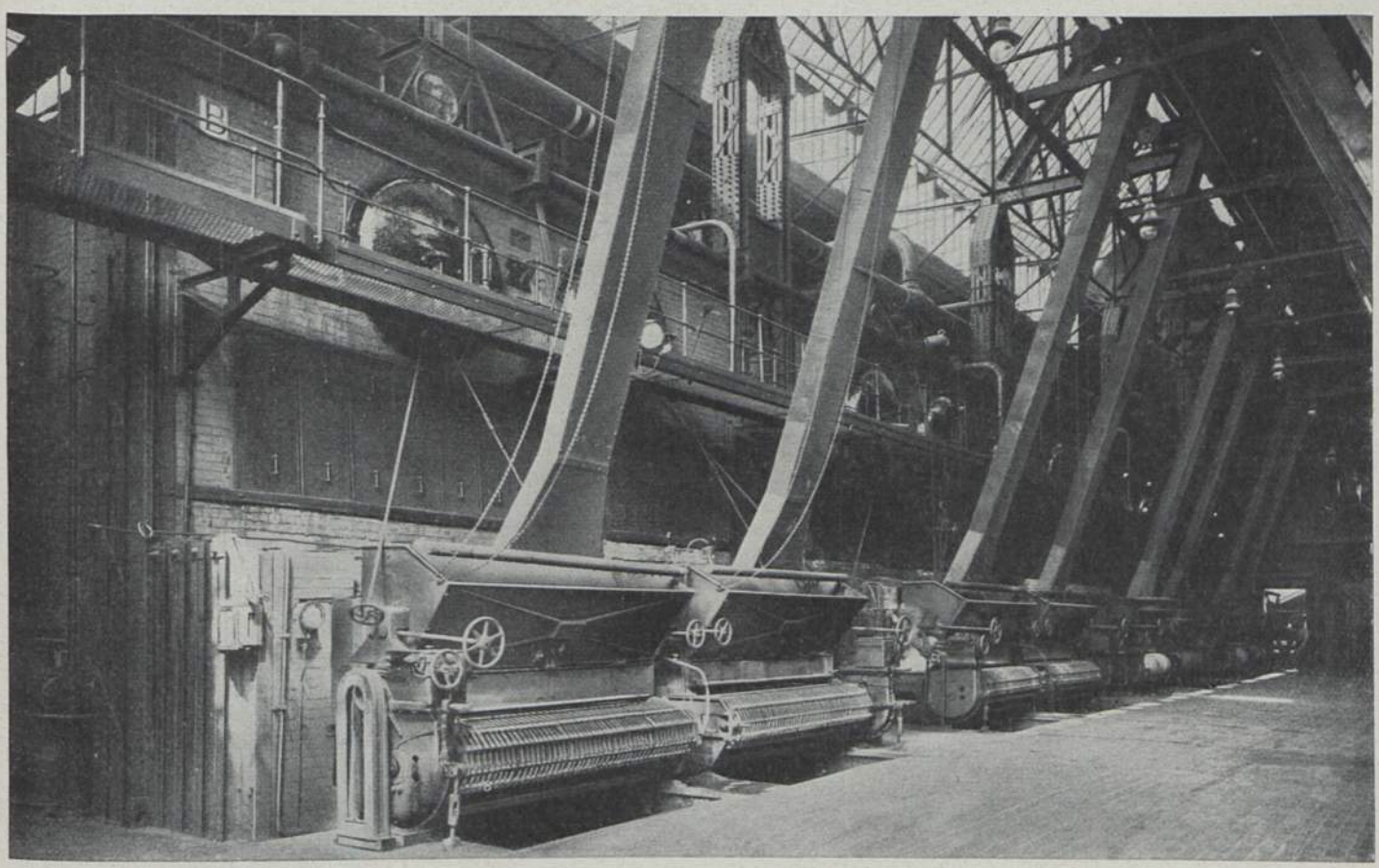
Kohlenstaub, durch Mahlen aus Stücken oder Grus bereitet und mit Luft gemischt, kann wie eine Flüssigkeit behandelt werden. Der Heizstoff wird dann auch gleich dem Öl aus Brennerrohren dem Heizraum zugeführt, verbrennt frei mit langer Flamme und hat keinen Rost mehr nötig. Die Wartung beschränkt sich auf die Regelung der Brenner, die von außen her erfolgt; irgendwelche Durcharbeitung des Feuers innerhalb der Kesselwände ist unnötig. Die feinpulverige Asche fällt von selbst nach hinten in einen Lagertrichter, aus dem sie leicht beseitigt werden kann.

Vor 25 Jahren schon hat man versucht, Kohlenstaub unter Kesseln zu verbrennen. Die technischen Mittel reichten aber damals nicht aus, diese Art der Feuerung lebensfähig zu machen. Sie ist dann in Amerika vervollkommnet worden, und die Apparate werden jetzt auch in Deutschland in bester Art hergestellt. Der Staub fällt aus Hochbunkern durch Schüttrinnen in das Aufgaberohr des Brenners. Dort wird er mit einer genau einstellbaren Luftmenge vermischt. Eine wagerechte Schnecke, die sich in einem Rohr dreht (Bild 520), bringt das Gemisch durch die Stirnwand des Kessels in den Feuerraum, drückt es durch eine meist kegelförmige Düse, und in dem davorgesetzten Mundstück wird es entzündet. Eine mächtige Flamme, die in großen Kesseln etwa 15 Meter lang ist, schlägt durch den Heizraum bis zu den Wasserrohren. Die Längenausdehnung ist notwendig, damit aller Kohlenstoff vollkommen verbrennt und eine Flammen-Temperatur von 1300 bis 1500 Grad entsteht.

Ein Elektromotor am Fuß des Brenners (Bild 521) bewegt gleichzeitig den Ventilator, der die beizumischende Luft in das Schneckenrohr treibt, und die Zuführungs-Vorrichtung selbst. Es findet eine vorzügliche Verbrennung der Kohle statt, und diese Feuerungsart ist die einzige, die ohne weiteres wechselnde Kohlensorten zu verwenden gestattet. Bei allen anderen Heizvorrichtungen müssen stets besondere und langwierige



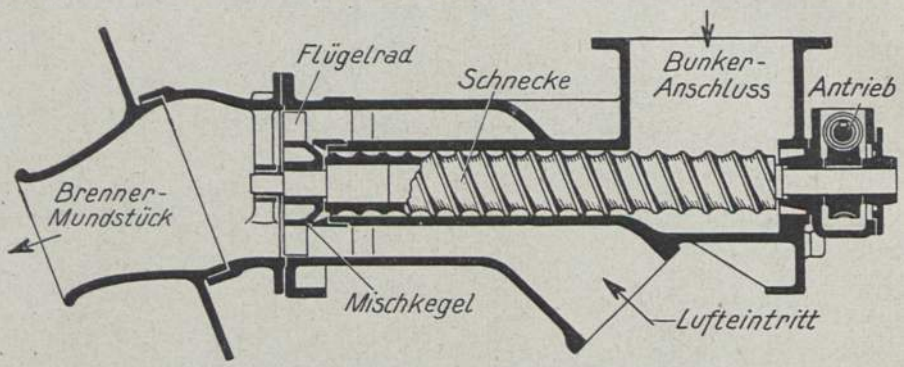
518. Wanderroſt mit ſich teilender Kette und elektromotoriſchem Einzelantrieb
A. Borſig, Berlin-Tegel



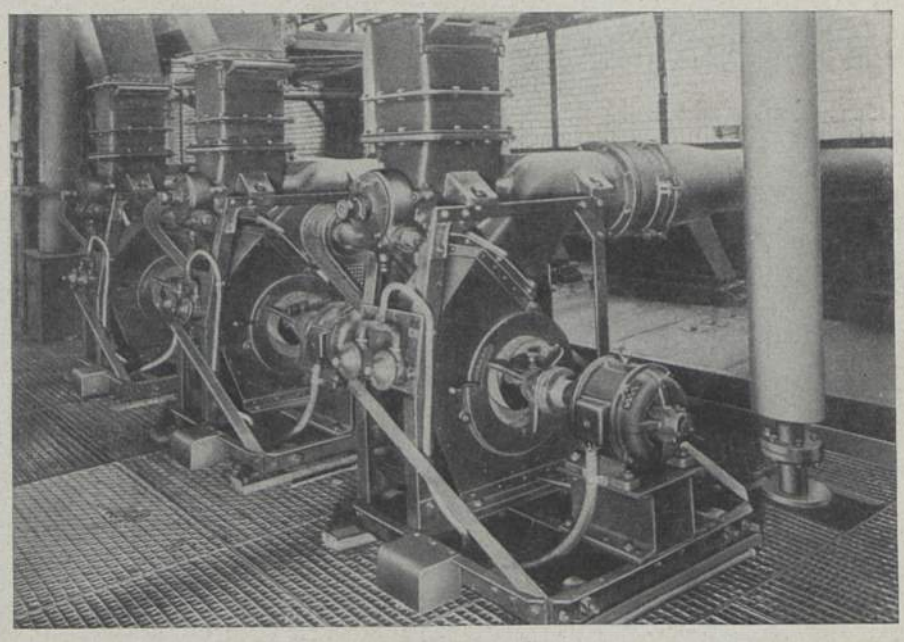
519. Wanderroſte mit geſchloſſener Kette und Riemenantrieb von gemeinſamer Antriebswelle
A. Borſig, Berlin-Tegel

Maßnahmen getroffen werden, wenn man von einer Kohlensorte zur anderen übergehen muß.

Kohlenstaub wird bald von zahlreichen Gruben her als fertige Handelsware bezogen werden können. Besonders ausgebildete Eisenbahnwagen müssen für die Überführung gebaut werden, da luftdichter Abschluß zur Vermeidung von Staubentwicklung notwendig ist. Heute beziehen die Werke die Kohle meist noch in stückiger Form und bereiten sie durch eigene Mahlanlagen auf. Diese bestehen aus Brechern, in denen die großen Stücke zermalmt werden, Trocknern und Mühlen, die das Feinkorn herstellen. Daran schließt sich sofort die Anlage zur Förderung nach den Hochbunkern. Wenn der Staub jetzt mit Luft durchmischt wird, kann er mittels Pumpen durch Rohrleitungen in einfachster Art vorwärtsbewegt werden. In den Bunkern entweicht die Luft durch senkrechte Abzugschächte ins Freie, der Kohlenstaub lagert sich als dichte Masse ab. Durch Einstellen von Ventilen in die Zuführungsrohre kann der Heizstoff wie Wasser an verschiedene Lagerstellen verteilt werden.




520. Schnitt durch einen Kohlenstaub-Brenner



521. Kessel mit drei Kohlenstaub-Brennern
Ausführung der AEG, Berlin

*

Wir haben bisher immer als selbstverständlich vorausgesetzt, daß durch eine von Mauerwerk umschlossene Kesselfeuerung, deren Zugkanäle hinten in einen Schornstein enden, Luft hindurchgesaugt wird. Die Erklärung dieses Vorgangs ist jedoch bisher versäumt worden.

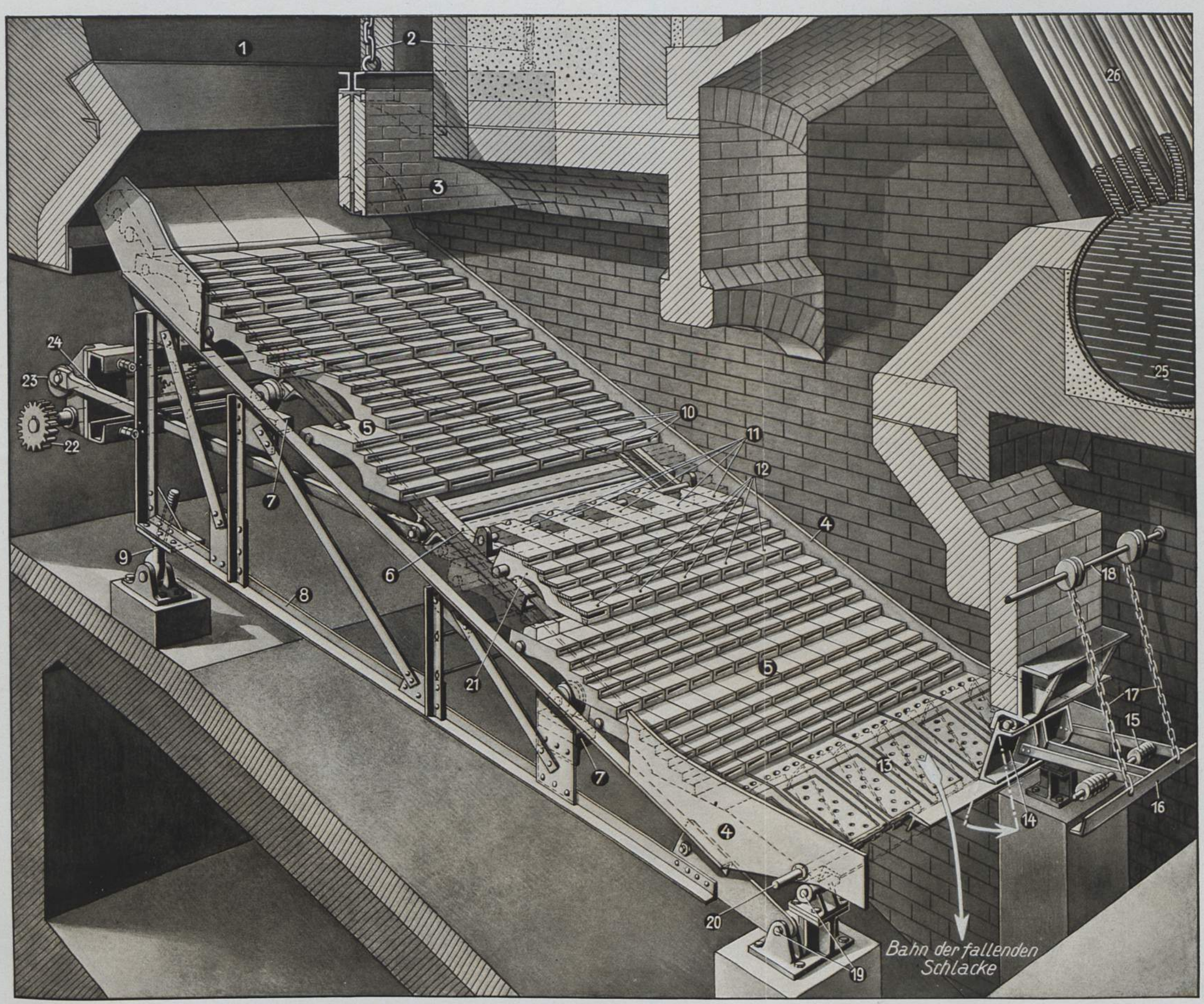
Eigentlich sollte ja jeder halbwegs gebildete Mensch wissen, wie die Schornsteinwirkung entsteht. Die Schule könnte wohl auf das Abfragen mancher Jahreszahl aus der griechischen Geschichte und auf das Lesen einiger Reden Ciceros verzichten, um Zeit für die Erörterung derartiger Dinge zu gewinnen, die den Lebensweg des modernen Menschen einsäumen, und, obgleich sie selbst vielleicht nicht von höchster Bedeutung sind, doch weite Ausblicke auf das Spiel der Naturkräfte eröffnen. Da aber die Technik noch immer das letzte Stiefkind der Schule ist, muß hier der Schornstein wie ein völlig neues Wundergerät behandelt werden.

Der Schornstein zieht! Das spricht sich leicht hin. Aber wie kommt es, daß er ohne jedes Hilfswerkzeug, bloß dadurch, daß er eine lange Röhre bildet, zu saugen vermag? Nur äußerst selten denkt jemand darüber nach.

Der Schornsteinzug entsteht durch die Verschiedenheit im Gewicht zweier Gassäulen. Von außen her lastet bei geöffneter Aschfalltür der Druck der kalten atmosphärischen Luft auf der Unterfläche der Feuerung. Im Inneren des Schlots befinden sich heiße Gase. Diese sind, weil die Wärme sie ausgedehnt hat, sehr leicht, und so erhält der Luftdruck ein Übergewicht. Er schiebt alles, was sich in den Rauchkanälen, im Fuchs und im Schornstein befindet, ständig durch dessen Mündung hinaus. Je länger der Schlot ist, je höher die Temperatur in seinem Inneren, desto größer ist der Gewichtunterschied, desto stärker die Saugkraft. Mithilfe leistet auch die Luft, welche über die Krone streicht, indem sie die oben befindlichen Gasschichten hinausreißt. Bei starkem Wind zieht der Schornstein besser als bei stillem Wetter. Es ist selbstverständlich, daß seine Wirkung im Sommer schlechter ist als im Winter, denn warme Luft ist leichter als kalte.

Man gibt den Schornsteinen heute fast ausnahmslos einen kreisrunden Querschnitt. Bei solcher Gestaltung ist die Aufwendung an Mauerwerk, auf die Lichtweite bezogen, am geringsten, die Abkühlungsflächen, welche die aufsteigenden Gase vorfinden, sind am kleinsten, und der Wind trifft die geringste Angriffsfläche.

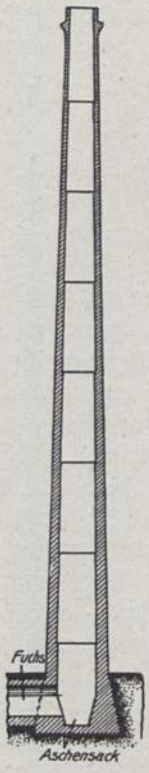
Daß man dem aus Mauersteinen oder Eisenbeton aufgeführten Schornstein oben ein auskragendes Gesims gibt, ist günstig für die ästhetische Wirkung des Bauwerks. Völlig glatte Schlote, wie sie zum Beispiel das Großkraftwerk Golpa-Zschornewitz hat, sehen häßlich aus, wie gewaltige Bäume, denen man die Krone abgeschlagen hat. Die Ähnlichkeit der runden, schlanken, nach oben sich verjüngenden Schornsteinsäule mit einem Baumstamm kann auch sonst nicht verkannt werden. Deshalb ist es falsch, dem Bauwerk einen „architektonischen" Sockel zu geben. Der Baum setzt auch ohne eine Verbreiterung auf dem Boden an und ist gewiß eins der schönsten Gebilde, die das Menschenauge sehen kann.



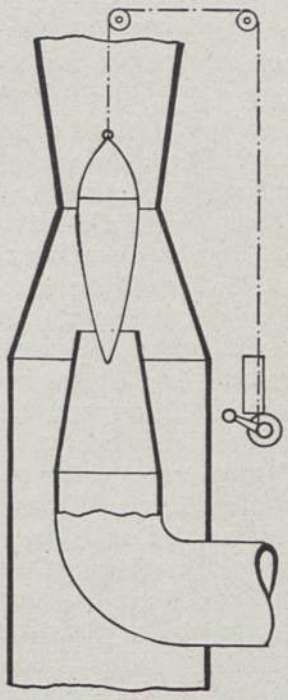

Vorschub-Treppenrost

1. Kohlentrichter. 2. Schieber-Kettenzug. 3. Kohlen-Absperrschieber. 4. Rost-Wange. 5. Rost (schachbrettartig). 6. Vorschubrahmen (fahrbar). 7. Fahrschiene. 8. Gestell für Schräglage. 9. Winkelsteller. 10. Luftspalte im Rost. 11. Bewegliche Vorschub-Rostglieder. 12. Feststehende Rostglieder. 13. Schlackenrost. 14. Feuerbrückenkörper geschlossen (Pfeilstellung geöffnet). 15. Fallgewicht. 16. Verbindungsschiene. 17. Kettenzug. 18. Kettenzug-Antriebwelle. 19. Gestell-Drehzapfen. 20. Antriebwelle zum Ausschwenken der Rostplatten. 21. Schnitt durch ein Rostglied. 22. Antrieb zum Rost. 23. Exzenter. 24. Vorschubstange. 25. Unterwasserkessel. 26. Siederohre. Bauart von L. & C. Steinmüller, Gummersbach (Rheinland)

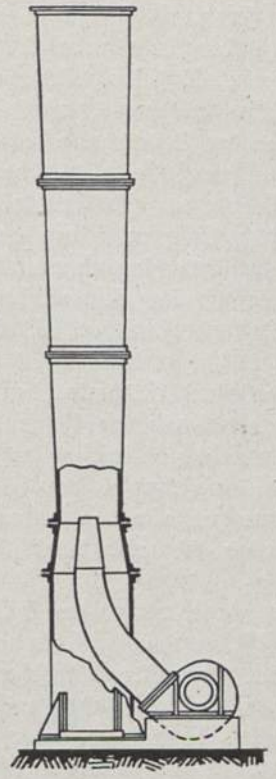
Heute läßt man denn auch das Fundament meist bereits unter Flur abschließen. Der Unterbau erhält immer häufiger runde als eckige Gestalt. In einer überwölbten Öffnung endet darin der Fuchs (Bild 522). Die Schornsteinröhre reicht gewöhnlich 60 oder 70 Zentimeter unter den Boden des Fuchses hinab, wodurch ein Aschensack entsteht, in den ein Teil der vom Gasstrom mitgeführten Ruß- und Aschenteilchen absinkt. Ausräumung des Behälters von Zeit zu Zeit, die freilich keine angenehme Arbeit ist, darf nicht versäumt werden.




522. Schornstein für natürlichen Zug



523. Regelung des künstlichen Zugs durch Veränderung des Austrittquerschnitts der Düse



524. Schnitt durch eine indirekt wirkende Saugzuganlage, System Schwabach

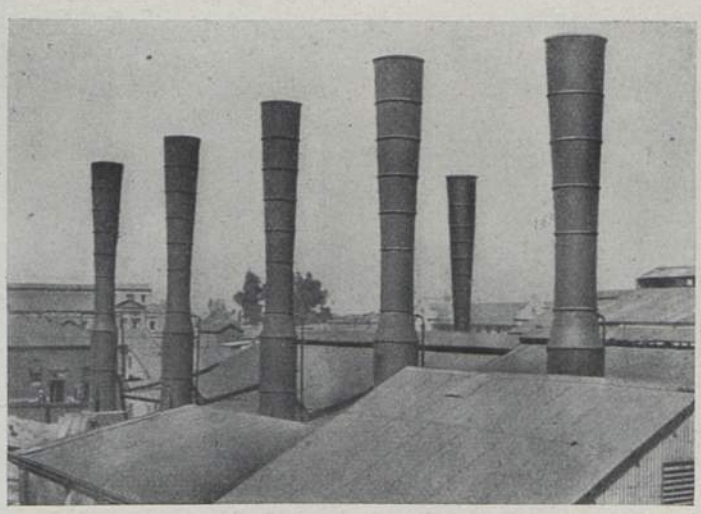
Auf Bildern, die große Industrie-Anlagen zeigen, bringen die Maler gern mächtig qualmende Schornsteine an. Die dunklen wehenden Fahnen sehen sehr hübsch aus, wenn sie sich vom lichten Himmel abheben, aber sie sind nicht gerade das Kennzeichen eines gut geführten Kesselbetriebs. Fast alles, was im Bereich der Technik das Malerauge reizt, ist dem Ingenieur ein Greuel. Die frei waltende Natur ist eben schöner als die gebändigte. Diese aber wirkt nutzreicher für den Menschen, und die ewigen ehernen Gesetze, unter denen wir alle unseres Daseins Kreis vollenden müssen, zwingen uns nun einmal dazu, der hehren Göttin immer mehr Fesseln anzulegen. Ein technisches Wahrzeichen ist der Schornstein heute noch immer; aber ein Techniker, der Einfluß auf die Entstehung eines Industriebildes hat, muß darauf dringen, daß die Rauchfahne eingezogen wird. Sie deutet auf Nachlässigkeit und Vergeudung von Wärme-Energie.

Unendlich viele hohe Fabrikschornsteine stehen in allen Ländern, aber es ist nicht mehr notwendig, daß sie überall dort zu sehen sind, wo Dampfkessel arbeiten. Denn an die Stelle des natürlichen Zugs durch eine lange Röhre tritt immer häufiger die künstliche Zugerzeugung, die nur noch Schlotstummel, niedrige Blechrohre, braucht.

Die Kraft des natürlichen Zugs findet ihre Grenze darin, daß die Schornsteine nicht beliebig hoch gemacht werden können. Über 90 Meter hinaus wird man kaum jemals gehen, da der Bau alsdann zu teuer wird. In großen Anlagen werden auch mancherlei Vorrichtungen, wie Überhitzer und Vorwärmer, in den Weg der Feuergase gestellt, die ihre Geschwindigkeit abbremsen und sie außerdem durch Wärmeentziehung so weit abkühlen, daß die Gassäule im Schornstein zu schwer wird. Die Verbrennung grusiger oder mulmiger Kohle aber, die nur schwer von der Luft durchdrungen werden kann, oder der scharfe Betrieb von Hochleistungskesseln fordern aber einen sehr kräftigen Sog. Fabriken liegen auch manchmal an Orten, deren ästhetisches Gesamtbild durch die Aufführung einer hohen Schornsteinröhre allzu stark beeinträchtigt werden würde. In allen solchen Fällen muß zur Zugerzeugung durch besondere Mittel geschritten werden.

Das älteste Werkzeug für die künstliche Luftabsaugung ist das von Stephenson eingeführte Blasrohr der Lokomotive (Band II, Seite 157). Diese Maschine kann immer nur einen sehr kurzen Schlot haben, damit sie frei unter allen Brücken und sonstigen Überbauten sowie durch Tunnel hindurchfahren kann. Man läßt daher den Abdampf aus den Zylindern durch den Schornstein streichen, wobei er die Gase aus den Heizröhren sehr kräftig mitreißt. Es entsteht, da der Abdampf aus der kondensatorlosen Lokomotive noch hohe Spannung, also große Geschwindigkeit hat, eine ebenso starke Zugwirkung, als hätte die Maschine einen Schornstein von etwa hundert Metern Höhe und zwei Metern Durchmesser.

Ein aufwärts gerichteter Dampfstrahl wird auch hier und da bei ortfesten Anlagen zur Zugverstärkung benutzt. Der Betrieb solcher Art ist aber im allgemeinen zu teuer, da er sehr erhebliche Mengen Frischdampf aus dem Kessel erfordert. Denn die weitaus größte Zahl der ortfesten Dampfmaschinen wird ja mit Kondensation betrieben, so daß kein Abdampf zur Verfügung steht. Fast überall wird der künstliche Zug daher durch Schleuderradgebläse erzeugt, durch Flügelräder, die in Gehäusen umlaufen und Gas oder Luft vor sich hertreiben.



525. Kesselhäuser mit indirekt wirkenden Saugzuganlagen
Bauart der Gesellschaft für künstlichen Zug, Berlin

Es sind zu unterscheiden die Unterwind- und die Saugzug-

Einrichtungen, die wiederum in zwei Gattungen zerfallen. Bei Unterwind-Anlagen wird die Luft vom Aschenraum her durch die Feuerung gedrückt. Der Aschenfall oder der gesamte Heizraum müssen alsdann verschlossen gehalten werden, wie wir das bei der Besprechung des Betriebs von Schiffskesseln in Band III auf Seite 163 bereits gehört haben. Unterwindgebläse werden für Landkessel nicht so häufig angewendet wie auf Schiffen. Auch auf diesen Fahrzeugen kann man mit natürlichem Zug nicht auskommen, weil die Schornsteine hier ebenfalls kurz sein müssen, damit durch sie kein allzu großer Luftwiderstand entsteht bzw. der ästhetische Anblick nicht beeinträchtigt wird.

Beim Saugzug arbeitet das Gebläse hinter den Rauchkanälen, es zieht also die Luft durch die Feuerung. Bei unmittelbar wirkenden Anlagen steht die Maschine im Weg der Rauchgase, diese gehen durch die Kapsel des Flügelrads hindurch. Die Gebläsemaschine hat also den gesamten Abgang des Kessels zu verarbeiten, sie wird durch Ruß und Asche stark verunreinigt.

Soll dies vermieden werden, so stellt man das Gebläse abseits auf (Tafel XIX, 1) und läßt von ihm durch ein besonderes Rohr, das in einer Düse endet, einen Strom frischer Luft in den Schlot blasen (Bild 524). Auch hierdurch entsteht ein Unterdruck in den Heizgaskanälen, der indirekt die gewünschte Saugwirkung übt. Durch Regelung der Umdrehungszahl des Gebläses oder durch Veränderung des Austrittsquerschnitts der Düse, z. B. durch einen Gegenkegel, wie ihn Bild 523 zeigt, kann die Saugkraft beliebig eingestellt werden.

Die Unregelmäßigkeiten, die beim Schornsteinzug durch die verschiedenen Windstärken und den Wechsel der Außentemperatur entstehen, fallen bei allen künstlichen Anlagen fort. In jedem Augenblick ist es mit ihrer Hilfe möglich, den Kessel übernormal anzustrengen, indem man die Luftzufuhr durch Erhöhung der Saugkraft steigert.

Die Schornsteine auf Kesselhäusern, in denen mit künstlichem Zug gearbeitet wird, brauchen nur 2 bis 3 Meter hoch zu sein. Rauchfahnen erblickt man über ihnen fast nie, da die Verbrennung im Kessel durch genügende Luftzufuhr stets sehr vollkommen gestaltet werden kann. Leider aber sehen die schwarz getünchten Aufsätze sehr häßlich aus (Bild 525). Sie verunstalten die schönste Architektur eigentlich weit mehr als es eine noch so hohe gemauerte Röhre tun kann. Es ist daher wünschenswert, daß von den Fabriken, die Vorrichtungen für künstlichen Zug herstellen, danach gestrebt wird, die außen liegenden Teile wohlgefälliger durchzubilden.

*

Nachdem wir einiges über das Feuer, seine Lage, Bedienung und Anfachung gehört haben, ist nun die Zuführung und Behandlung des Stoffs zu besprechen, zu dessen Wandlung der Kessel geheizt wird. Das Wasser tritt hier nicht wie in der freien Natur dem Feuer feindlich entgegen, sondern erwartet sehnsüchtig seine glühenden Umarmungen.

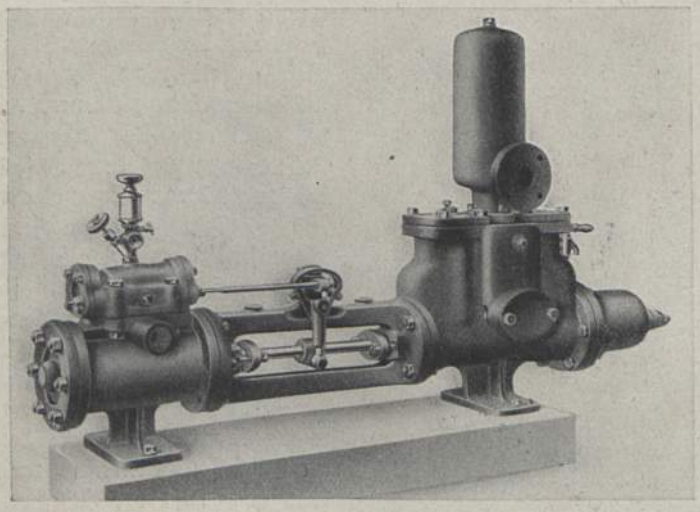
Es wurde schon erwähnt, daß die Öffnung des Speiserohrs, das meist von oben her eingeführt wird, stets unter dem Niedrigstwasserspiegel liegt. Denn ließe man es im Dampfraum enden, so würde das plötzlich eintretende mehr oder weniger kalte Wasser die zunächstliegenden Dampfmengen kondensieren, wodurch störende Bewegungen, ja schwere Schläge entstehen könnten.

Das Gesetz schreibt vor, daß der zulässige Niedrigstwasserspiegel an der Stirnwand des Kessels durch eine feste Marke zu kennzeichnen ist. Damit eine Unterschreitung dieses Kennstrichs, die ja schwere Gefahr bringt, ausgeschlossen ist, wenn der Heizer seine Pflicht auch nur einigermaßen erfüllt, gebieten die Vorschriften weiter, daß zwei voneinander unabhängige Speisevorrichtungen vorhanden sein müssen, von denen jede imstande ist, dem Kessel in der Stunde doppelt so viel Wasser zuzuführen, wie er bei normalem Betrieb während dieser Zeit in Dampf zu verwandeln vermag.

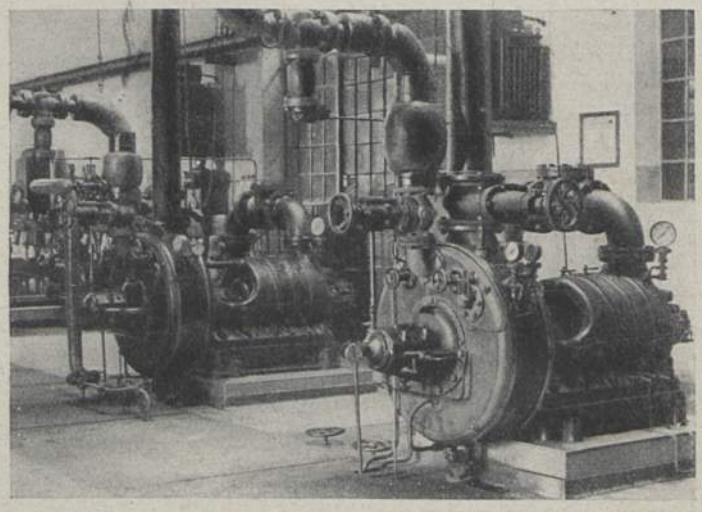
Es sind hauptsächlich zwei Vorrichtungen, die zur Kesselspeisung benutzt werden: die Pumpe und der Injektor.

Der wirkende Teil der Pumpe kann ein Kolben oder ein Schleuderrad sein. Kolbenpumpen werden unmittelbar an die Hauptdampfmaschine angehängt oder erhalten eigenen Dampfantrieb ohne Kurbelgetriebe wie auf Bild 526. Den geschwinder laufenden Schleuderpumpen dient ein Elektromotor oder eine kleine Turbine als Antrieb (Bild 527).

Ein Gerät eigenartiger Bauart und von zunächst recht seltsam erscheinender Wirkung ist der Injektor, zu deutsch Strahlpumpe genannt. Er ist von dem Franzosen Giffard



526. Kesselspeisepumpe, System Voith
Kolbenpumpe mit eigenem Dampfantrieb. Schäffer & Budenberg, Magdeburg-Buckau



527. Kesselspeisepumpen
Kreiselpumpen mit Turboantrieb
Maffei-Schwartzkopff Werke G. m. b. H., Berlin

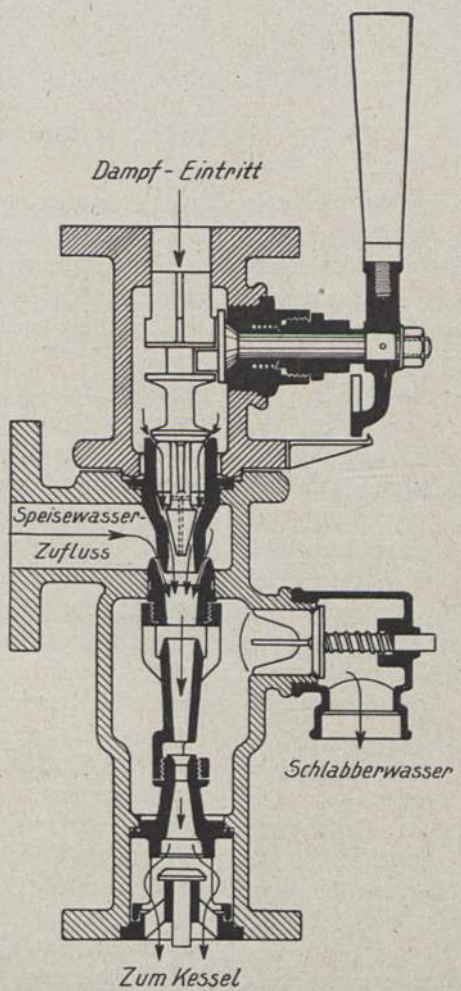
erfunden worden, einem Maschineningenieur, der als Erster einen vernünftigen Motor in eine Luftschiffgondel eingebaut hat. Wie in Band III auf Seite 364 erzählt wurde, ist Preußen infolge seiner besonders harten Prüfungsbestimmungen der einzige Staat gewesen, der ihm die Erteilung eines Patents auf seinen Apparat verweigerte.

Der Injektor hat gar keine bei der Arbeit sich bewegenden Teile. Der Kesseldampf, der in besonderer Weise durch das Gehäuse geführt wird, saugt das Wasser an, gibt ihm geschwinde Vorwärtsbewegung und treibt es so schließlich in den Kessel hinein, wobei er vom Wasser kondensiert wird. Es gelingt ihm also, den Druck in dem Gefäß zu überwinden, in dem er entstanden ist. Man wird an das Märchen von Münchhausen erinnert, der sich selbst an den Haaren aus dem Sumpf zieht, und doch spielt sich der Vorgang täglich unzählige Male in aber tausend Kesselhäusern ab.

Bild 528 zeigt einen Schnitt durch einen Injektor. Von oben wird der Treibdampf zugeführt, der durch die regelbare Eintrittsdüse zu der Mischdüse gelangt. Indem er diese mit großer Geschwindigkeit durchströmt, erzeugt er darin eine Luftverdünnung, wodurch Wasser durch das obere Rohr links angesaugt wird. Die kalte Flüssigkeit wirkt kondensierend auf den Dampf und steigert die Luftleere. Es bildet sich ein aus Wasser und Dampf bestehender Strahl, der mit großer Geschwindigkeit in die Fangdüse dringt. In dieser geschieht nun das Wunderbare, nämlich die Drucksteigerung, die natürlich nicht auf okkultem Weg, sondern durch eine leicht zu verfolgende Energie-Umwandlung eintritt, die wir schon von den Turbinen her kennen.

Der lichte Querschnitt der Fangdüse erweitert sich nach dem Ende zu, wodurch die Geschwindigkeit des Strahls allmählich verringert wird. Was an Wegstrecke in der Sekunde hierdurch verloren geht, erscheint als Druckerhöhung wieder, da die lebendige Kraft des bewegten Körpers, der ja innerhalb der Düse, abgesehen von der Überwindung der Reibungswiderstände, keine Arbeit zu leisten hat, nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie immer gleich bleiben muß. Der Wert des Produkts Kraft × Weg ändert sich nicht; es geschieht nur eine Wandlung der beiden Faktoren. Nach dem Verlassen der Düse ist der Strahl fähig, das Speiseventil aufzuschlagen und in den Kessel einzudringen.

Da der Dampfbedarf beim Beginn der Injektorarbeit geringer ist, als wenn der Apparat sich in Gang befindet, so muß die aus der Eintrittdrüse strömende Dampfmenge regelbar sein. Deshalb ist der Kegel vorgesehen, der mittels des rechts angebrachten Handhebels an der senkrechten Stange gehoben und gesenkt werden kann. Zwischen der Misch- und der Fangdüse befindet sich eine Unterbrechung der Strahlleitung, durch die beim Anlassen überschüssiger Dampf oder zu viel eingedrungenes Wasser austreten können, bis das richtige Mischungsverhältnis hergestellt ist. Das ausgeworfene Schlabberwasser wird durch ein besonderes Rohr abgeführt.




528. Schnitt durch einen Injektor

Der Injektor hat den Vorzug gegenüber der gewöhnlichen Pumpe, daß er vorgewärmtes Wasser in den Kessel bringt. Während der Betrieb von Dampfstrahlpumpen sonst sehr kostspielig ist, weil sie viel Dampf verbrauchen, wird er hier billig, da ja der gesamte Wärmeinhalt des Treibdampfs dem Kessel wieder zugute kommt. Die Injektoren arbeiten aber nur günstig für eine bestimmte Fördermenge in der Minute. Es mangelt ihnen die Anpassungsfähigkeit an die wechselnden Bedürfnisse des Kessels, weshalb sie stets nur in Verbindung mit Kolben- oder Schleuderpumpen angewendet werden. Die Einfachheit der Vorrichtung aber, ihre geringen Abmessungen und das Fehlen jeglicher Teile, die eine Schmierung erfordern, machen sie zu einem willkommenen Gerät.

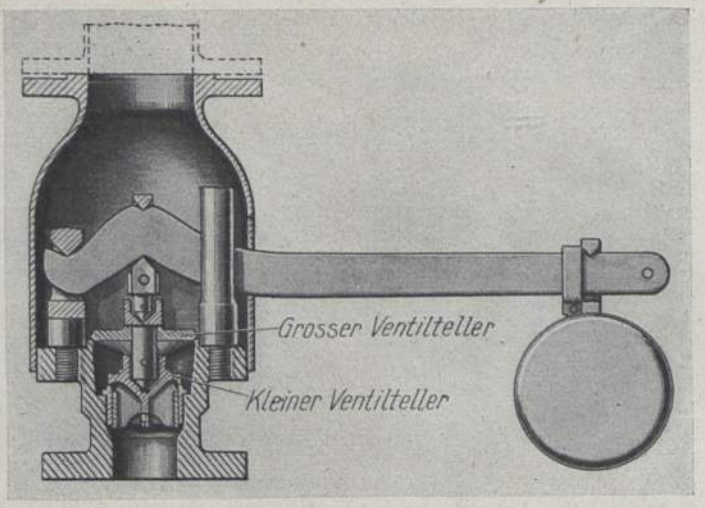
Ein Speiseventil von der Art wie es auf Bild 537 dargestellt ist, muß stets in den Rohrstrang zwischen Speisevorrichtung und Kessel geschaltet sein. Es ist ein Rückschlagventil, das vom Kesseldampf zugepreßt wird und beim Versagen der Speisevorrichtung Wasseraustritt unmöglich macht.

Das in der Natur vorkommende Wasser ist sehr selten ohne weiteres zur Kesselspeisung geeignet. Denn es enthält fast stets Beimengungen, die teils nur mechanisch, teils aber auch chemisch mit ihm verbunden sind, und, wenn sie in den Kessel gelangen, schädlich wirken. Die mechanischen Beimengungen, mehr oder weniger fein verteilte Schlamm- oder Lehmteilchen, lassen sich oft schon dadurch abscheiden, daß man das Wasser in Klärbecken stehen läßt, wo sie sich niederschlagen. Besser noch ist die Reinigung, wenn das Wasser gefiltert, durch eine Kies- oder Koksschicht gedrückt wird. Weit schwieriger gestaltet sich die chemische Speisewasserreinigung, die aber höchste Wichtigkeit hat, weil gerade die im Wasser gelösten Stoffe die gefährlichsten Feinde des Kessels sind.

Der mit Recht verrufene Kesselstein wird in der Hauptsache durch doppeltkohlensauren und schwefelsauren Kalk sowie durch Magnesiasalze gebildet, die sich im Wasser oft in sehr erheblichen Mengen vorfinden. Sie schlagen sich bei der Verdampfung an den Kesselwänden nieder und bilden einen dicken, festen Belag. Er ist doppelt schädlich, weil er als schlechter Wärmeleiter den Übergang der Wärme in das Wasser hindert und durch Aufhebung der Wasserberührung leicht Ursache des Erglühens von Wandungsteilen sein kann. Es ist durch Untersuchungen festgestellt worden, daß schon eine Kesselsteinschicht von nur einem Millimeter Stärke genügt, um den Kohlenverbrauch um 5 v. H. zu steigern.

Solange es Dampfkessel gibt, sind immer wieder Mittel angegeben worden, die, wenn man sie dem Speise-

wasser beimengt, die Kesselsteinbildung sicher verhüten sollen. Sehr oft hüllt der „Erfinder" die Zusammensetzung der Arznei gegen das Steinleiden des Kessels in tiefes Geheimnis. Es ist aber tatsächlich bis jetzt keine Substanz gefunden worden, die innerhalb des Kessels wirkt. Alle Geheimmittel sind zu verwerfen. Die einzig nützliche Art, der Kesselsteinbildung entgegenzutreten, ist eine chemische Behandlung des Wassers vor seinem Eintritt in das Dampferzeugungsgefäß.




529. Hochschub-Sicherheitsventil

Für die chemische Vorreinigung werden insbesondere Ätzkalk, Ätznatron und Soda verwendet, ferner das Permutit, ein Stoff, der durch das Schmelzen von Feldspat, Kaolin, Ton, Sand und Soda entsteht. Er wird als eine starke Schicht in den Wasserstrom gesetzt, und das Wasser verliert beim Hindurchgehen den größten Teil der schädlichen Bestandteile. Die Wasserreinigung erfordert meist die Aufstellung umfangreicher Gefäße (Bild 533).

Völlig steinfrei bleibt aber der Kessel auch bei den sorgfältigsten Gegenvorkehrungen nicht. Er muß deshalb von Zeit zu Zeit gereinigt werden. Das geschieht bei den Großraumkesseln durch Befahren, wobei der Belag mit geeigneten Werkzeugen bequem abgeklopft werden kann. Für die dünnen Wasserrohre sind mancherlei einführbare Reinigungswerkzeuge erdacht worden. Gerade Wasserrohrkessel sind am empfindlichsten gegen Kesselsteinbildung, auch die Heizrohrkessel haben eine sehr lebhafte Abneigung dagegen, am gleichgültigsten verhalten sich noch die Flammrohrkessel.

Die gewöhnlichen Speisewasserpumpen führen dem Kessel nicht wie der Injektor vorgewärmtes Wasser zu. Das ist aber sehr willkommen, weil die erhitzten Kesselwände stark geschont werden, wenn sie nicht fortwährend mit Wasser niedriger Temperaturen in Berührung kommen. Es bietet sich nun ein Stoff, der stets in der Umgebung des Kessels vorhanden ist, fast von selbst dazu an, das kalte, von der Pumpe herkommende Wasser vorzuwärmen. Es ist das die Masse der Heiz- oder Feuergase, denen in den Zügen ja längst nicht der ganze Wärmeinhalt genommen wird. Wenn man dem Wasser Gelegenheit gibt, auf seinem Weg durch die Speiseleitung viele Röhren von nicht zu großem Durchmesser zu durchlaufen, die außen von dem Strom der Feuergase bestrichen werden, ist es möglich, seine Temperatur hier bereits dem Verdampfungspunkt nahe zu bringen, ohne daß eine besondere Brennstoffaufwendung notwendig ist.

Der Vorwärmer heißt in England mit Recht economiser (sprich: ekonomeiser), das ist Sparer, denn durch ihn wird die Kohlenmenge eingespart, die sonst zur ersten Durchwärmung des Wassers im Kessel selbst erforderlich ist. Man setzt die Vorrichtung, weil sie sehr beträchtliche Ausmaße hat, nicht in die Kesselmauerung, sondern bringt sie je nach der Führung der Feuergase entweder in einer Erweiterung des Fuchses oder in der Nähe des Kesselfirstes unter (Tafel XIX). Die stets senkrechten, in vielen Längs- und Querreihen gestellten Rohre beginnen oben in einem gemeinschaftlichen Kasten, dem das kalte Wasser zufließt. Das untere Sammelgefäß, aus dem die Speiseleitung zum Kessel weiterführt, ist in viele Einzelrohre aufgelöst, zwischen denen Spalte offen bleiben. Diese sind notwendig, weil sich an den Rohren stets sehr viel Ruß und Flugasche festsetzen, die von den Heizgasen herangeführt werden. Es ist deshalb eine dauernde Reinigung der Rohraußenwände erforderlich.

Zu diesem Zweck ist über jedes Rohr eine eiserne Manschette gezogen, die lose anschließt und auf und nieder bewegt werden kann. Durch eine langsam gedrehte Welle mit Kettenrädern werden die Manschetten hin und her gezogen, wobei sie immer wieder die sich bildende Kruste abstreifen, die sonst wärmeabhaltend wirken würde. Es sind immer vier Manschetten oder Schraper zusammen an eine Kette gehängt, und zwar so, daß zwei sich nach oben bewegen, während die beiden anderen absteigen. Der Antrieb hat also nur die Reibungswiderstände zu überwinden. Ein selbsttätiges Wendegetriebe kehrt die Drehrichtung der Kettenräder um, sobald die Schraper das Hubende erreicht haben. Die abgestreiften Massen fallen durch die Spalte zwischen den unteren Sammelrohren in einen Trichter, aus dem sie von Zeit zu Zeit entfernt werden.

Immer häufiger läßt man heute jedoch das Speisewasser durch Dampf vorwärmen. Er wird dem Kessel entnommen, muß aber, damit seine Heiztätigkeit nicht zu teuer wird, vorher noch Arbeit leisten. Man stellt besondere, sogenannte Vorwärm-Turbinen auf, die gewöhnlich kleinere Dynamos zur Erzeugung von Strom für die Bedürfnisse des Werks selbst treiben, und zapft diese Turbinen an einer geeigneten Stufe an (Seite 271). Der Abdampf umspült alsdann in besonderen Gefäßen das Speisewasser, das durch Rohrschlangen läuft, und gibt seine Wärme an diese. Die abziehenden Heizgase werden in solchen Fällen sehr häufig zur Vorwärmung der Luft benutzt, die bei Anwendung künstlichen Zugs durch die Feuerung gejagt wird.

Ein anderes Mal, und zwar bevor sie noch den Speisewasser- oder Luft-Vorwärmer erreichen, werden die Heizgase zur Erwärmung eines besonderen Rohrsystems ausgenutzt.

Wir haben bereits in früheren Abschnitten (S. 205—207, 241, 269) den Nutzen des überhitzten oder Heißdampfs kennen gelernt. Er mindert die Wärmeverluste sowohl in der Kolbenmaschine wie in der Turbine erheblich. Es ist natürlich sehr willkommen, daß auch dieser Gewinn ohne die Aufstellung einer besonderen Feuerung gemacht werden kann. Da im Überhitzer der Dampf auf 350 bis 450 Grad gebracht werden muß, darf dieses Gerät nicht fernab aufgestellt werden wie der Vorwärmer, sondern muß sich an einer Stelle befinden, bei deren Durchschreitung die Gase noch sehr heiß sind. Bei den auf den Tafeln XVIII und XIX dargestellten Kesseln liegen die Überhitzerrohre über und zwischen den Wasserrohren. Bei Flammrohrkesseln wird das

System dicht hinter das Flammrohr gelegt. Stets befindet es sich hinter dem ersten Zug.

Ein Überhitzerrohr muß ganz anders gestaltet sein als ein Wasserrohr, da die Inhalte beider sehr verschieden sind. Das Wasserrohr birgt Wasser oder gesättigten Dampf, der, da überall im Kessel derselbe Druck herrscht, auch an allen Stellen gleiche Temperatur hat (Seite 279). Das Wasserrohr kann daher bei nicht zu hoch beanspruchten Kesseln geradlinig sein, weil Wärmeunterschiede in seinem Verlauf, die zu Werfungen Anlaß geben, nicht vorkommen. Verschiedenartige Beheizungsgrade werden durch innere Wärmeabführung sogleich ausgeglichen. Man darf dem Rohr auch geringe Wandstärke geben, da es durch Wasser oder Sattdampf, die gute Wärmeleiter sind, stets von innen gekühlt wird.

Der völlig trockene überhitzte Dampf aber ist ein sehr schlechter Wärmeleiter; er wirkt also nicht kühlend. Außerdem können in einem langen Überhitzerrohr die verschiedensten Temperaturen nebeneinander bestehen, da der Heißdampf sich wie ein Gas verhält, bei dem Druck und Temperatur nicht mehr in unentrinnbarer Abhängigkeit voneinander stehen. Wird das Überhitzerrohr an einer Stelle durch irgendeine Unregelmäßigkeit in den Zügen stärker erhitzt als an anderen, dann wird es hier tatsächlich mehr gedehnt, weil der Wärmeausgleich fehlt.

Der Innendruck ist aber im Überhitzer trotz gesteigerter Temperatur überall gleich dem Kesseldruck, da ein Ansteigen über diesen wegen des zwar schmalen aber doch bestehenden Zusammenhangs zwischen beiden Gefäßen nicht möglich ist. Es findet immer sofort ein Ausgleich statt.

Infolge der mangelnden Kühlung müssen die Überhitzerrohre sehr erhebliche Wandstärken erhalten. Damit die Material-Spannungen in den einzelnen Rohren, die infolge der verschiedenartigen Erhitzung entstehen, nicht zerstörend wirken, erhalten die Rohre stets eine geschwungene Form, die Verschiebungen ohne weiteres zuläßt.

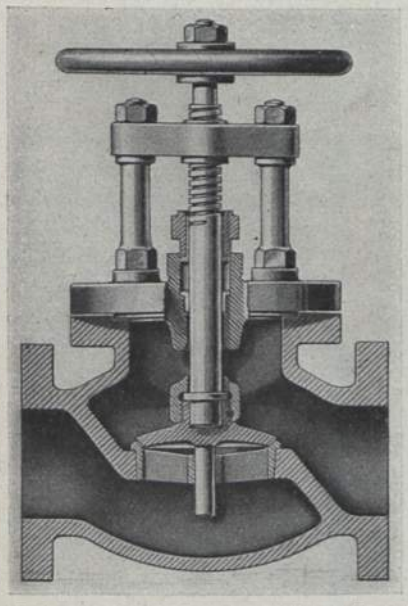
Der Sattdampf aus dem Kessel strömt in ein Sammelgefäß, von dem aus viele parallel geschaltete Rohre in ein zweites Gefäß, den Heißdampfsammler, gehen; von hier aus wird der überhitzte Dampf zur Maschine geführt. Die Rohre, die fast stets aus Schmiedeisen gefertigt werden, sind haarnadelförmig gebogen und bilden eine vielfach gekrümmte ebene Schlange (Tafeln XVIII und XIX).

Zur Aufrechterhaltung eines regelrechten Betriebs ist es notwendig, den Überhitzungsgrad nach Belieben einstellen zu können. Dies geschieht entweder mittels Klappen, die in den Weg der Heizgase gebracht werden können und sie zwingen, zum Teil einen Umführungskanal zu durchziehen, in dem sie dem Überhitzer fern bleiben, oder durch Beimischung von mehr oder weniger großen Mengen des weit kühleren Sattdampfs. Zu diesem Zweck wird das Rohr, das vom Heißdampfsammler fortführt, durch den Oberkessel geleitet, wo ein von außen her bedienbares Ventil die Beigabe von Sattdampf gestattet.

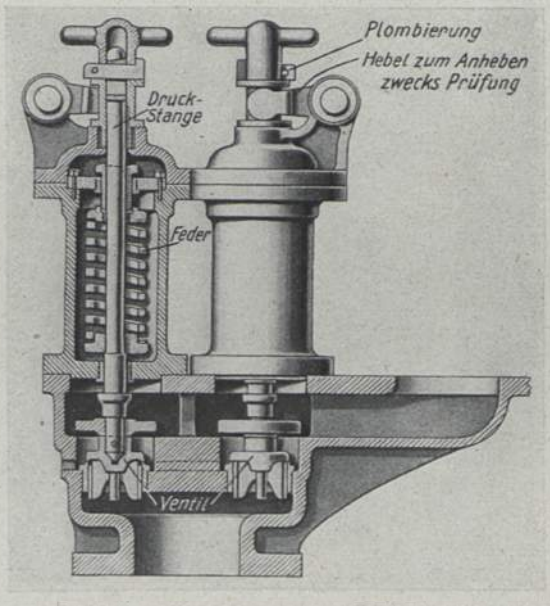
*

Damit die Vorgänge in dem klobigen, verschlossenen Dampferzeugungsgefäß vom Wärter genau und leicht nach seinem Willen gelenkt werden können, ist der Kessel mit zahlreichen Hilfswerkzeugen ausgerüstet. Sie dienen zu einem Teil unmittelbar der Bedienung, die meisten aber sind Beobachtungsinstrumente, die dem Kessel, so darf man wohl sagen, eine Stimme geben, damit er jeder Zeit kenntlich machen kann, wie er sich befindet, im Notfall sehr eindrucksvoll kund zu tun vermag, was er leidet. Man faßt alle diese Teile unter dem Namen Kessel-Ausrüstung oder Kessel-Armatur, das heißt Bewehrung, zusammen.

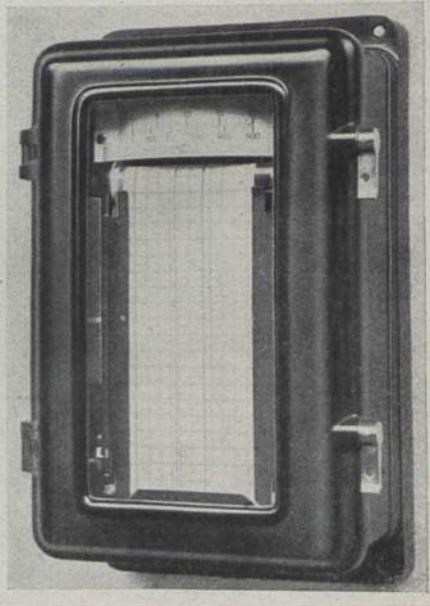
Ein Hauptstück der Armatur ist das große Absperrventil, das unweit des Naßdampf- oder Heißdampfsammlers in das zur Maschine führende Rohr geschaltet wird. Die am häufigsten verwendete Bauart ist durch das Bild 530 veranschaulicht. Wenn der Ventilkörper durch Drehen an dem Handrad von seinem Sitz abgehoben wird, kann der Dampf aus dem links ansetzenden Rohrteil frei in den rechts weiterführenden Strang strömen.



530. Das Absperrventil
sitzt zwischen Dampfsammler und Maschine und dient zur völligen Absperrung der Dampfzufuhr




531. Doppel-Sicherheitsventil mit Federbelastung
Die Handgriffe zum Nachspannen der Federn werden nach jeder amtlichen Revision durch Bleisiegel festgelegt



532. Fernschreiber für Dampftemperatur und $CO_2$-Gehalt der Abgase
Siemens & Halske A.-G., Berlin

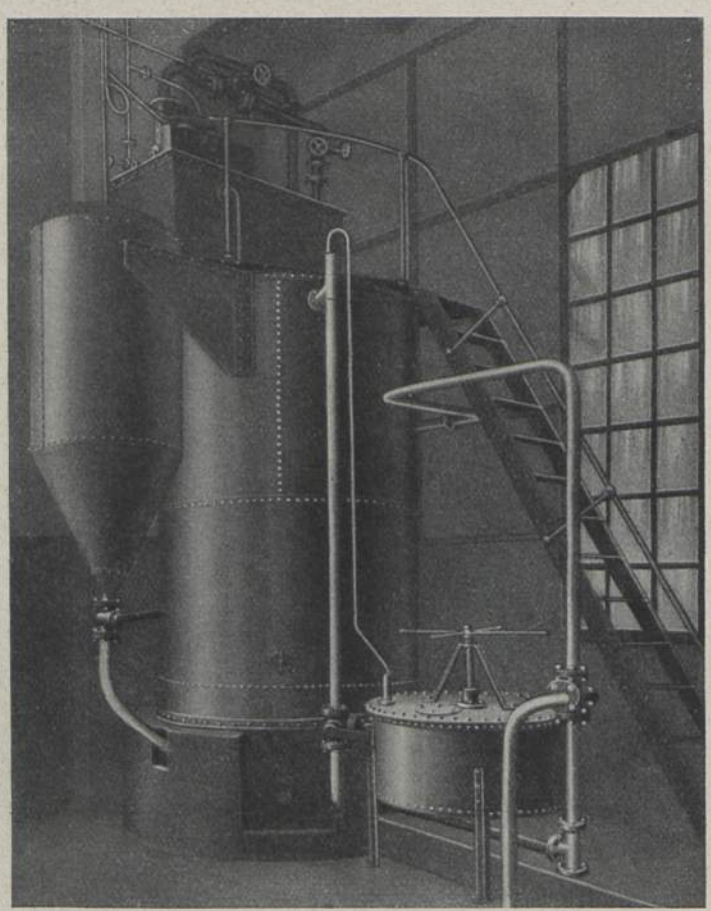
In das auf Bild 481 gekennzeichnete Ablaßrohr, das an der tiefsten Stelle des Kessels ansetzt, ist ebenfalls ein Ventil mit Handrad geschaltet. Während des Betriebs bleibt es geschlossen; soll der Kessel entleert werden, wird es vom Wärter aufgedreht.

Am anderen Pol, der höchst gelegenen Kesselstelle, hat sich das Sicherheitsventil zu befinden. Im Gegensatz zu seinen eben erwähnten Brüdern arbeitet es selbsttätig. Steigt durch eine Nachlässigkeit des Heizers oder weil plötzlich eine große Maschine abgeschaltet wird der Druck im Kessel über das zulässige Maß, so schlägt das Ventil auf, gibt eine Öffnung frei, und der Dampf bläst ab. Es ist freilich nicht möglich, den Auslaß so groß zu machen, daß auf diese Weise eine rasche und vollkommene Entlastung des Kessels eintritt. Die Druckminderung durch die Notöffnung geht nur langsam vor sich. Das Sicherheitsventil ist in der Hauptsache als ein Alarmapparat aufzufassen; es ruft den Heizer zu Maßnahmen auf, die den Dampfdruck geschwind hinunter zu setzen vermögen. In dieser Richtung wirken besonders kräftig eine rasche Dämpfung des Feuers oder das Ingangsetzen der Speisevorrichtung, die kältere Flüssigkeit hineinschafft.

Die akustische Wirkung des Sicherheitsventils ist unter allen Umständen geeignet, den Wärter zu eifriger Tätigkeit anzuspornen, denn es verursacht schon bei Kesseln mit mittlerem Druck einen ohrenbetäubenden, nervenaufpeitschenden Lärm. Jeder kennt das scharfe Geräusch, das die ganze Bahnhofhalle durchtönt, wenn eine Lokomotive abzublasen beginnt. In einem geschlossenen Kesselhaus ist diese Mißfallensäußerung des Kessels noch weit eindrucksvoller. Damit der Raum sich nicht mit Dampf füllt, ist das Ventilgehäuse meist mit einem Ablaßrohr versehen, das den größten Teil des ausströmenden Dampfs nach außen führt. Denn es ist vorgekommen, daß der rasch an den Kessel springende Heizer durch den siedend heißen Strom verbrüht, ja getötet wurde. Ein Teil des Abdampfs muß aber stets unmittelbar in den Kesselraum treten, damit die Alarmwirkung bleibt.

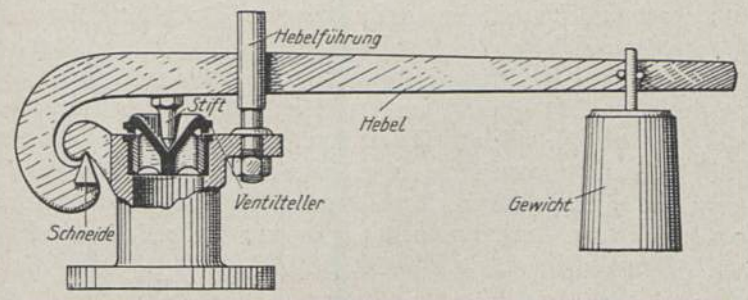
Das Gesetz schreibt die Anordnung eines Sicherheitsventils für jeden Kessel vor. Es muß leicht zugänglich sein und jederzeit gestatten, daß man sich durch Anlüften mit der Hand von seiner leichten Gangbarkeit überzeugt. Ortbewegliche Dampfgefäße, also jeder Lokomotiv-, Lokomobil- und Schiffskessel, müssen sogar zwei Vorrichtungen dieser Art haben, weil es bei ihnen durch die ständigen Erschütterungen leichter vorkommen kann, daß die eine im entscheidenden Augenblick den Dienst versagt. Dem Druck, den der Dampf von unten her gegen den Ventilteller ausübt, wirkt eine Belastung dieses Körpers durch ein Gewicht oder eine Feder entgegen. Die Sicherheitsventile beweglicher Kessel dürfen nur mit Federbelastung gebaut werden, weil Gewichte hier durch die Schwankungen, denen sie ausgesetzt sind, keine Gewähr für gleichmäßige Schließkraft bieten.

Es ist strengstens verboten, die Belastung des Sicherheitsventils zu verändern, denn die Explosionsgefahr wird ja hierdurch näher gerückt. In der Jugendzeit der Dampfmaschine, als die schlecht berechneten Kessel immer gerade nur die für normalen Betrieb nötige Dampfmenge zu liefern vermochten, kam es häufig vor, daß der Heizer die Zuhaltekraft des Sicherheitsventils durch Auflegen von Gewichten vergrößerte, um den Dampfdruck steigern zu können. Die Behörden mußten die Berichte über zahlreiche hierdurch entstandene Explosionen sammeln und allen Wärtern zugänglich machen, bis diese Mode allmählich abkam. In Büchern, die Reiseabenteuer erzählen, findet man nicht selten Schilderungen von Wettfahrten auf See, in deren Verlauf sich der Steuermann oder der Kapitän mit dem ganzen Gewicht ihres Körpers an das Sicherheitsventil hängen, damit der Schiffskessel möglichst hohen Druck für den Betrieb der Maschine liefert. Der Knoten der Handlung wird dann meist in einfachster Weise dadurch gelöst, daß eine Explosion den Schiffskörper zerreißt und alle Insassen umkommen. Der jugendliche Leser nimmt von solchen Begebnissen mit lebhafter Spannung Kenntnis, und er merkt nicht, daß er gleichzeitig eine gute technische Belehrung empfängt, indem er über die verheerende Wirkung zu hoher Dampfspannung unterrichtet wird.

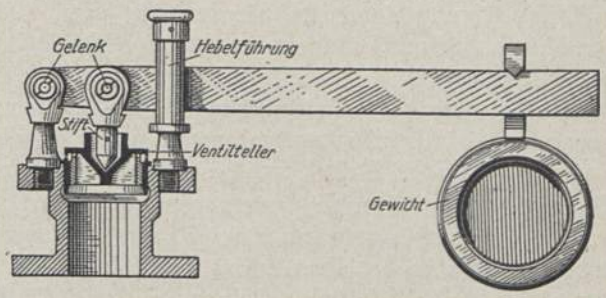


533. Wasserreinigungsanlage für 50 Kubikmeter Stundenleistung
Bauart von L. & C. Steinmüller, Gummersbach (Rheinland)

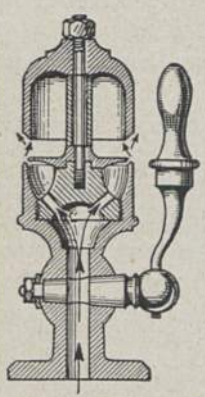
Das Sicherheitsventil hat zuerst Papin an seinem Hochdrucktopf verwendet (Seite 167). Er brachte es dann auch an seinen Dampfmaschinen an, die ja aber nie dem praktischen Betrieb gedient haben. In diesen ist die trefflich wirkende Vorrichtung von Deasaguliers, und zwar zuerst bei Savery-Maschinen, eingeführt worden. Aber noch Newcomen legte nur einfach einen Bleiklotz auf eine Öffnung des Kessels (Bild 300, Seite 171). Die Bilder 534 und 535 zeigen neuzeitliche Bauarten gewichtbelasteter Ventile. Bei dem ersten ist der Stift, der die Hebelkraft auf den Ventilteller überträgt, fest am Hebel angebracht. Dieser kann sich sehr leicht um eine Schneide drehen, die nach Art der Aufhängung von Wagebalken konstruiert ist. Auf Bild 535 schwingt der



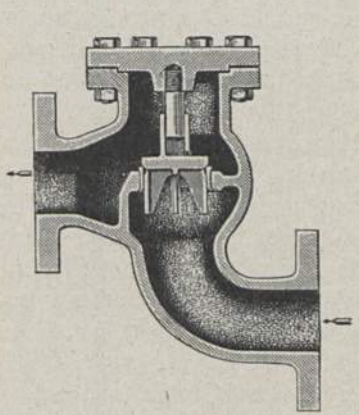

534. Einfaches Sicherheitsventil
Hebel mit Schneide



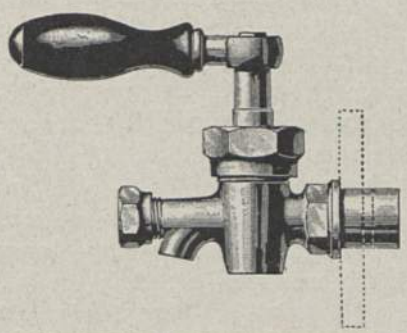

535. Einfaches Sicherheitsventil
Hebel mit Bolzengelenk



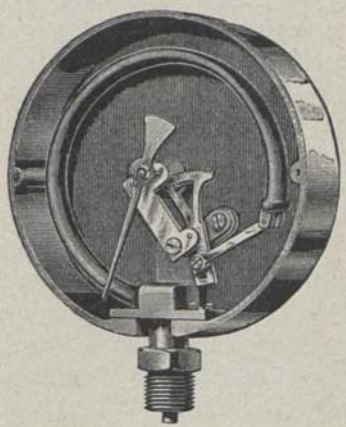
536. Dampfpfeife



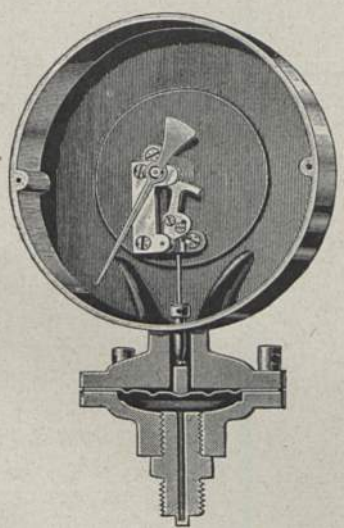
537. Speiseventil



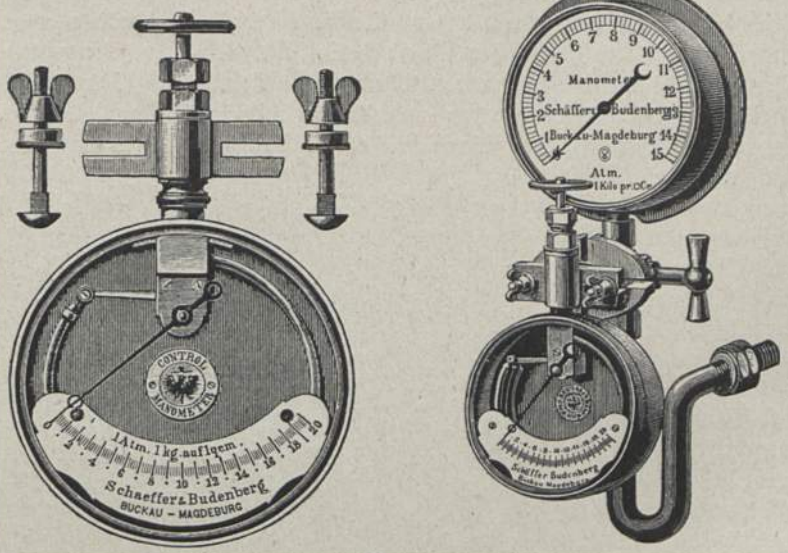
538. Probierhahn



539. Manometer mit gebogener Röhrenfeder



540. Manometer mit gewellter Stahlplattenfeder




541. Doppelkontroll-Manometer mit zwei sich deckenden Zeigern und einer Skala

Hebel um ein gewöhnliches Bolzengelenk. Der Druckstift ist drehbar und kann daher die kleine Abweichung von der Senkrechten, die sein Aufhängungspunkt beim Aufschlagen des Ventils macht, bequem ausgleichen. Denn dieser Aufhängungspunkt geht ja hierbei über eine Kreisbahn.

Ein Doppelventil mit Federbelastung zeigt Bild 531. Die Federn können durch die oben befindlichen Handgriffe nachgespannt werden. Damit dies nicht willkürlich geschieht, werden die Griffe nach jeder amtlichen Revision in der ihnen hierbei gegebenen Stellung durch Bleisiegel festgelegt. Die Federn läßt man meist, wie hier, unmittelbar angreifen, während für die Gewichtbelastung die Übertragung durch Hebel beliebt ist.

Der Querschnitt des Auslaßstutzens, den der Teller des Sicherheitsventils verschließt, darf nicht sehr groß sein, damit der Druck, den der Teller von unten her erfährt,

nicht allzu hoch wird. Die Vorrichtung erhält sonst eine zu klobige Form. Anderseits aber möchte man, daß im Augenblick der Ventilbetätigung recht große Dampfmengen entweichen, wenigstens so viel, daß der übermäßige Druck nicht mehr weiter zu steigen vermag. Beide Forderungen, die einander zunächst widersprechen, werden nun in ebenso einfacher wie geistreicher Weise durch die Hochhubventile erfüllt.

Auch aus einem Ventilstutzen mit geringem lichten Querschnitt kann immerhin recht viel Dampf entweichen, wenn ein sehr weites Abheben des Ventiltellers von seinem Sitz stattfindet. Gerade aber bei kleinen Öffnungen ist die Abhebkraft gering, so daß Ventile gewöhnlicher Bauart nur mit sehr kurzem Hub aufgehen. Es wird nun, um hierin eine Besserung zu schaffen, über den eigentlichen Verschlußkörper noch ein zweiter größerer Teller gesetzt, der am gleichen Schaft befestigt ist (Bild 529). Die ausströmenden Dampfmengen prallen gegen den Teller, wodurch plötzlich der Angriffquerschnitt vergrößert ist und ein weites Aufschlagen eintritt. Bis zum Augenblick der Höchstdrucküberschreitung preßt der Kesseldampf also nur gegen einen kleinen Querschnitt; sobald aber das Abblasen eingeleitet ist, steht ihm eine große Angriffsfläche zur Verfügung. Auf diese Art erzielt man mit verhältnismäßig kleinen Sicherheitsventilen große Wirkungen.

Zur Kesselausrüstung gehört auch die Dampfpfeife (Bild 536), deren Ton die Belegschaft der Fabrik zum Beginn der Arbeit aufruft, die Pausen verkündet und den Feierabend anzeigt. Der Dampf tritt nach dem Öffnen des Zuführungsrohrs durch schräge Kanäle aus, prallt gegen die Schneide der aufgesetzten Glocke und drückt die darin befindliche Luftsäule zusammen. Diese dehnt sich aber sogleich wieder aus, wird von neuem zusammengepreßt und durch diese Schwingungen entsteht das Tönen der Pfeife. Die Stärke des Tons ist abhängig von dem Inhalt der Glocke, die Höhe des Tons wird durch die Länge der Glocke beeinflußt. Ein schriller Ton entsteht bei Benutzung von Pfeifen mit kleinen niedrigen Glocken; solche mit großen und langen Glocken geben einen tiefen Ton. Da die Eisenbahn-Lokomotiven mit der Pfeife wichtige dienstliche Signale abgeben, so ist, damit Täuschungen vermieden werden, die Anwendung der Dampfpfeife auf allen Geländen verboten, die in der Nähe einer Eisenbahnstrecke liegen.

Jeder Kessel ist nach amtlicher Vorschrift mit zwei Apparaten für die Anzeige des Wasserstands zu versehen. Hierfür gibt es zwei verschiedene Vorrichtungen; die eine arbeitet selbsttätig, die andere nur bei Ingangsetzung von Hand. Sie wird durch die Prüfhähne (Bild 538) dargestellt.

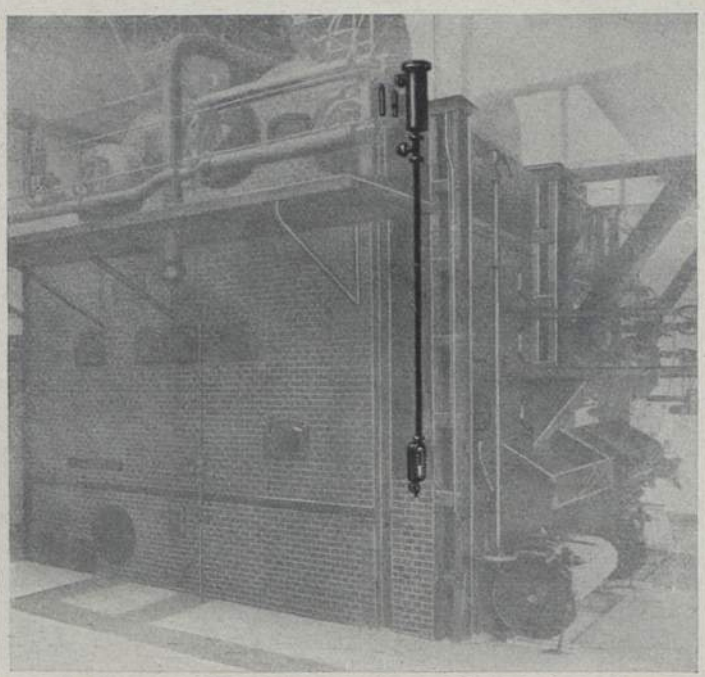
Sie sind bereits bei den Kesseln der Newcomen-Maschinen angewendet worden. Wie Bild 301 auf Seite 171 zeigt, befindet sich der eine Hahn am Ende eines Rohrs, das genau in der Linie des niedrigsten Wasserstandes abschneidet; das andere öffnet sich in den Dampfraum. Dreht der Wärter den ersten Hahn auf, so muß aus diesem Wasser herausdringen, wenn die zulässige Spiegelhöhe nicht unterschritten ist. Der andere läßt Dampf aus, so lange der Kessel nicht zu hoch gespeist ist. Gerade so arbeiten die Hähne noch heute, wo man sie wagerecht an der Stirnwand anbringt. Sie sind einfache, aber gut brauchbare Anzeiger. Oft wird noch ein dritter Prüfhahn zwischengeschaltet, wie zum Beispiel stets bei den Lokomotiven (Band II, Bild 394, 4).

Das Gesetz schreibt aber vor, daß einer der beiden Anzeige-Apparate stets ein Wasserstandglas sein muß.

Diese selbsttätige Vorrichtung läßt ohne weiteres in jedem Augenblick den Wasserstand erkennen. Für ihren Einbau ragen zwei Stutzen unmittelbar aus der Vorderwand des Kessels oder aus einem besonderen Vorkopf (Bild 481, Seite 278) heraus. Dieser wird immer dort angebracht, wo zwischen der vorderen Abschlußwand des Kessels und dem Stirnmauerwerk ein Zugkanal vorübergeht. Das Wasser im Glas würde sonst durch Dampfbildung in dem dünnen, durch den Zug führenden Rohr zum Wallen gebracht werden. Zwischen die Enden der Stutzen wird mit sorgfältiger seitlicher Abdichtung gegen das Metall eine oben und unten offene Glasröhre gesetzt, deren Inneres mit dem Kessel kommuniziert. Das Wasser hat daher im Glas stets denselben Stand wie im Kessel.

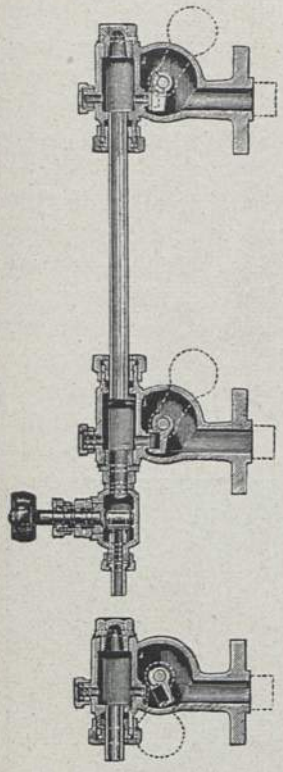
An den beiden Glashaltern sind drei Hähne angebracht. Zwei von ihnen gestatten, die Durchlaßstutzen zu verschließen, der dritte öffnet einen freien Durchgang nach außen unterhalb des Glases. Wird der untere Stutzenhahn geschlossen, der obere sowie der Auslaßhahn geöffnet, dann strömt Dampf durch das Glas, wodurch dieses von Unreinlichkeiten, eingedrungenen Kesselsteinstücken oder Schlamm, befreit wird.

Das Glas kann, wenn es auch durch sorgfältige Kühlung noch so haltbar gemacht ist, leicht springen. Es ist alsdann, wenn große Dampfmengen aus dem oberen und heißes Wasser aus dem unteren Stutzen austreten, für den Heizer recht gefährlich, heranzutreten und die Hähne zu schließen. Es werden deshalb Selbstschutz-Vorrichtungen vorgesehen.

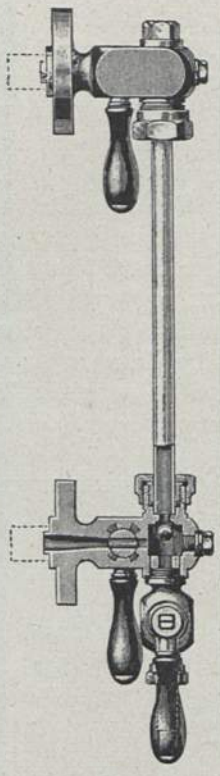


542. Heruntergezogener Wasserstandsanzeiger an einem Steilrohrkessel
Bauart der Hanomag, Hannover-Linden

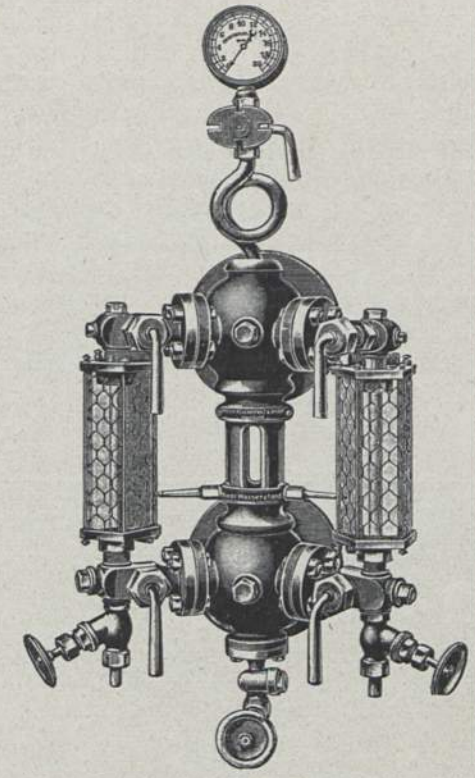
Die Bilder 543 und 544 zeigen zwei Bauarten. Bei der ersten befindet sich an der Spindel sowohl des oberen wie des unteren Holzes eine Platte, in die ein Kissen aus Dichtungsmaterial gesetzt ist. Die Platte verharrt für gewöhnlich in einer mittleren Stellung, weil hinter ihr und vor ihr der gleiche Druck herrscht. Jetzt stört sie den Durchfluß nicht. Springt aber das Glas, so entsteht vorn ein Unterdruck, und die Kesselspannung wirft die Klappe so zu, daß nichts mehr hinausdringen kann. Das gleiche geschieht mit der Kugel,



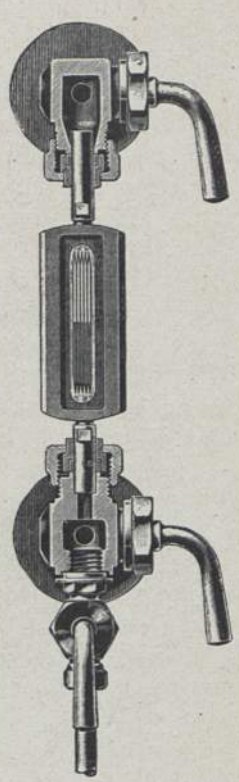
543. Wasserstand-anzeiger mit Klappen-ventil



544. Wasserstand-anzeiger mit Kugel-ventil



545. Doppel-Wasserstandanzeiger mit darüber angeordnetem Manometer
Schäffer & Budenberg, Magdeburg



546. Reflexions-Wasserstandglas nach Klinger

die auf Bild 544 zu sehen ist. Sie kann nur im unteren Stutzen verwendet werden. Für gewöhnlich liegt sie, ein wenig schwebend, unwirksam auf einem Bett; wenn der überlagernde Gegendruck aber verschwindet, wird sie nach oben geschleudert und schließt wieder den Durchlaß ab.

Häufige Temperaturänderungen wirken sehr ungünstig auf die Haltbarkeit des Glases ein. Die Röhren müssen daher gegen Zugluft und strahlende Wärme geschützt werden. Ein bloßliegendes Glas ist auch stets der Zertrümmerung durch eine Ungeschicklichkeit des Heizers ausgesetzt. Es wird daher mit einem Schutzmantel umgeben, der beim Springen gleichzeitig das Umherschleudern von Glassplittern und das Austreten von Dampf und Wasser nach vorn verhindert. Schutzüberzüge in Gestalt von Blechrohren, die nur vorn und hinten einen Schlitz haben, werden heute kaum noch benutzt, da sie den Wasserstand nur aus Einer Richtung erkennen lassen. Meist sind Hüllen aus dickem Glas mit eingeschmolzenem Drahtgeflecht in Gebrauch, die hinten offen stehen, damit sie leicht übergeschoben und, wenn neues Einsetzen einer Röhre erforderlich wird, bequem entfernt werden können. Umgelegte Spiralfedern halten den Mantel oben und unten am Gestell.

Nicht selten findet man zwei Wasserstandgläser an den gleichen Stutzen angebracht (Bild 545). Sie gelten als zwei verschiedene Anzeiger im Sinn des Gesetzes, wenn die Stutzenrohre einen Querschnitt von mindestens 60 Quadratzentimetern haben. Die Stutzenköpfe sind durch ein senkrechtes Metallrohr gegeneinander versteift, damit bei Zusammenziehungen der Kesselwand während des Erkaltens kein Druck auf die Glasröhre kommt.

Um die Wasserstandlinie gut erkennen zu lassen, müssen die gewöhnlichen Röhren geringe Wandstärke haben; ihre Springfestigkeit ist insbesondere deshalb gering. Abschluß mit einer sehr dicken Glasplatte, die nur äußerst selten berstet, wird durch eine von Klinger erfundene Anordnung erreicht (Bild 546). Der wasser- und dampfführende Teil ist hier aus einer geschwärzten Metallmulde und einer vorn gedichtet aufgeschraubten Glasplatte gebildet. Die Hinterwand der Glasplatte ist mit senkrechten Riefeln versehen. Diese brechen und reflektieren das einfallende Licht derart, daß der vom Wasser erfüllte Teil des hinterliegenden Rohrs schwarz erscheint, während der dampfenthaltende Raum silberhell aussieht. Der Wasserstand ist hierdurch aus sehr weiter Entfernung deutlich zu erkennen.

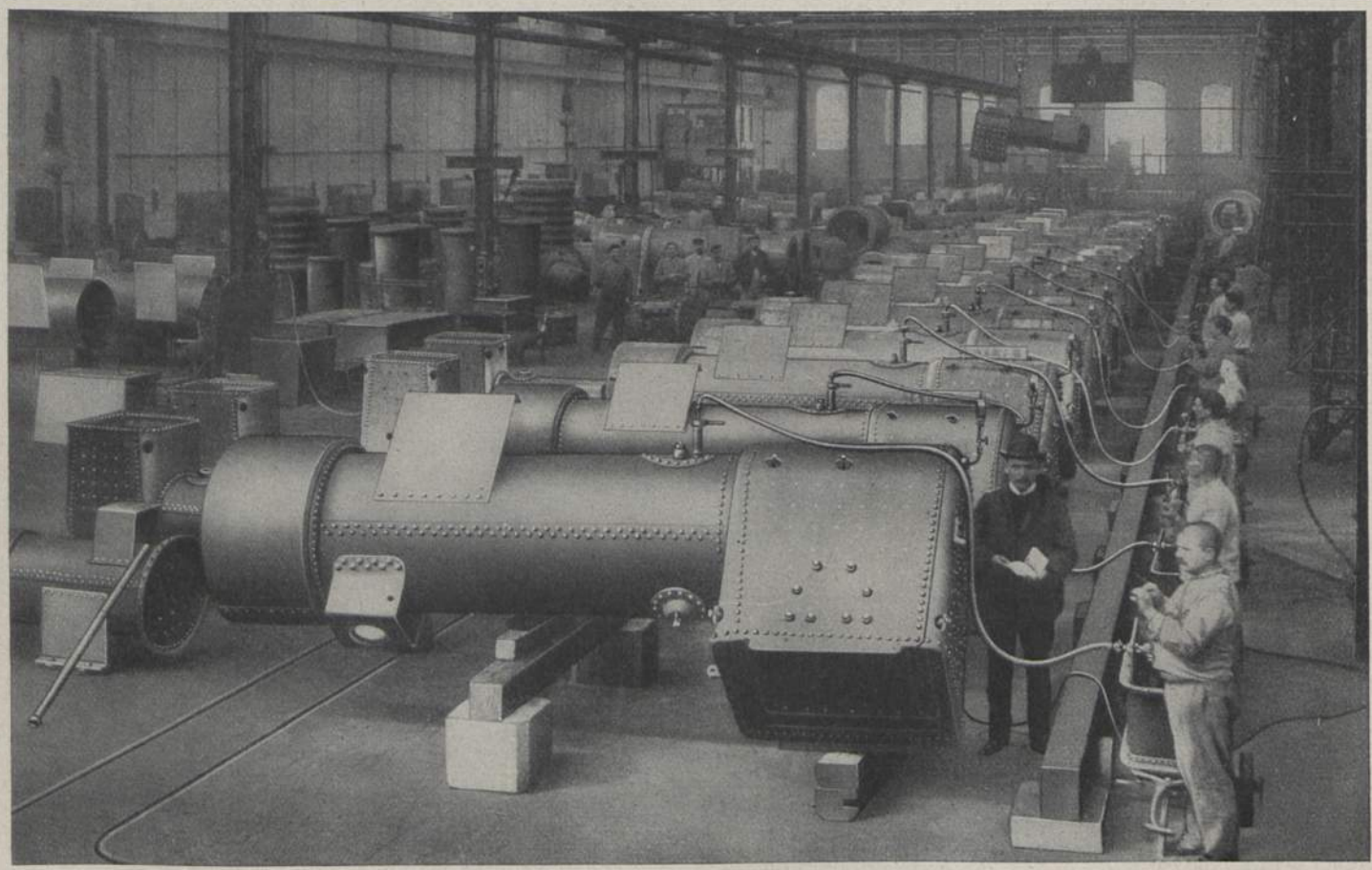
Damit der Heizer, der in Flurhöhe seinen Platz hat, den Wasserstand in einem hochliegenden Oberkessel bequem ablesen kann, ist eine besondere Vorrichtung notwendig, die mittelbar arbeitet. Die Kommunikationslinie im Glas kann nicht mehr benutzt werden, weil der Wärter für ihre Betrachtung stets eine Leiter hinan klettern müßte. Die Hannoversche Maschinenbau-Aktiengesellschaft (Hanomag) bringt nun an dem Wasserstandstutzen vor dem Oberkessel ein weit hinab reichendes Rohr an und setzt drunten einen Messingstab hinein, der mittels einer Kette an einem Schwimmer hängt (Bild 542). Der Schwimmer steigt mit dem Wasserstand auf und nieder und bewegt den Messingstab hinter einem Schauglas im Rohr, das von hinten her durch eine Glühlampe beleuchtet wird. Das Ende des Messingstabs zeichnet sich sehr deutlich gegen das durchfallende Licht ab und bildet die Merklinie.

Mittels des Schwimmers läßt sich auch leicht eine elektrische Vorrichtung betätigen, die bei einem bestimmten niedrigen Wasserstand die elektromotorisch angetriebene Speisepumpe einschaltet und nach ausreichender Füllung des Kessels wieder stillsetzt. Eine solche selbsttätige Speisevorrichtung kann so eingerichtet sein, daß der Wasserstand im Kessel stets nur um einige Millimeter schwankt. Gewöhnlich wird, wenn die Speisepumpe außerhalb des Kessel-

raums liegt, eine Signallampe in diesem eingeschaltet, so lange die Speisevorrichtung arbeitet.

Es kann dafür gesorgt werden, daß eine Warnglocke ertönt, falls der Wasserinhalt des Kessels doch durch ein Versagen der Anlage zu gering wird, falls Überspeisung erfolgt, und wenn der Betriebsstrom für die Pumpe ausbleibt. Die Einrichtung wirkt besonders günstig bei Wasserrohrkesseln, deren Belastung häufig und rasch wechselt. Der Heizer wird jedoch durch keinen selbsttätig arbeitenden Apparat von seiner Verantwortung für die Aufrechterhaltung des richtigen Wasserstands befreit.

Zur Beobachtung des Kesseldrucks dient das Manometer. Seine Anbringung ist gleichfalls gesetzlich vorgeschrieben. Das Zifferblatt ist in Atmosphären zu unterteilen und hat an



547. Prüfung der Lokomobilkessel mittels Druckwasser
Heinrich Lanz, Mannheim

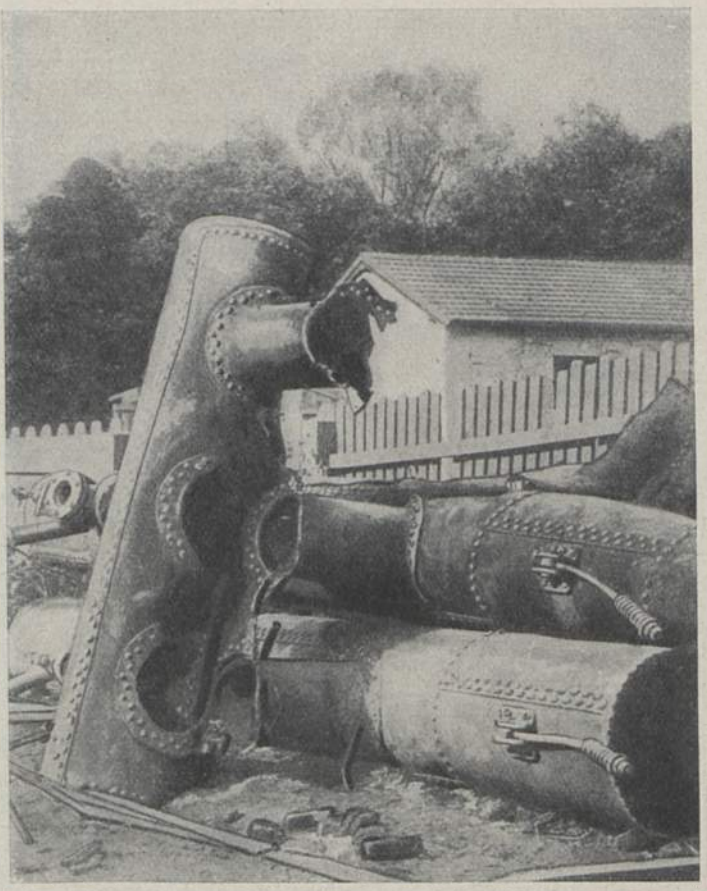
der Stelle der Skala, die dem höchsten zulässigen Dampfdruck entspricht, eine unveränderliche, deutlich erkennbare Marke zu tragen. Meist wird zu diesem Zweck ein roter Strich angebracht. Es sei wiederholt, daß die Manometer in Deutschland den Überdruck anzeigen; ihre Zeiger stehen also bei kaltem Kessel auf Null, obgleich noch eine Atmosphäre Druck gegenüber dem Vakuum vorhanden ist.

Der einfachste schon von Watt verwendete Kesseldruckmesser ist die U-förmig gebogene, zu einem Teil mit Quecksilber gefüllte Barometerröhre. Der eine Schenkel wird mit dem Kessel verbunden, der andere ist offen. Mit wachsendem Druck senkt sich das Quecksilber auf der einen Seite und steigt drüben entsprechend an. Manometer dieser Art, die auch heute noch für bestimmte Zwecke angewendet werden, haben zwar die einfachste Bauart und zeigen äußerst genau, sie sind aber für hohe Drücke nicht zu gebrauchen, da alsdann die druckanzeigende Röhre zu lang wird, wenn das Quecksilber nicht ausgeschleudert werden soll. Im praktischen Betrieb benutzt man daher ausschließlich die zu hoher Präzision entwickelten Druckplatten- und Federrohr-Manometer.

Bei den Apparaten der ersten Art ist über das Zuführungsrohr zwischen Flanschen eine runde, zur Vergrößerung der Widerstandskraft mit kreisförmigen Wellungen versehene Platte geschraubt (Bild 540). Sie wird mit steigendem Druck immer mehr nach oben gewölbt. Eine Hebelanordnung überträgt diese Bewegung auf einen Zahnbogen, der mit einem eingreifenden Zahnrad den Zeiger auf dem Zifferblatt dreht. Die Übertragungsvorrichtung ist so eingerichtet, daß sie die kleinen Durchbiegungen der Druckplatte vergrößert. Eine kleine Spiralfeder an der Achse des Zeigers sorgt dafür, daß dieser stets stramm mit dem Antrieb verbunden ist, so daß keine Mißweisung durch toten Gang entstehen kann.

Beim Röhrenfeder-Manometer (Bild 539) nach Bourdon ist der wirkende Teil ein kreisförmig gebogenes, aus Kupfer, Kupferlegierung, Neusilber oder Silber gefertigtes Röhrchen von elliptischem Querschnitt. Es wird mit dem einen offenen Ende an den Druckstutzen angelötet. Auf der anderen Seite ist es geschlossen und mit dem Übertragungshebelwerk verbunden. Wenn Druck im Innern des Röhrchens auftritt, so hat es das Bestreben, die kurze Achse der Querschnittellipse zu recken, wodurch das Röhrchen ein wenig aufgebogen wird. Das Ende schiebt sich nach außen und dreht hierbei wiederum einen Zahnbogen. Der Zeiger schlägt aus.

Die Manometer müssen vor strahlender Wärme so weit wie möglich geschützt sein, und es ist auch dafür zu sorgen, daß der Dampf nicht unmittelbar an sie herantreten kann, weil sonst durch die Einwirkung der Hitze auf das Hebelwerk Fehlanzeigen entstehen können. Darum wird zwischen das vom Kessel herkommende Rohr und das Instrument ein Wassersack geschaltet. Dieser ist entweder ein einfaches Knie oder eine zu vollem Kreis gebogene Röhre. Es bleibt in dem nach unten gezogenen Teil immer etwas Kondenswasser zurück, das, wenn der Kessel Druck hat, gegen die Platte oder in die Röhrenfeder gepreßt wird, diese empfindlichen Teile also vor der unmittelbaren Berührung mit dem Dampf behütet.



548. Folgen der Explosion eines Walzenrohr-Batteriekessels

Es ist vorgeschrieben, daß sich an jedem Kessel ein Kontrollflansch zum Ansetzen einer amtlichen Prüfungseinrichtung befindet. Seine Form ist in den Vorschriften genau festgelegt. Der Beamte, der den Kessel untersucht, befestigt an diesem mittels Bolzen und Flügelmutter ein sorgfältig geeichtes Doppelinstrument (Bild 541). Es werden hierfür stets Bourdon-Apparate verwendet, deren Röhrenfedern aus Silber gefertigt sind.

Um zu verhüten, daß durch Mißweisung eines Instruments Irrtümer entstehen, treten immer gleichzeitig zwei in Tätigkeit. Sie sind nicht selten in Einem Gehäuse vereinigt, das alsdann zwei Bourdon-Federn und zwei Zeiger besitzt. Wenn der Kessel kalt durch Einpressen von Druckwasser untersucht wird (Bild 547), kann der Wassersack fortgelassen werden. Zur unmittelbaren Anbringung der Meßvorrichtung an dem Flansch werden alsdann die senkrechten Schlitze in diesem benutzt. Ein Dreiwegehahn, der in das vom Kessel herkommende Rohr geschaltet ist, gestattet, die Leitung abzuschließen, einen Ausfluß entweder zu dem kesseleigenen Manometer oder zu dem Kontrollflansch zu öffnen.

549. Folgen der Explosion eines Heizrohrkessels

*

Die Arbeitsweise jedes Kessels, er möge noch so gut gebaut sein, wird durchgreifend von dem Wärter beeinflußt. Er ist leicht in der Lage, die Vorzüge der schönsten Konstruktion zunichte zu machen, er kann aber auch eine alte unvollkommene Anlage so gut versorgen, daß sie frisch und neu erscheint. Der Wirkungsgrad des Kessels ist in sehr hohem Maß abhängig von der Tätigkeit des Wärters, der Herrschgewalt über ihn ausübt.

Der gute pflichttreue Heizer wird sich bemühen, mit jedem Kilogramm Kohle, das er verfeuert, möglichst viel Dampf zu erzeugen. Ein schlechter Wärter pflegt mehr Wert darauf zu legen, daß ihm der Kessel möglichst wenig Arbeit macht. Da es nun auch in diesem Berufskreis nicht ausschließlich treue Leute gibt, so darf die Gewalt des Kesselherrschers nicht absolut sein, sondern muß durch eine Verfassung in nutzreiche Bahnen gezwungen werden.

Die erste Abteilung dieser Verfassungs-Urkunde bilden die grundlegenden Bedienungsvorschriften, die von Scholl in die folgenden zehn Gebote gefaßt werden:

1. Während des Betriebs verbraucht der Dampfkessel drei verschiedene Stoffe: Brennstoff, atmosphärische Luft, Speisewasser. Die Aufgabe des Wärters ist es vor allem, dem Kessel diese Stoffe rechtzeitig und in richtigen Mengen zuzuführen oder die selbsttätig stattfindende Zuführung zu regeln.

2. Das Kesselhaus und alles, was darin ist, muß reinlich und in Ordnung gehalten werden. Der Besuch des Kesselhauses und der Aufenthalt darin ist den dort nicht beschäftigten Arbeitern sowie sonstigen

Personen zu verwehren. Auch darf das Kesselhaus nicht als Durchgang dienen.

3. Der Kesselwärter darf, solange Feuer auf dem Rost brennt, seinen Posten nicht verlassen.

4. Das Anheizen darf erst geschehen nach erfolgter gewissenhafter Untersuchung, ob der Kessel genügend mit Wasser versehen ist.

5. Sämtliche Apparate und Zubehörstücke sind in gutem und dienstfähigem Zustand zu erhalten und häufig nachzusehen.

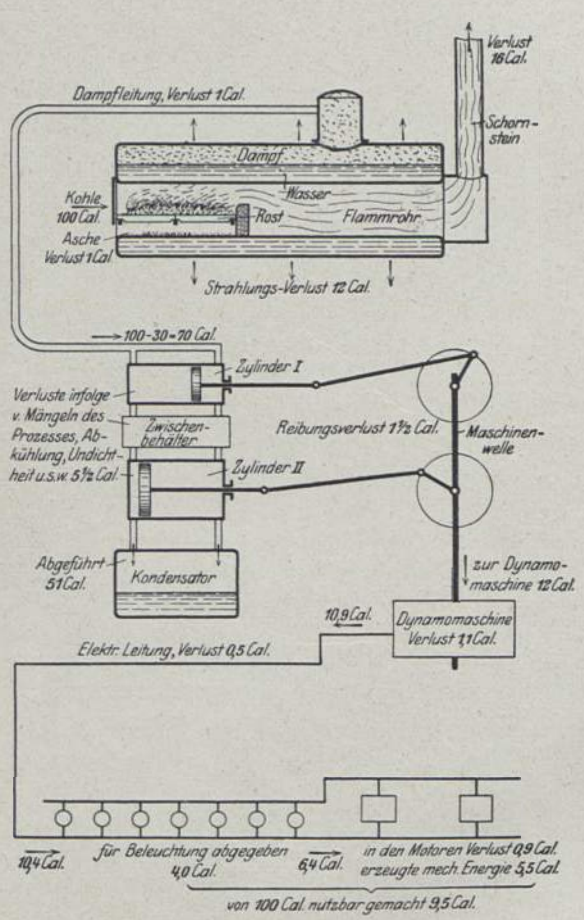
6. Die Wasserstandapparate sind täglich, namentlich vor dem Anheizen, zu prüfen und durchzublasen. Jede Verstopfung ist sofort zu beseitigen. Ein richtig arbeitender Wasserstand muß im Betrieb das Schwanken des Wassers im Glas um einige Zentimeter erkennen lassen.

7. Die Manometer sind täglich zu beobachten, ob sie beim Abschließen rasch auf den Nullpunkt sinken und beim Wiederöffnen sofort auf den früheren Stand zurückgehen. Beim Anheizen hat man sich zu überzeugen, daß der Manometerhahn in der Betriebsstellung steht. Der Betrieb ist so zu regeln, daß der angegebene Druck nicht überschritten wird.

8. Die Speisevorrichtungen sind täglich abwechselnd zu benutzen, damit man ihres brauchbaren Zustands sicher ist; jede Unordnung an ihnen ist sofort abzustellen. Ist eine der beiden Speisevorrichtungen für den regelmäßigen Betrieb besonders geeignet, so ist die Hilfs-Speisevorrichtung wenigstens einmal täglich in Probebetrieb zu nehmen.

9. Die Sicherheitsventile müssen täglich einmal durch vorsichtiges, ganz langsames Lüften geprüft werden. Jede Änderung der vorschriftsmäßigen Belastung ist streng verboten und unterliegt gerichtlicher Bestrafung. Beginnen die Sicherheitsventile abzublasen, so ist am Manometer zu beobachten, ob dieses die angemerkte Dampfspannung genau anzeigt.

10. Ventile und Hähne sind stets langsam zu öffnen und zu schließen. Sie müssen stets in gut gangbarem Zustand erhalten werden.




550. Ausnutzung der Wärme in einer Dampfanlage zur Erzeugung von Elektrizität
Aus v. Hanffstengel, Technisches Denken und Schaffen
Verlag Julius Springer, Berlin

Die Verfassungs-Urkunde spricht dann weiter von der Art, wie der Brennstoff aufgegeben werden muß, vom Abschlacken, den Maßnahmen bei der täglichen Inbetrieb- und Stillsetzung des Kessels, von der Reinigung der Rohre und Züge, vom Verhalten bei Gefahr.

Dann aber kommt eine dritte Abteilung, die besonders scharf gefaßt ist. Hierin ist die Rede von der Überwachung des Überwachenden.

Es wird die erstaunlich große Zahl der Einrichtungen aufgeführt, die zur Kontrolle des Heizers dienen, die ihn mit Polizeiaugen beobachten. Und diese Wachorgane des Kesselstaats merken sich die Vorgänge nicht nur für den Augenblick, sie haben alle ein Notizbuch in der Hand, in das sie die Feststellungen eintragen und so für die Dauer dokumentarisch festlegen. Durch ihre Tätigkeit wird der Herrscher, gerade wie heute jeder echte König, dazu gezwungen, der erste Diener seines Staats zu sein, wenn er sich nicht der Gefahr aussetzen will, kurzerhand die Stufen seines Throns hinuntergeführt zu werden.

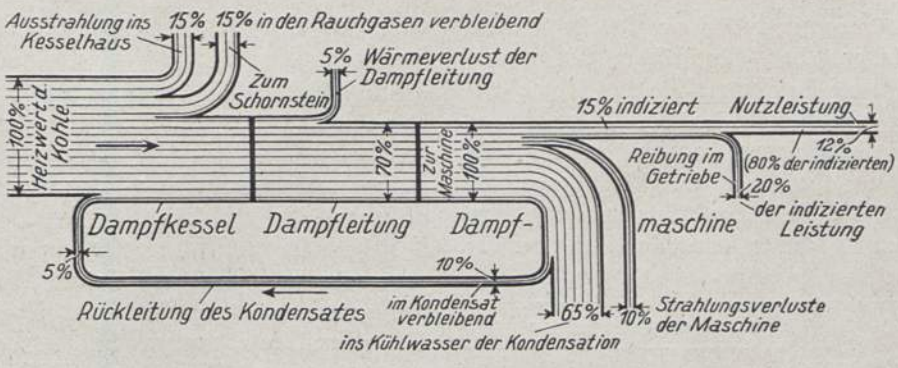
Unbildlich gesprochen: jeder Kesselbesitzer ist heute in der Lage, den Heizer zu sorgfältiger, sparsamer Bedienung zu zwingen. Das ist angesichts der hohen Brennstoffpreise auch eine unumgängliche Notwendigkeit, wenn die Ausgaben für die Dampferzeugung nicht die Wirtschaftlichkeit des Gesamtbetriebs in Frage stellen sollen. So sind denn in großen Kesselhäusern zahlreiche Registrier-Apparate aufgestellt, die von jeder Handlung des Heizers Kunde geben, durch das Niederschreiben von Kurven jeden Fehler untilgbar aufzeichnen.

Die Vorrichtungen wollen aber nicht Feinde des Mannes vor dem Kessel sein, sie werben vielmehr um seine Freundschaft, indem sie ihn ununterbrochen darüber belehren, was er zu tun hat, um ein guter Wärter zu sein. Während er sonst durch die Feststellung, daß zu viel Kohle verbraucht worden ist, nur erfahren würde, daß er Fehler gemacht hat, kann er aus den aufgezeichneten Kurven leicht und sehr genau ersehen, welche seiner Maßnahmen falsch gewesen sind, wo er also seine Arbeitsweise zu ändern hat.

Es genügt darum nicht, wenn nur die Menge der Kohle und des Wassers gemessen werden, die in den Kessel gelangen. Das ist leicht möglich durch die Aufstellung eines Speisewassermessers, das Abwiegen jedes Kohlewagens, der in das Kesselhaus gefahren oder jeder Menge, die aus dem Hochbunker durch die Rinnen in die Fülltrichter rutscht. Hierfür ist heute stets über jeder Rinne eine selbsttätige Wägevorrichtung angebracht, die das Gewicht der durchgehenden Kohle immer wieder auf einer Karte aufzeichnet (Tafel XIX, 1). Durch diese Maßnahmen kann nur festgestellt werden, wieviel Kohle gebraucht worden ist, um eine bestimmte Wassermenge zu verdampfen. Es fehlt aber bei zu hohem Kohleverbrauch die örtliche Eingrenzung des Fehlers.

Diese wird möglich, indem registrierende Manometer auf einem Blatt mit Zeitangabe, das durch ein Uhrwerk ständig fortbewegt wird, den Druck verzeichnen, der in jedem Augenblick im Kessel geherrscht hat, durch Zugmesser, die fortlaufend die Geschwindigkeit der Rauchgase aufschreiben, durch Thermometer, welche die Temperatur im Fuchs, durch Pyrometer, welche die Wärmegrade im Verbrennungsraum, die Temperaturen des nassen und des überhitzten Dampfs angehen, insbesondere aber durch Heizeffektmesser, denen es obliegt, den Kohlensäuregehalt der abziehenden Gase in jedem Augenblick festzustellen.

Dieser ist ja, wie wir auf Seite 296 gehört haben, ausschlaggebend für die Vollkommenheit der Verbrennung. Befindet sich wenig Kohlensäure in den Abgasen, aber viel Kohlenoxyd, dann ist der Brennstoff schlecht ausgenutzt. Die Messung des Kohlensäuregehalts ist heute auf viele verschiedene Arten möglich. Vor wenigen Jahren noch dauerte es längere Zeit, bis die Feststellung vorlag, so daß der Heizer stets erst verspätet erfuhr, daß er schlecht gearbeitet hatte. Heute wird der $CO_2$-Gehalt der Abgase sofort und laufend am Heizerstand durch ein Zeigerinstrument angegeben.




551. Wärmestromdiagramm einer Kolbendampfmaschine

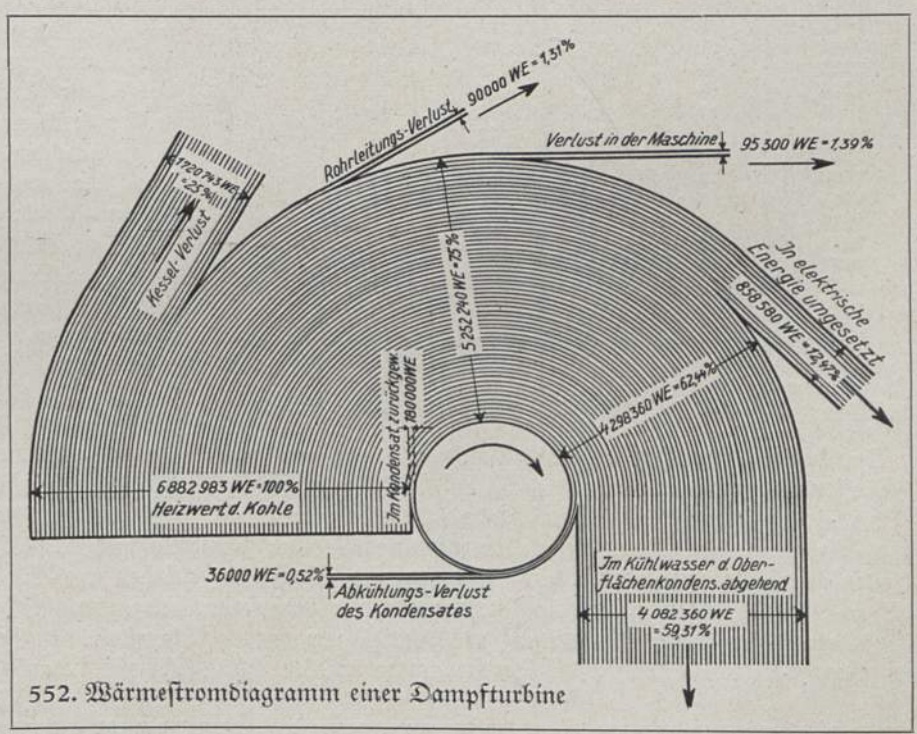
Sämtliche Anzeigen und Aufschreibungen der erwähnten Instrumente können unter Benutzung elektrischer Übertragung an jeder beliebigen Stelle des Kesselhauses stattfinden und nicht nur hier, sondern gleichzeitig auch im Büro des Oberingenieurs, der sich also jeden Augenblick von seinem Sitz am Schreibtisch aus davon zu überzeugen vermag, ob die ihm unterstellte Kesselanlage gut gewartet wird (Bild 532).

Trotz aller Sorgfalt, die dem Kesselwärter anerzogen wird, trotz allen Fleißes und aller Aufmerksamkeit, die der Herstellung der Dampferzeugungsgefäße in den Fabriken zugewendet wird, kommt es doch immer wieder einmal vor, daß eine Stelle der eisernen Wandung schadhaft wird und der Inhalt des Kessels sich nach außen entladet. Die Ausströmung durch einen Riß oder durch ein Loch ist nicht immer eine Explosion. Denn nach der üblichen Begriffsbestimmung liegt eine solche nur dann vor, „wenn die Wandung eines Dampfkessels eine Trennung in solchem Umfang erleidet, daß durch Ausströmen von Wasser und Dampf ein plötzlicher Ausgleich der Spannungen innerhalb und außerhalb des Kessels stattfindet". Geht der Druckausgleich nicht in einem kurzen Augenblick vor sich, währt er eine längere Zeitspanne, dann kann man nur noch von einem Kesselschaden sprechen, dessen Wirkungen viel weniger schreckensvoll sind als die Begleiterscheinungen einer Explosion.

Wenn ein Wasserrohr berstet, so kann der Kessel sich wegen der engen und gebrochenen Wege, die der Inhalt der anderen Rohre zu der Öffnung zurückzulegen hat, nur verhältnismäßig langsam entleeren. Es findet auch nicht sogleich eine Druckentlastung der gesamten Wasseroberfläche statt. Das ist aber besonders gefährlich, denn es geht bei der Abhängigkeit des Siedepunkts vom Druck (Seite 279) alsdann sogleich eine mächtige Dampfentwicklung vor sich, wodurch die Bruchstelle meist noch weiter aufgerissen, Kesselteile mit so großer Wucht fortgeschleudert werden, daß sie das Mauerwerk durchbrechen und ringsum schwere Zerstörungen anrichten.

Die unheilvollen Wirkungen, welche die Explosion eines Großraumkessels meist hat, sind hauptsächlich auf die rasche Bildung neuer Dampfmengen durch Druckentlastung zurückzuführen. Sehr hohe Drücke werden deshalb, wie bereits erwähnt, nur in Wasserrohrkesseln erzeugt. Die häufigsten Ursachen von Kesselexplosionen sind Wassermangel und ungenügende Verbindung von Kesselteilen. Die folgende Liste stellt die acht Dampfkessel-Explosionen, die im Jahre 1924 stattgefunden haben, nach ihren Ursachen zusammen, so wie sie in der Statistik des Deutschen Reichs angegeben sind:

| Vermutliche Ursachen der Explosionen und Bauarten der Kessel | Verunglückte Personen: getötet | schwer verwundet | leicht verwundet |
|---|---|---|---|
| I. Wassermangel | | | |
| Stehender Feuerbuchskessel | — | — | — |
| Liegender Feuerbuchskessel | 1 | — | — |
| Liegender Feuerbuchskessel | — | — | — |
| Zweiflammrohrkessel | — | — | — |
| Zweiflammrohrkessel | — | — | — |
| II. Mangelhafte Schweißung | | | |
| Schiffskessel | 1 | 2 | 2 |
| III. Rißbildung | | | |
| Lokomotivkessel | — | 1 | 2 |
| Zweiflammrohrkessel | 1 | — | — |
| Zusammen | 3 | 3 | 4 |




552. Wärmestromdiagramm einer Dampfturbine

Seit dem Jahre 1877 werden die Dampfkesselexplosionen in den Zusammenstellungen des Statistischen Reichsamts jährlich veröffentlicht. In die Aufstellung ist jedes Schadhaftwerden eines Dampferzeugers während des Betriebs einbezogen. Aus den Zahlen geht hervor, daß die Zuverlässigkeit der Kessel in den letzten Jahrzehnten sehr stark gewachsen ist. Denn obgleich sich die Zahl der Anlagen ungeheuer vermehrt hat, ereignen sich heute durchschnittlich weniger Explosionen als früher:

| Es betrug im Jahre | die Zahl der Explosionen | die Zahl der verunglückten Personen | Verunglückte Personen | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | getötet | schwer verwundet | leicht verwundet |
| 1877 | 20 | 58 | 21 | 14 | 23 |
| 1878 | 18 | 20 | 7 | 4 | 9 |
| 1879 | 18 | 78 | 36 | 10 | 32 |
| 1880 | 20 | 29 | 10 | 5 | 14 |
| 1881 | 11 | 47 | 8 | 18 | 21 |
| 1882 | 11 | 48 | 19 | 14 | 15 |
| 1883 | 14 | 55 | 23 | 8 | 24 |
| 1884 | 14 | 45 | 12 | 11 | 22 |
| 1885 | 13 | 22 | 11 | 2 | 9 |
| 1886 | 16 | 23 | 10 | 5 | 8 |
| 1887 | 14 | 83 | 17 | 5 | 61 |
| 1888 | 15 | 11 | 4 | 3 | 4 |
| 1889 | 16 | 28 | 6 | 5 | 17 |
| 1890 | 16 | 21 | 9 | 1 | 11 |
| 1891 | 10 | 10 | — | 3 | 7 |
| 1892 | 18 | 41 | 12 | 11 | 18 |
| 1893 | 10 | 21 | 6 | 5 | 10 |
| 1894 | 35 | 34 | 12 | 9 | 13 |
| 1895 | 23 | 74 | 20 | 23 | 31 |
| 1896 | 21 | 25 | 10 | 2 | 13 |
| 1897 | 21 | 39 | 17 | 3 | 19 |
| 1898 | 18 | 31 | 3 | 7 | 21 |
| 1899 | 14 | 35 | 13 | 11 | 11 |
| 1900 | 13 | 24 | 6 | 1 | 17 |
| 1901 | 17 | 27 | 10 | 3 | 14 |
| 1902 | 17 | 24 | 7 | 7 | 10 |
| 1903 | 10 | 11 | 6 | — | 5 |
| 1904 | 15 | 18 | 5 | 5 | 8 |
| 1905 | 9 | 9 | 4 | 2 | 3 |
| 1906 | 15 | 8 | 5 | — | 3 |
| 1907 | 16 | 16 | 7 | 4 | 5 |
| 1908 | 11 | 13 | 3 | 2 | 8 |
| 1909 | 9 | 36 | 5 | 8 | 23 |
| 1910 | 8 | 7 | 3 | 2 | 2 |
| 1911 | 8 | 30 | 15 | 5 | 10 |
| 1912 | 11 | 33 | 10 | 13 | 10 |
| 1913 | 9 | 26 | 8 | 6 | 12 |
| 1914 | 8 | 11 | 2 | 2 | 7 |
| 1915 | 10 | 22 | 3 | 13 | 6 |
| 1916 | 9 | 21 | 12 | 3 | 6 |
| 1917 | 11 | 20 | 6 | 3 | 11 |
| 1918 | 10 | 24 | 12 | 3 | 9 |
| 1919 | 7 | 12 | 3 | 5 | 4 |
| 1920 | 8 | 66 | 28 | 8 | 30 |
| 1921 | 12 | 38 | 16 | 8 | 14 |
| 1922 | 11 | 37 | 8 | 8 | 21 |
| 1923 | 7 | 3 | 1 | 0 | 2 |
| 1924 | 8 | 10 | 3 | 3 | 4 |
| Zusammen in den letzten 48 Jahren . | 655 | 1424 | 474 | 293 | 657 |

Auf den Bildern 548 und 549 sind die Folgen von zwei Explosionen dargestellt.

In Deutschland ist die Sicherheit des Kesselbetriebs durch das Arbeiten der Dampfkessel-Überwachungs-Vereine bedeutend gefördert worden. Sie sind private Verbände, die in staatlichem Auftrag die laufenden Untersuchungen ausführen. Durch die Verarbeitung des hierbei gewonnenen Erfahrungsmaterials können die Vereine immer wieder Hinweise für eine Besserung der Herstellungs- und Wartungsmethoden geben.

Das Gesetz schreibt vor, daß eine regelmäßige äußere Untersuchung bei ortfesten Dampfkesseln alle 2 Jahre, bei beweglichen einschließlich der Schiffsdampfkessel alle Jahre stattzufinden hat. Die innere Untersuchung ist bei ortfesten Kesseln alle 4 Jahre, bei beweglichen alle 3 Jahre, bei Schiffsdampfkesseln jedoch schon alle 2 Jahre vorzunehmen. Nach 8 Jahren hat an ortfesten, nach 6 Jahren an beweglichen Dampfkesseln immer wieder eine Wasserdruckprobe stattzufinden. Hierbei werden die Kesselwandungen weit über den zulässigen Höchstdruck belastet. Das ist ungefährlich, weil Wasser ja praktisch unzusammendrückbar ist, beim Bersten eines Kesselteils also ohne Explosionswirkung ausrinnt.

Zum Schluß unserer Erörterungen über Dampfmaschinenanlagen können wir nun eine Gesamtbilanz aufmachen. Sie gibt Aufschluß darüber, wie viel von der Energie, die sich aus dem Heizstoff durch Verbrennung entbindet, als tatsächliche Nutzleistung gewonnen wird. Wir werden die betrübende, eingangs bereits erwähnte Tatsache nun durch Zahlen belegt finden, daß der wirtschaftliche Wirkungsgrad im Durchschnitt nur 12 v. H. beträgt. Er setzt sich zusammen aus dem thermischen Wirkungsgrad, der alle Wärmeverluste umschließt, und dem mechanischen Wirkungsgrad, der angibt, wieviel Energie im Getrieb der Maschine aufgezehrt wird. Die Bilanzaufstellung ist besonders übersichtlich, wenn man die Einzelverluste in einem Bild aneinander reiht. Eine sehr hübsche graphische Darstellung befindet sich in dem Buch von v. Hanffstengel, „Technisches Denken und Schaffen", sie sei hier wiedergegeben (Bild 550). Es ist als Beispiel eine Verbundmaschine herangezogen, von der eine Dynamomaschine angetrieben wird. Die Verluste in dem Stromerzeuger, in den Leitungen und den angeschlossenen Motoren sind gleichfalls verzeichnet. Bei deren Einbeziehung beträgt der Nutzeffekt weniger als 10 v. H.

Der Techniker bedient sich zur Aufzeichnung des wirtschaftlichen Wirkungsgrads einer Dampfmaschine gern des Wärmestrom-Diagramms, das nach dem Mann, der diese graphische Aufstellung zuerst angewendet hat, auch Sankey-Diagramm genannt wird. Die beiden folgenden Zeichnungen, welche die Verluste nur bis zur Hauptwelle der Maschine messen, erklären sich wohl selbst. In allen drei Aufstellungen ist zu beachten, wie außerordentlich groß die Wärmemengen sind, die vom Kühlwasser aus dem Kondensator mitgenommen werden.

Die Verschwendungssucht ist ein unheilbarer Charakterfehler der Dampfmaschine. Es mußte darüber hinweggesehen werden, so lange sie der einzige völlig freizügige Groß-Kraftspender war. Das ist sie seit einem halben Jahrhundert nicht mehr. Ein neues Geschlecht der Krafterzeuger wuchs heran, das gleichfalls allerorten zur Arbeitsleistung bereit ist, aber mit dem ihm anvertrauten kostbaren Gut, dem Brennstoff, weit besser umzugehen versteht. Es beginnt der Dampfmaschine den Raum und Rang streitig zu machen und wird vielleicht, ja sogar wahrscheinlich, in weiteren fünf Jahrzehnten die Alleinherrschaft an sich gerissen haben. Noch stehen die Maschinen der älteren Gattung in weit überwiegender Zahl auf ihrem Posten. Aber die Ablösung hat bereits das Gewehr geschultert und zieht mit klirrendem Schritt heran.

# 30. Gas- und Ölmaschine

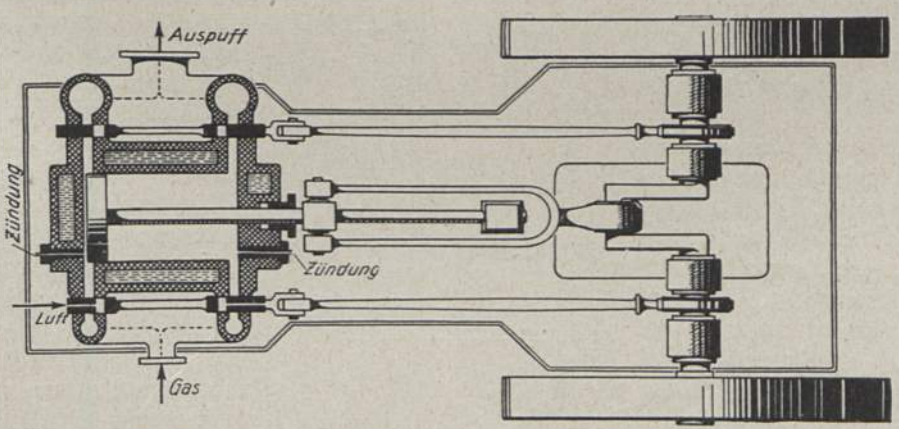
Aus den Wärmestrom-Diagrammen auf den letzten Bildern des vorigen Abschnitts geht mit größter Deutlichkeit hervor, daß die Möglichkeit gegeben ist, einen Kraftwandler zu finden, der mit den zugeführten Wärmemengen besser, haushälterischer umzugehen weiß, als es die Dampfmaschine tut. Die ungeheuren Verluste, die hier zutage treten, legen der Technik sogar die Pflicht auf, nach Vollkommnerem zu streben. Wenn fast $^9/_{10}$ der im Brennstoff enthaltenen Energie sich in das Nichts verflüchtigen, nur ein bescheidenster Bruchteil als praktisch verwertbar an die Kurbelwelle der Maschine gelangt, dann fühlt der Ingenieur, dem wirtschaftliches Denken heilige Bindung ist, den unhemmbaren Drang, Besseres zu schaffen. Die Natur macht es ihm nicht leicht, auf diesem Weg voranzukommen. Gerade über ihren Urbesitz, ihr herrlichstes Gut, die Kraft, wacht sie eifersüchtig und möchte nicht gern gestatten, daß wir sie mit Hebeln und mit Schrauben nach unserem Willen lenken.

Mit der Dampfmaschine gelang es der Menschheit zum erstenmal, den Kraftbesitz der Natur mächtig zu bezwingen. Doppelt hoch türmte sie nach dieser Niederlage die Schutzwehr, um nicht ein zweites Mal und gründlicher überwunden zu werden. Und es gelang dennoch! Der neue Sieg darf freudig begrüßt werden, aber er ist doch auch noch nicht überwältigend großartig. In den Kraftmaschinen der neueren Gattung gehen zwar nicht mehr $^9/_{10}$, aber immer noch $^2/_3$ der ursprünglich aufgewendeten Wärme-Energie verloren. Die Höchstleistung der thermischen Ausbeute beträgt heute 35 v. H., das ist viel im Vergleich zum Gesamtwirkungsgrad einer Newcomen-Maschine, wenig genug in absoluter Betrachtung.

Einen breiteren, stolzeren Weg, der die Kraftmaschinentechnik noch weiter emporführen könnte, sehen wir augenblicklich nicht. Wie außerordentlich schwer schon der jetzt glücklich betretene, immer noch recht schmale Pfad zur Urquelle der Natur herzurichten war, werden die folgenden Ausführungen zeigen. Bei der engen Verwandtschaft der neueren Kraftmaschinengattung mit der alten ist es für das Verständnis der folgenden Darlegungen notwendig, daß der Leser die beiden Abschnitte dieses Werks kennt.

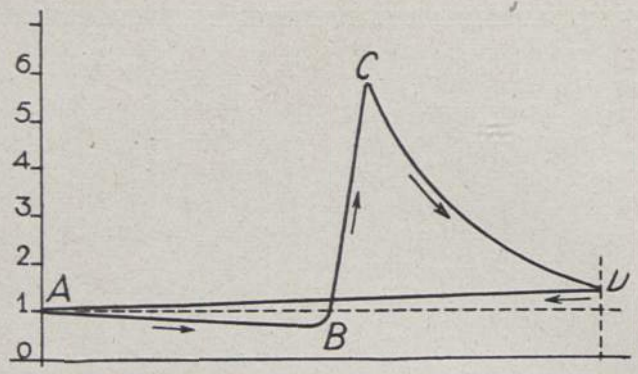
Jede Dampfmaschinen-Anlage ist zweigeteilt, und schon diese Tatsache allein bedeutet einen hohen Grad der Unvollkommenheit. Die Energie soll in der Maschine genutzt werden, sie wird aber im Kessel erzeugt, von dem nur eine schmächtige Leitung hinübergeht. Die Wärme, die dem Brennstoff entlockt wird, kann nicht unmittelbar wirken, sondern muß von einem Zwischenträger hinübergeschafft werden. Diesen stellt das Wasser dar, und es zeigt nur allzudeutlich, daß es nicht gesonnen ist, seine Vermittler-Tätigkeit umsonst zu verrichten. Hinzu kommen die Verluste, die im Dampfkesselbetrieb an sich liegen.

Die Verbrennung in der Feuerung ist niemals vollkommen, da es nicht möglich ist, der glühenden Heizstoffschicht stets die richtige Luftmenge zuzuführen. Wir wissen von Seite 296, daß bei Luftmangel starke Entwicklung von Kohlenoxyd, einem Gas mit geringem Heizwert, eintritt, daß bei Luftüberschuß eben dieser Überschuß beinahe nutzlos miterwärmt werden muß. Das Wasser kann von den Heizgasen nicht unmittelbar berührt werden, die Wärme muß vielmehr eiserne Wandungen durchdringen, wodurch wiederum ein Verlust entsteht. Ein erheblicher Teil der im Verbrennungsraum hervorgerufenen Hitze strahlt nach den Seiten, wo keine wasserberührten Flächen liegen. Beim Durchlaufen der Verbindungsleitung zwischen Kessel und Maschine verliert der aus dem Wasser erzeugte Dampf an Wärme. Ist er glücklich am Arbeitszylinder angelangt, dann enthält er auch die gesamte Wärme, die aufgewendet werden mußte, um die Flüssigkeit Wasser in den gasförmigen Zustand überzuführen. Da sowohl durch das Auspuffrohr wie durch die




553. Der erste Gasmotor
Erbaut 1861 von dem französischen Mechaniker Lenoir

zum Kondensator führende Leitung der Betriebsstoff in Form von Dampf hinausgeht, so bleibt dieser Wärmeaufwand (Flüssigkeitswärme + Verdampfungswärme, Seite 279) für den Maschinenbetrieb verloren. Die Temperatur, mit welcher der Dampf die Maschine verläßt, ist immer noch sehr hoch.




554. Diagramm der Gasmaschine von Lenoir

Die Erkenntnis dieser Tatsachen wies den Weg zum Bau der günstiger wirkenden Kraftmaschine. Sie besitzt keinen Kessel, der Heizstoff wird im Arbeitszylinder selbst verbrannt und übt so unmittelbare Wirkung. Es ist möglich, die erforderliche Luftbeigabe aufs genaueste zu regeln. Die Verbrennung geht bei sehr hoher Temperatur vor sich, und das bedeutet an sich bereits eine wärmetheoretische Veredelung dieses Vorgangs. Es braucht aus diesem Grund aber auch kein Kondensator angewendet zu werden, da die Temperatur der Außenluft ausreichend niedrig ist. Die abströmenden Gase sind zwar auch jetzt sehr heiß, aber der Unterschied zwischen der Verbrennungs- und der Auspuff-Temperatur ist doch sehr erheblich, so daß der Maschine ein großes Wärmegefälle für die Kraftwirkung zugute kommt. Immerhin sorgt die hohe Auspuff-Temperatur dafür, daß auch jetzt die Bäume nicht in den Himmel wachsen, und hinzu kommt die Notwendigkeit, den Arbeitszylinder durch Wasser, das an seinen Außenwänden entlang strömt, zu kühlen, weil sein Eisenkörper sonst glühend werden würde.

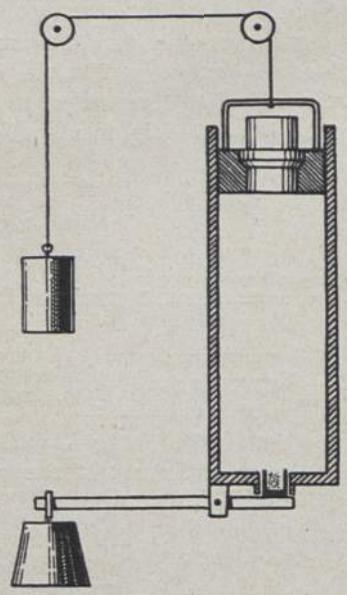
Die im Auspuff davongehenden und vom Kühlwasser mitgenommenen Wärmemengen sind Hauptursache, daß man auch bei den Maschinen mit Verbrennung im Arbeitszylinder meist nicht über einen Wirkungsgrad von 25, bei den allerneuesten und besten von 35 v. H. hinauskommt. Es ist wunderbar zu beobachten, wie der technische Fortschritt nur stufenweis sich vollziehen kann. Hier waltet offenbar ein diamanthartes Naturgesetz. Es ist daher durchaus berechtigt, allen „Erfindungen" mit dem größten Mißtrauen gegenüberzutreten, die plötzlich eine gewaltige, sprungweise Verbesserung zu bringen versprechen.

Man kann sagen, daß bei der jüngeren Maschine die Heizgase es sind, die im Arbeitszylinder den Kolben treiben. Zieht man in Betracht, wie groß der räumliche und wärmetechnische Abstand der Heizgase vom Zylinder beim Dampfmaschinenbetrieb ist, bei dem sie noch dazu durch eine weit unvollkommnere Verbrennung entstehen, dann tritt die Größe des errungenen Fortschritts mit schlagartiger Deutlichkeit hervor.

Neben dem weit sparsameren Umgang mit der Energie ist auch rein äußerlich eine sehr bedeutende Vereinfachung erreicht. Die treibenden, hoch erhitzten Gase werden dadurch bereitet, daß entweder Gas von niedriger Temperatur mit einer entsprechenden Luftmenge dem Zylinder zugeführt und darin entzündet wird, oder daß Öl in feinster Zerstäubung als ein gasähnlicher Nebel, gleichfalls mit Luft gemengt, im Zylinder zur Verbrennung gelangt. Je nach dem Betriebsstoff nennt man die Vorrichtungen daher Gas- oder Ölmaschinen. Für den Arbeitsvorgang selbst besteht kein grundsätzlicher Unterschied, ob der eingeführte Brennstoff ursprünglich ein Gas oder ein Öl gewesen ist. Wie außerordentlich verschieden die Brennstoffe sein dürfen, die in derselben Maschine ohne wesentliche Abänderung ihrer Einrichtung verarbeitet werden können, wird im folgenden gezeigt. Wir werden häufig die Gattungsbezeichnung Gasmaschine ohne Rücksichtnahme auf die Art der Zylinderspeisung anwenden.

Es ist nicht zu verkennen, daß die Gasmaschine eine äußerliche Rückkehr zum Uranfang der Dampfmaschine, zu Papin, bedeutet (Seite 167). Bei der Schöpfung des Franzosen, die ihn zum Vater der Kolben-Dampfmaschine machte, bildete der gleiche Raum den Kessel, den Arbeitszylinder und den Kondensator. Daß bei der Gasmaschine die Kesselwirkung im Zylinder vor sich geht, ist ganz klar, denn der Brennstoff wird darin zur Wärme-Entwicklung entzündet. Während aber Papins „Zylinder für alles" so unvollkommen wie möglich arbeitete, haben wir in der Zylinderanordnung der neuen Art ein vorzüglich wirkendes Gerät vor uns. Die Gründe sind, daß hier nicht mehr wie damals die Feuerung mühsam beiseite geschafft werden muß, damit nach Verlauf einer beträchtlichen Zeit eine Kraftwirkung auftreten kann, und daß mit Drücken auf den Kolben gearbeitet wird, die im Vergleich ungeheuerlich genannt werden müssen.

Die Gasmaschine ist als Kleinmotor entstanden. In der Mitte des vorigen Jahrhunderts besaß das Großgewerbe in den recht hoch entwickelten Dampfmaschinen eine ausgezeichnete Kraftquelle. Aber der Handwerker, der einen Teil seiner Werkzeuge, eine Drechselbank, Drehbank, einen Mahlgang oder eine Pumpe mechanisch antreiben lassen wollte, sah sich vergeblich nach einer Kraftmaschine um, die in jeder Werkstatt aufgestellt werden konnte und ausreichend billig Energie lieferte. Denn die Dampfmaschine mit ihrem Kessel forderte viel Platz und immerwährende Bedienung, vor allem aber sinkt die Wirtschaftlichkeit ihres Betriebs außerordentlich stark hinunter, wenn sie für eine ganz geringe Pferdestärkenzahl ausgeführt wird. Die Verluste schwellen dann, auf die einzelne Pferdestärke bezogen, unmäßig an. Bei der Gasmaschine liegen gerade in diesem Belang die Verhältnisse sehr viel günstiger, und diese Tatsache öffnete ihr deshalb zunächst die Tür zum Wettbewerb. Es hat jedoch nur wenige Jahrzehnte gedauert, bis auch die Großgasmaschine mit Vorteil auftreten konnte. Heute werden vieltausendpferdige Krafterzeuger sowohl mit Dampf- wie mit Gasspeisung gebaut.



555. Papins Pulvermaschine aus dem Jahre 1688

Nach dem, was vorher über den weit besseren Wirkungsgrad der Gasmaschine gesagt wurde, muß es bei dieser Lage der Dinge zunächst wundernehmen, daß überhaupt noch Dampfmaschinen gebaut werden. Bei der Krafterzeugung ist es jedoch nicht allein ausschlaggebend, für welchen Preis man die Pferdestärke erhält, ebenso große Wichtigkeit hat die Form, in welcher die Energie geliefert wird. Es bestehen nun erhebliche Unterschiede in den

Charaktereigenschaften der Gas- und der Dampfmaschine, die der letzten immer noch sehr weite Gebiete als unbestrittenes Arbeitsfeld bewahren.

In ihrem Kessel, obgleich dieser die Wurzel vieler Übel ist, besitzt die Dampfmaschine einen umfangreichen Kraftbehälter. Sie kann aus ihm in jedem Augenblick Energie in großen Mengen schöpfen, so daß sie, wenn die Feuerung erst einmal tüchtige Hitze entwickelt, jederzeit in Gang gebracht zu werden vermag und es gleichgültig ist, ob in solchem Augenblick anzutreibende Maschinen, also Belastung, bereits an die Kurbelwelle geschaltet sind oder nicht. Die Gasmaschine besitzt dagegen keinen Kraftbehälter. Sie muß sich die treibende Energie immer erst selbst bereiten und kann das nur tun, wenn sie sich bereits in Gang befindet. Daraus folgt, daß sie stets von außen her durch besondere Mittel in Betrieb gesetzt werden muß. Auch das ist nur dann möglich, wenn die Kurbelwelle von jeder Belastung frei ist. Erst wenn sie sich in voller Drehung befindet, dürfen die anzutreibenden Maschinen angeschaltet werden.

Demzufolge scheidet die jüngere Kraftmaschine grundsätzlich für alle Betriebe aus, die eine häufige Stillsetzung erfordern. Sie kann zum Beispiel nicht als Kranmotor, für Fördermaschinen, Walzwerkantriebe, als Kraftlieferer für absatzweis arbeitende Pumpen dienen. Es kommt hinzu, daß die meisten Gattungen der Gasmaschine immer nur in Einer Richtung umzulaufen vermögen. Die Krane, Förderanlagen, Walzwerke sowie viele andere kraftheischende Betriebe verlangen aber die Umsteuerbarkeit. Die Dampfmaschine kann, wie wir wissen, mit Leichtigkeit die Umlaufrichtung wechseln.

556. Eugen Langen

557. Nikolaus August Otto

Aus Matschoß, Geschichte der Gasmotorenfabrik Deutz. VDI-Verlag, Berlin

Es ist auch wegen der großen, vom Kessel stets zur Verfügung gestellten Kraftmengen möglich, sie für einige Zeit sehr stark zu überlasten. Die Dampfmaschine zieht, wenn man ihr nicht Übermäßiges zumutet, immer noch glatt durch. Das kann die Gasmaschine nicht; sie bleibt stehen, wenn man ihr die Überwindung allzu hoher Widerstände zumutet. Aus allen diesen Gründen scheidet die Gasmaschine heute noch für viele Verwendungsgebiete aus. Es unterliegt jedoch keinem Zweifel, daß sie sich schließlich auch diese Bannbezirke erobern wird.

Suchen wir aber nach Eigenschaften des neueren Krafterzeugers, die ihn dem älteren überlegen machen, so finden wir sie in sehr bedeutender Zahl.

Ehe eine Dampfmaschine in Betrieb kommt, müssen der Kessel angeheizt und die Zylinder vorgewärmt werden. Das erfordert bei großen Anlagen viele Stunden; der Wärter muß lange vor dem Beginn des Betriebs zur Stelle sein. Die Gasmaschine ist stets nach kurzer Vorbereitung fähig, ihre Tätigkeit zu beginnen. In kleineren Betriebspausen verbraucht sie keinen Brennstoff, da auch die Kraftbereitung während dieser Zeit völlig still steht, indes die Kesselfeuerung ständig unterhalten werden muß, wenn man nicht immer wieder die lange Vorbereitungszeit von neuem beginnen will.

Der Platzbedarf einer Gasmaschinenanlage ist gering. Man bedarf für ihre Aufstellung keiner schwierig zu erlangenden behördlichen Genehmigung, weil ja der Kessel fortfällt, der auch bei sorgfältigster Bauart stets eine Gefahr für die Umgebung bedeutet. Unter oder über bewohnten Räumen darf nach unserer Gesetzgebung eine große Dampfmaschinenanlage niemals aufgestellt werden.

Will also z. B. ein großes Geschäftshaus die erforderliche Kraft in Keller- oder Dachbodenräumen selbst bereiten, wünschen etwa eine Rohrpostzentrale oder ein großes Telegraphenamt eine eigene Stromerzeugungsanlage zu besitzen, die sie im Fall eines Streiks von der Belieferung durch die öffentlichen Kraftwerke unabhängig machen, dann kommt hierfür nur die Gasmaschine in Betracht. Das Kleingewerbe greift nach ihr um so lieber, als in diesem Bezirk Kraft in den allermeisten Fällen nur absatzweis benötigt wird, so daß sehr häufige Betriebspausen entstehen. Während dieser Zeit braucht man sich dann um die Kraftmaschine gar nicht zu kümmern, sie verursacht bei Stillstand keine Kosten und läuft doch nachher augenblicklich wieder an. Ihre Wartung erfordert zwar große Sorgsamkeit, sie kann aber doch von jedem Sachunkundigen bedient werden und verlangt nicht ständige Aufmerksamkeit wie der Dampfkessel, bei dem Rost und Wasserstand ununterbrochen beaufsichtigt werden müssen, wenn der Druck nicht bald zu hoch, bald zu gering werden soll.

Ganz allein beherrscht die Gasmaschine heute den Bereich des Antriebs von Straßen- und Luftfahrzeugen. Hierin hat sie eine Überlegenheit erlangt, die ihr nicht so leicht und nicht so bald von einem anderen Motor streitig gemacht werden kann. Hauptursache ist, daß die Gasmaschine die Pferdestärke mit dem geringsten Aufwand an Eigengewicht liefert. Müssen doch der Kraftwagen und das Luftfahrzeug ihren Treiber mit sich führen. Dieser kann daher nur nützlich sein, wenn er das Fahrzeug in geringem Grad belastet. Es darf niemals vergessen werden, daß die Menschheit den Kraftwagen, das Motorboot, das lenkbare Luftschiff und das Flugzeug, diese wichtigen Besitztümer, für jetzt und jede absehbare Zeit nicht hätte schaffen können, wenn die Gasmaschine nicht vorhanden wäre.

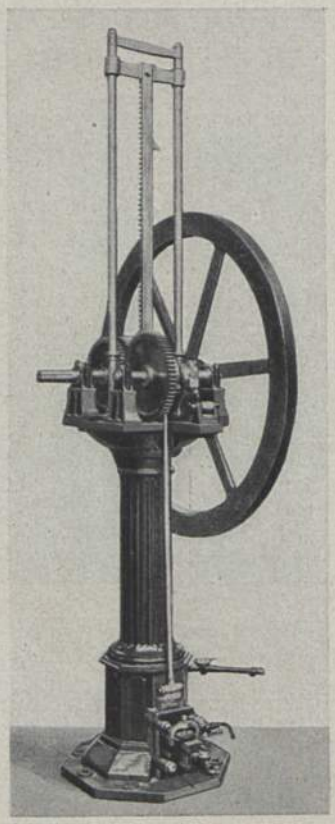
Niemand hätte vorauszusagen vermocht, daß gerade sie hierzu fähig sein würde. Denn die ersten Maschinen dieser Art waren so massig getürmt, daß ihr Körper 500 Kilogramm für jede erzeugte Pferdestärke wog. Es schien unmöglich, wenn es nicht Tatsache wäre, daß das Eigengewicht nun bei den feinsten und gepflegtesten Bauarten bis auf nahezu ein Kilogramm für die Pferdestärke hinabgedrückt ist. Hierzu bedarf es freilich der denkbar sorgfältigsten Ausführung aller Teile, Verwendung allerbester Baustoffe und größter feinmechanischer Kunstfertigkeit der Hersteller.

Abschnitt 11 in Band II dieses Werks hat uns darüber unterrichtet, in welcher Art die Motoren für Kraftwagen heute hergestellt werden. Jede einzelne dieser Maschinen ist eine

Glanzleistung der Technik, und dies insbesondere deshalb, weil die Anwendung der erklügeltsten Bauweisen doch nicht zu einer gefährlichen Überkünstelung der Maschinen geführt hat. Der Kraftwagenmotor gleicht an Feinheit der Ausführung einem Uhrwerk, an Widerstandsfähigkeit und Zuverlässigkeit seiner Leistungen einem Schmiedehammer. Die Meisterschaft technischer Arbeit, ihre Fähigkeit, jeder Mannigfaltigkeit der Anforderungen sich durch tief innerliche Erfassung der Unterschiede anzupassen, tritt selten mit so blendender und machtvoller Klarheit hervor wie in der Tatsache, daß Maschinen gleicher Art 10 000 Pferdestärken für den Antrieb eines Schiffs und 1½ Pferdestärken für die Bewegung eines Motorrads zu liefern vermögen.

Im Jahre 1886 bezeichnete Reuleaux in einem Vortrag den Gasmotor als „die größte Erfindung im Kraftmaschinenfach, welche seit Watt gemacht worden ist, und welche eine umgestaltende Einwirkung auf das Kraftmaschinenwesen der ganzen Welt angebahnt und zum Teil schon bewirkt hat". Es ist ein hohes Lob, das der von uns jetzt behandelten Maschinengattung hier zuteil wird, denn Reuleaux, der ein trefflicher Beurteiler war, vergleicht sie mit der Schöpfung eines der größten Techniker aller Zeiten. Der ausgezeichnete Lehrer an der Technischen Hochschule zu Berlin, der Schöpfer der modernen Bewegungslehre (Kinematik), sah noch nicht die Hochleistungen der Gasmaschine, denen wir heute als Zeugen beiwohnen. Unser Geschlecht wiederum kann die kommende Entwicklung nicht vorausahnen. Daß sie Großartiges bringen wird, ist mit vollster Bestimmtheit zu erwarten, denn die Gasmaschine hat bis jetzt wenig mehr als sechs Jahrzehnte ihres Daseins durchlaufen, während die Dampfmaschine Jahrhunderte alt ist.

Möglich, wenn auch keineswegs sicher, daß die von Watt ausgestreute Saat heute bereits völlig erblüht ist. Die Gasmaschine aber ist trotz allem, was sie der Menschheit bereits leistet, doch nur erst ein grüner Halm, der sich eben zum Licht durchgerungen hat. Mit besonderem Stolz dürfen wir sagen, daß der jüngere Krafterzeuger ein Werk unseres Vaterlands ist. Von der ersten wirklich brauchbaren Bauart bis zur relativ höchstvollendeten der Gegenwart haben deutsche Männer sämtliche grundlegenden Gasmaschinen-Bauarten erdacht.



558. Erste atmosphärische Gasmaschine von Otto
erbaut 1866. Aus Matschoß, Geschichte der Gasmotorenfabrik Deutz. VDI-Verlag, Berlin

Watts Schaffen ist freilich Voraussetzung für die Entstehung der Gasmaschine gewesen. Denn sie hat die Gestaltung ihres Körpers, den Bau aller Glieder von der Dampfmaschine entlehnt. Wäre die Werkstattechnik nicht durch die harten Forderungen der Dampfmaschinentechnik in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts so hoch entwickelt gewesen, der Gasmotor hätte nicht zu werden vermocht. Wenn der Leser zur Seite 78 des zweiten Bandes zurückblättert, wird er unter Hinweis auf die Bilder 126 und 127 die Feststellung finden, daß die schematischen Darstellungen einer Gasmaschine und einer Dampfmaschine völlig gleich sein können. Kein vernünftiger Mensch wird freilich eine Maschine, die für Speisung mit Dampf bestimmt ist, mit Gasverbrennung im Zylinder betreiben wollen, weil viele Einzelheiten ihres Baus hierfür nicht zweckmäßig sind. Die Arbeitserzeugung würde höchst unwirtschaftlich sein, sie ist aber keineswegs unmöglich, denn im großen sind beide Maschinengattungen gleich.

Es sei, bevor wir uns der geschichtlichen Entwicklung der Gasmaschine zuwenden, zweierlei bemerkt.

Der Leser, der den Abschnitt 11 „Die Kraftfahrzeuge" aus Band II kennt, wird manche Wiederholung finden. Vieles dort Gesagte muß hier noch einmal vorgetragen werden, damit der große Gegenstand in seiner Gesamtheit dasteht und ein vielleicht lästiges Nachschlagen unnötig ist. In Einzelheiten aber soll doch auf jenen Abschnitt zurückgegriffen werden, dann nämlich, wenn der Kraftwagenmotor den zu behandelnden Sonderteil in der höchsten Vollendung besitzt.

Die Einwendung liegt nahe, daß das Kleingewerbe heute im Elektromotor den besten, beinahe einen idealen Kraftlieferer besitzt. Er verbraucht so wenig wie der Gasmotor Betriebsstoff in den Pausen, ist gleichfalls immer zur Arbeit bereit und noch weit leichter zu bedienen. Dazu besitzt er die Fähigkeit, Überlastungen zu ertragen und mit gleicher Wirkung in beiden Richtungen sich zu drehen. Trotzdem muß der Elektromotor aus den Betrachtungen an dieser Stelle ausscheiden, weil die vorliegende Abteilung des Werks von den Kraftmaschinen handelt, das heißt von Vorrichtungen, welche die von der Natur zur Verfügung gestellten Kraftquellen direkt in eine willkommene Form der Kraft umwandeln. Das vermag der Elektromotor nicht. Er ist kein primärer Krafterzeuger in dem losen Sinn, wie wir dieses Wort hier immer gebrauchen, das heißt kein Umformer natürlicher Ur-Energie. Ihm fließt die Kraft bereits als das Ergebnis künstlicher Bereitung zu. Er ist abhängig von der Belieferung durch eine Wasserturbine, eine Dampf- oder Gasmaschine.

*

Der Gedanke, Gasmaschinen zu bauen, wurde mit dem ersten industriell erzeugten Gas geboren. 1796 gab der Franzose Lebon das Verfahren zur Herstellung des Leuchtgases aus Holz an, und er hat sogleich ausgesprochen, daß wohl Maschinen mit diesem neuen Brennstoff betrieben werden könnten. Als dann Murdock im Jahre 1798 die Dampfmaschinenfabrik von Boulton & Watt in Soho bei Birmingham mit Steinkohlengas beleuchtet hatte, entstanden bald in allen größeren Städten der Erde Gaswerke, und als schließlich Röhren in jede Werkstatt führten, da reizte diese weite Verbreitung eines leichtbrennbaren Stoffs viele Geister zur Erfindung von Leuchtgas-Maschinen an. Zahlreiche Patente wurden erteilt, und das Ziel der Bestrebungen wurde auch bereits frühzeitig richtig erkannt. Denn schon 1826 schrieb der Engländer Cheverton: „Es ist seit langem ein Wunsch der praktischen Mechaniker, in den Besitz einer Kraftmaschine zu gelangen, die stets zur Arbeit bereit, ohne allzu große Kosten zu betreiben ist und keine Zeitverluste durch Vorbereitungen erfordert. Diese Eigenschaften würden die Maschine in allen Fällen verwendbar machen, wo man nur geringer Kraft in unregelmäßigen Zeiträumen bedarf. Solche Fälle sind so zahlreich, und

die Vermeidung der Inanspruchnahme von Menschenkräften ist so wichtig, daß die Vorteile, die der Menschheit aus einer solchen Maschine erwachsen könnten, auch dann noch unberechenbar sein würden, wenn die Kosten viel größer sein sollten als bei Anwendung von Dampf."

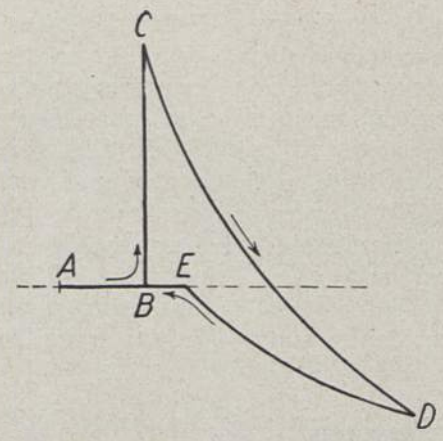
Aber erst im Jahre 1860 begann der erste Gasmotor zu laufen, der wenigstens maschinentechnisch folgerichtig erdacht war.

Sein Erbauer, der Franzose Lenoir, schloß die Konstruktion des Kraftkörpers ganz eng an die doppeltwirkende Dampfmaschine an. Wenn wir Bild 553 betrachten, erscheinen uns zwar manche Bauteile fremdartig, sie könnten aber alle auch für eine Maschine mit Dampfbetrieb verwendet werden. Die vier Schieber am Zylinder, die den Einlaß und Auslaß für beide Seiten steuern, werden durch Exzenterstangen angetrieben, die rechts und links von der Wellenkröpfung liegen. Die Schubstange umfaßt den Kreuzkopf gabelförmig. Das sind nur äußerliche Abweichungen von den Formen, die uns aus Abschnitt 27 vertraut sind. Im übrigen finden wir den plattenförmigen Kolben mit seiner geradgeführten Stange, die Stopfbüchse und die Hauptwelle mit dem Schwungrad wieder.

Eine grundsätzliche Neuerung aber ist die doppelwandige Ausbildung von Zylinderkörper und Zylinderdeckeln zu dem Zweck, Kühlwasser durch die Hohlräume laufen zu lassen. Bei der Dampfmaschine sucht man ja gerade durch einen Dampfmantel den Zylinder zu heizen. Hier muß Wärme abgeführt werden, damit das Eisen nicht beim Betrieb der Maschine rotglühend wird und alsdann seine Form verändert.

Die Lenoir-Maschine arbeitete auf folgende Art:

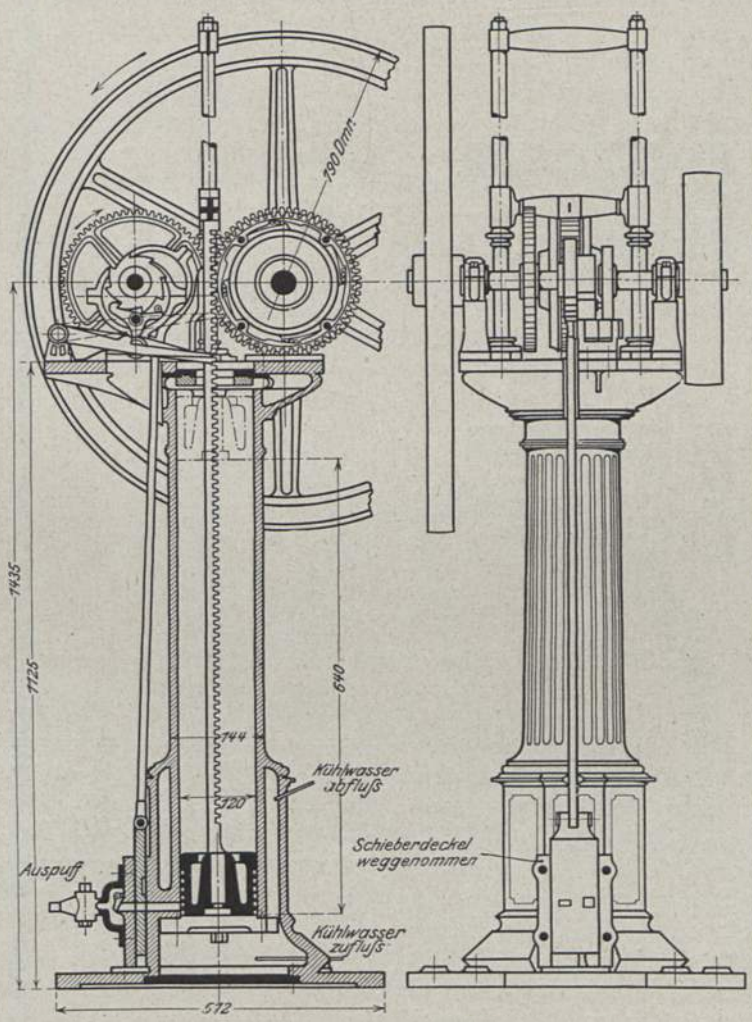
Wenn der Kolben sich nach rechts zu bewegen begann, wurde der linke Einlaßschieber geöffnet, und der Unterdruck, der sich hinter dem Kolben ausbildete, saugte ein Gemisch von Leuchtgas und Luft in den Zylinder. Wenn der Kolben etwa die Hälfte seines Wegs zurückgelegt hatte, schloß der Einlaßschieber ab, und nun wurde das Gemisch durch einen elektrischen Funken entzündet. Es verbrannte und rief eine Pressung von 5 bis 6 Atmosphären hervor, die den Kolben bis zum Hubende trieb. Sobald er jetzt umkehrte, wurde der Auslaß links geöffnet, und der Kolben schob die Verbrennungsrückstände hinaus. Gleichzeitig saugte er in die andere Zylinderseite Gemisch ein, das wiederum bei Mittelstellung des Kolbens entzündet wurde und neue Treibkraft lieferte.




559. Theoretisches Diagramm der atmosphärischen Gasmaschine von Otto

Um uns die Vorgänge ganz klar zu machen, benutzen wir das bereits bei unserer Betrachtung der Kolben-Dampfmaschine bewährte Verfahren, Kolbenweg und Kolbendrücke auf der einen Zylinderseite in ihrer Abhängigkeit voneinander aufzuzeichnen. Bild 554 ist das Diagramm einer Lenoir-Maschine.

Der Kolben bewegt sich zunächst von links nach rechts. Sogleich, bei A, geht der Einlaßschieber auf, und der Kolben saugt bis B Gemisch an; während dieses Vorgangs bleibt der Druck unter der Atmosphäre. Bei B, wo der Einlaßschieber bereits geschlossen wird, tritt die Zündung ein, wodurch der Druck nahezu augenblicklich bis C emporschnellt. Indes der Kolben weiterläuft, dehnen sich die heißen Verbrennungsgase aus. Sie haben sich fast auf Atmosphärendruck entspannt, wenn der Kolben bei D die Endlage erreicht hat. Darauf ist während des gesamten Rückgangs der Auspuff offen, es tritt fast keine Änderung der Druckverhältnisse mehr ein.




560. Einrichtung der ersten atmosphärischen Gasmaschine von Otto
Aus Matschoß, Geschichte der Gasmotorenfabrik Deutz. VDI-Verlag, Berlin

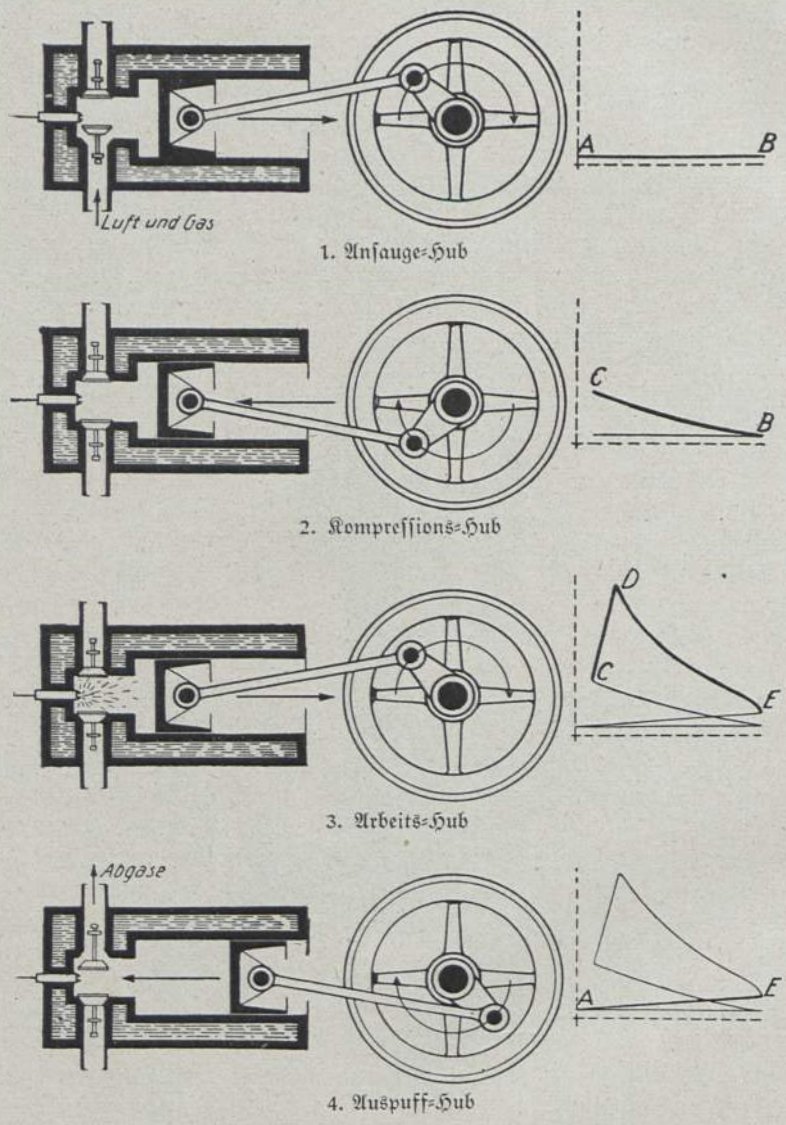
Lenoir erwartete Großes von seiner Maschine. Es wurde verkündet, daß sie bei gleicher Betriebssicherheit sehr viel billiger arbeite als die Dampfmaschine, daß diese fortab also keine Daseinsberechtigung mehr habe. In der technischen Welt entstand große Aufregung, die freudigen Erwartungen wurden aber schmählich getäuscht. Es zeigte sich nämlich, daß die Maschine nicht, wie erwartet, ½ Kubikmeter Leuchtgas für die Erzeugung einer Pferdekraftstunde verbrauchte, sondern 3 Kubikmeter. Hierdurch wurde der Betrieb bei dem damaligen Preis für Leuchtgas sehr teuer, und darüber kam man doch trotz Chevertons entgegenstehender Meinung nicht hinweg. Außerdem versagte die elektrische Zündung sehr häufig, und die schwerfällige Maschine blieb nach einer geringen Zahl von Aussetzern bereits stehen. Der alte Carl Benz sagt in seinem Buch „Lebensfahrt

eines deutschen Erfinders" von ihr: „Sie war ein Erstling, der die löbliche Eigenschaft hatte, bei guter Laune zehn Minuten lang zu funktionieren und zu arbeiten, aber ein Ölschlemmer und Schmiermaterialverbraucher, daß man sie scherzweise einen ‚rotierenden Ölklumpen' nannte." Man sagte auch, die Maschine brauche zwar keinen Heizer, aber einen Ölgießer. Es wurden zwar mehrere Stück gebaut und in Werkstätten in Betrieb genommen; sie verschwanden aber bald wieder. Die Dampfmaschine war noch einmal Siegerin geblieben.

Lenoir ließ sich auch ein Patent auf den Betrieb seiner Maschine mit Benzin-Einsaugung erteilen und baute damit einen Kraftwagen und ein Motorboot. Beide haben im Jahre 1863 Fahrten gemacht, aber die plumpe, unsicher arbeitende und allzu gefräßige Maschine konnte auch auf diesem wichtigen Gebiet keine bleibende Stätte finden.

Der Franzose kann daher so wenig als der Erfinder der heutigen Gasmaschine wie als der erste Erbauer eines brauchbaren Kraftfahrzeugs angesehen werden. Er war ein Vorläufer, dessen Werke nicht von der Sonne eines bleibenden Erfolgs beschienen wurden.

Lenoir beging den Fehler, mit der Naivität eines Erfinders, der die Schwierigkeiten seiner Aufgabe völlig verkennt, im Sturmschritt sogleich den Gipfel erklimmen zu wollen. Hätte seine Maschine wirklich befriedigende Arbeit geleistet, so wären dem Gasmotor die Schmerzen und Enttäuschungen eines langsamen Werdegangs erspart geblieben. Ein solcher Vorgang entspricht aber nicht dem Willen der unsichtbaren Weltregierung.




1. Ansauge-Hub
2. Kompressions-Hub
3. Arbeits-Hub
4. Auspuff-Hub

561. Arbeitsvorgänge in einer einfach wirkenden Viertakt-Gasmaschine mit theoretischem Diagramm

Aus der Kritik der Lenoir-Maschine, die erst später gegeben werden soll, weil uns jetzt noch die Grundlagen für das Verständnis fehlen, werden wir die innerlichen Gründe erkennen, aus denen sie versagen mußte.

An der tatsächlichen Geburtsstätte des sieghaften Gasmotors steht eine äußerlich weit weniger vollkommene Maschine, deren Erbauer in Bescheidenheit und klarer Erkenntnis der Schwierigkeiten zunächst das Einfachste gesucht hatte. Bevor wir sein Wirken betrachten, ist es notwendig, daß wir uns ganz allgemein darüber klar werden, welch ein Vorgang sich im Zylinder einer Gasmaschine nach der Zündung abspielt.

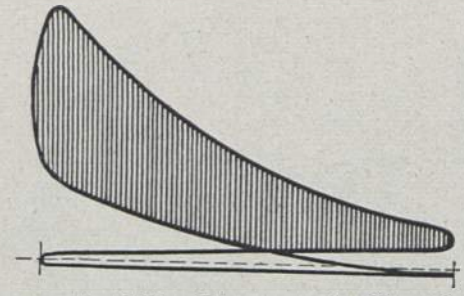
Das Leuchtgas und alle die anderen brennbaren Gase, deren Bekanntschaft wir noch machen werden, haben die Eigenschaft, sich mit Luft innig zu vermischen. Es tritt, wenn sie zusammengebracht werden, Diffusion ein, das heißt die Teilchen der verschiedenen Stoffe lagern sich so durcheinander, daß die Mischung überall gleichmäßig ist. Wird das diffundierte Gemisch entzündet, so verbrennt es sehr geschwind in seiner ganzen zusammenhängenden Masse, indem die Entflammung sich von selbst fortpflanzt. Es wäre aber falsch zu sagen, daß eine Explosion stattfindet. Von einer solchen kann man nur sprechen, wenn die Durchflammung des ganzen zur Verfügung stehenden Stoffs durchaus sofort, das heißt in praktisch unmeßbar kurzer Zeit, etwa in dem Bruchteil einer tausendstel Sekunde, stattfindet. Derart verbrennen das neuzeitliche Schießpulver, das Dynamit und ähnliche Substanzen, die deshalb auch Explosivstoffe heißen.

In der Gasmaschine wäre ein derartiges Geschehnis nicht willkommen. Denn der Stoß durch die sich mächtig ausbreitenden Gase würde sich so schnell auswirken, daß der Kolben nicht Zeit hätte, die Kraftspende in ausreichendem Maß entgegen zu nehmen. Beim Gas-Luft-Gemisch geht die Verbrennung glücklicherweise weit langsamer vor sich. Die Geschwindigkeit des Vorgangs ist abhängig von dem Mischungsverhältnis zwischen Gas und Luft. Und auch der auftretende Druck sowie die Temperatur werden hierdurch bestimmt. Die folgende Liste gewährt einen guten Überblick über diese Zusammenhänge. Sie ist das Ergebnis von Versuchen, die Clerk mit einem Gas von Außenluft-Spannung und 17 Grad Celsius angestellt hat:

| Gemisch | | Höchster Druck in Atmosphären-Ueberdruck | Zeitdauer der Verbrennung in Sekunden | Verbrennungs-temperatur in Celsius-Graden |
|---|---|---|---|---|
| Raumteile Gas | Raumteile Luft | | | |
| 1 | 4 | 5,60 | 0,16 | 1595 |
| **1** | **5** | **6,37** | **0,055** | **1812** |
| 1 | 6 | 6,30 | 0,04 | 1792 |
| 1 | 9 | 5,3 | 0,08 | 1557 |
| 1 | 12 | 4,2 | 0,24 | 1202 |
| 1 | 14 | 2,8 | 0,45 | 806 |

Wir sehen in der Liste, daß der Druck und die Temperatur am höchsten, die Zeitdauer der Verbrennung innerhalb der

willkommenen Grenzen sehr kurz ist, wenn die Mischung von Gas und Luft 1:5 beträgt. Es wird daher in allen Gas-Maschinen die Herstellung dieses „stärksten Gemischs" angestrebt. Wächst die Luftbeigabe, ist das Gemisch also ärmer an brennbaren Teilchen, so verringert sich der Druck, der nach der Zündung eintritt. Denn die überschüssige Luft muß unnötig miterwärmt werden. Aber auch zu starke Anreicherung mit Gas ist ungünstig, weil dann schließlich der Augenblick eintritt, in dem mangels Sauerstoffs nicht mehr alle Gasteilchen verbrennen können; sie gehen dann ungenutzt durch die Maschine. Bei richtiger Mischung eilt die Zündflamme sehr rasch bis zum letzten Winkel des Raums. Eines der entzündeten Teilchen wirft sich mit rasender Hast auf das andere, dieses zündet das folgende und so fort. Es bildet sich die Zündwelle aus, die weder zu geschwind noch zu langsam fortschreitet. Man sollte daher die Gasmaschinen nicht, wie es immer noch oft geschieht, Explosionsmotoren nennen. Verbrennungs-, besser noch Verpuffungs-Maschine ist die rechte Bezeichnung.



562. Praktisches Diagramm des Viertakt-Motors
Die positive Arbeitsfläche ist schraffiert

Wenn die Krafterzeugung im Arbeitszylinder unserer Vorrichtungen tatsächlich durch Explosionen geschähe, dann wäre das Geschütz die älteste Gasmaschine. Man müßte auch Papins Pulvermaschine zu den Vorläufern rechnen (Bild 555).

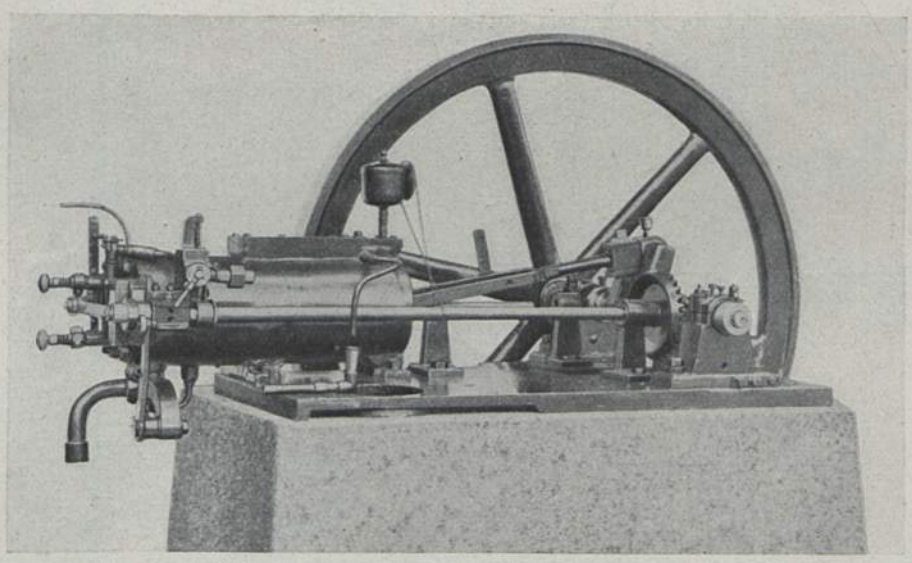
Wie uns aus Abschnitt 27 bekannt ist, baute der Vater der Dampfmaschine im Jahre 1688 zu Marburg, auf Arbeiten von Huygens fußend, die erste aller Kolbenmaschinen, die er für den Betrieb mit Schießpulver einrichtete. Eine kleine Menge dieses Explosivstoffs wurde am Boden des Zylinders in eine Zündpfanne eingebracht, die durch einen gewichtbelasteten Hebel angedrückt wurde. Befand sich der Kolben durch den Zug des beschwerten Seils, an dem er hing, in der höchsten Lage, dann wurde das Pulver entzündet, und die heißen, gespannten Gase trieben durch ein Rückschlagventil im Kolben die Luft hinaus. Es blieben nur heiße Gase zurück, die beim Erkalten einen Unterdruck im Zylinder herstellten. Die Außenluft preßte alsdann, gerade wie bei Papins Dampfmaschine, den Kolben nieder, und dieser Arbeitshub hätte ein Pumpengestänge emporziehen können. Aber die Luftverdünnung war so gering und der Betrieb so gefährlich, daß die Maschine praktisch nie benutzt worden ist.

Schon der erste Gasmotor, der in der Praxis des Werkstättenbetriebs vielfach und mit großem Nutzen verwendet wurde, machte nicht mehr von der Explosionswirkung Gebrauch. Er war bereits eine Verpuffungs-Maschine. Dennoch hat er einen Grundgedanken mit Papins Modell gemein. Denn auch bei ihm wird der Arbeitshub durch den Überdruck der Außenluft bewirkt. Der erste Gasmotor war eine atmosphärische Maschine.

Auf der Weltausstellung zu Paris im Jahre 1867 erregte eine kleine Kraftmaschine (Bild 558) unliebsames Aufsehen. Sie vermochte nur eine halbe Pferdestärke zu leisten, machte aber einen Lärm, der noch für eine tausendpferdige Maschine zu groß gewesen wäre. Die Schar der Besucher mied den Stand, in dem das tosende Ding unermüdlich stampfte, und auch die Fachleute sahen es zunächst scheel und ziemlich verächtlich an. Gegen den Schluß der Ausstellung aber erhielt die Maschine die höchste Auszeichnung, obgleich 14 französische Gasmotoren gezeigt wurden, die alle weit weniger fremdartig aussahen.

Der Erbauer war Nikolaus August Otto (Bild 557) aus Köln, geboren am 14. Juni 1832 zu Holzhausen. Er hatte die erste Gasmaschine geschaffen, die befähigt war, mit der Dampfmaschine in Wettbewerb zu treten. Brauchte Lenoir 3 Kubikmeter Leuchtgas zur Erzeugung einer Pferdekraftstunde, so hatte Otto nur 0,8 Kubikmeter für das Hervorbringen der gleichen Leistung notwendig. Die hierdurch entstehende Verbilligung der Betriebskosten war so groß, daß man das wenig einnehmende Äußere der Maschine hierüber völlig vergaß.

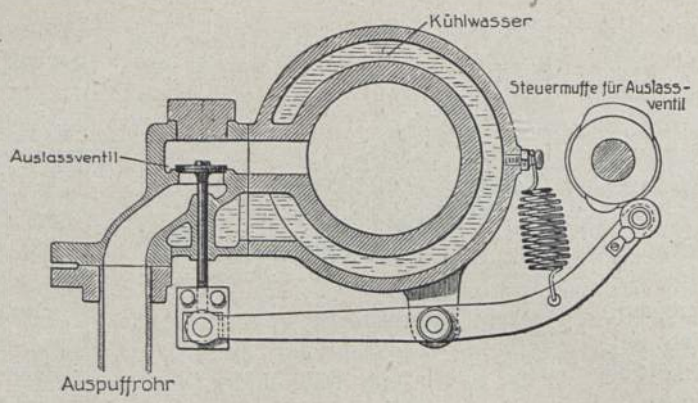
Otto, der die Technik um einen neuen, wirtschaftlich arbeitenden Krafterzeuger bereichert hatte, war ein Kaufmann ohne jegliche technische Vorbildung. Er fand den rechten Weg, um das Leuchtgas als Kraftquelle zu benutzen, durch freie Überlegung, als er eine flüchtige Zeitungsnachricht über Lenoirs Motor gelesen hatte. Im Jahre 1861 ließ er die erste Versuchsmaschine bei einem kleinen Kölner Mechaniker bauen. Dann verband er sich mit dem Ingenieur Eugen Langen (Bild 556) und gründete mit diesem 1864 in Köln unter der Firma N. A. Otto & Co. „eine Fabrik und Handlung zur Anfertigung und zum Verkauf atmosphärischer Gasmaschinen". Der Genosse war ihm nicht nur ein geschäftlicher Helfer, der wagemutig sehr erhebliche Summen für die Entwicklung des zunächst nicht sehr aussichtsreich erscheinenden Gegenstands aufwendete, er hat die gemeinsame Sache auch als Techniker bedeutend gefördert. Er stand Otto zur Seite, ähnlich wie Boulton einst Watt geholfen hatte. Eugen Langen hatte an der Hochschule in Karlsruhe Technik studiert und war dort einer der begabtesten Schüler Redtenbachers gewesen, der die



563. Erste Versuchs-Viertakt-Maschine von Otto
Aus Matschoß, Geschichte der Gasmotorenfabrik Deutz. VDI-Verlag, Berlin

Wissenschaft des Maschinenbaus begründet hat. Langen hat unter anderm auch das Schwebebahn-System angegeben, nach dem die Elberfelder Linie erbaut worden ist (Band II, Seite 352).

Die Arbeitsweise des Otto-Motors war sehr eigenartig. In einem stehenden, oben offenen Zylinder befand sich ein Kolben, der gegen die Zylinderwandung abgedichtet war. Die Kolbenstange hatte oben eine Zahnung und wurde durch zwei senkrechte Stangen gerade geführt. Der Zylinder war von einem Mantel umgeben, durch den Kühlwasser floß. Unten befand sich ein Schieber zum Einlassen von Gas und Luft sowie die Zündvorrichtung.



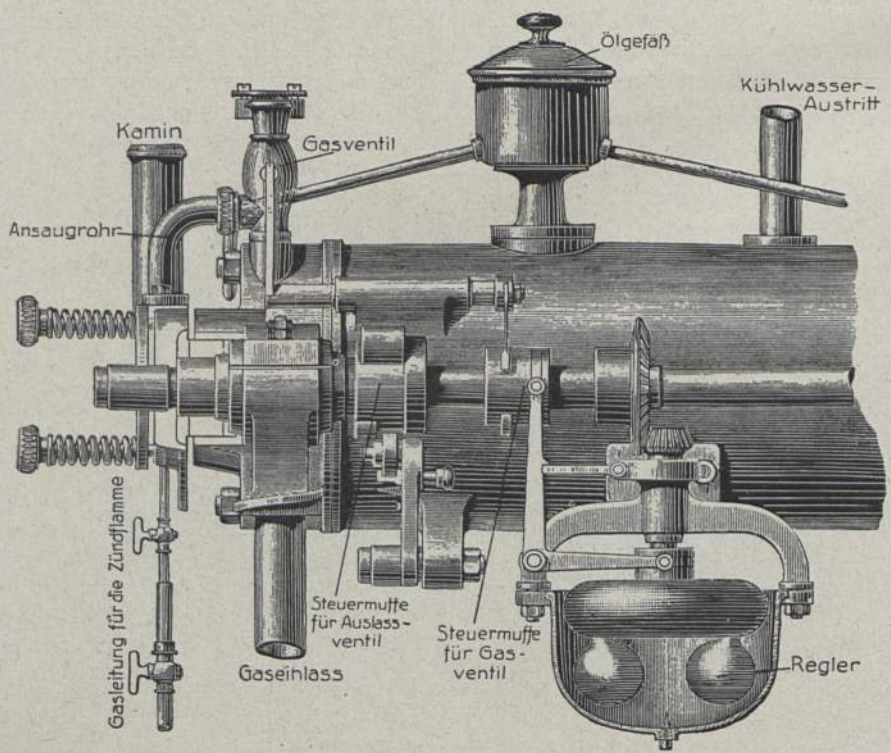

564. Steuerung des Auslaßventils von Ottos Viertakt-Motor

Die Verbindung zwischen der Kolbenstange und der Hauptwelle, auf der das Schwungrad und eine Riemenscheibe saßen, wurde mittels eines Zahnrads und einer an diesem angebrachten Kupplung hergestellt. Diese war von Langen erdacht. Sie arbeitete mittels Kugeln, die sich in keilförmigen Bahnen bewegten, derart, daß die Hauptwelle von der Kolbenstange nur dann mitgenommen wurde, wenn diese sich nach unten bewegte. Ging der Kolben aber aufwärts, so drehte sich das Zahnrad frei von der Hauptwelle. Auch dann bereits, wenn der Kolben abwärtsgehend langsamer lief als die Welle, löste sich die Kupplung. In ständiger Verbindung mit der Hauptwelle wurde durch einen Zahntrieb eine Nebenwelle mitbewegt, an der zwei Exzenter angebracht waren. Eins von diesen bewegte mittels einer Stange den Steuerschieber am Fuß des Zylinders (Bild 560).

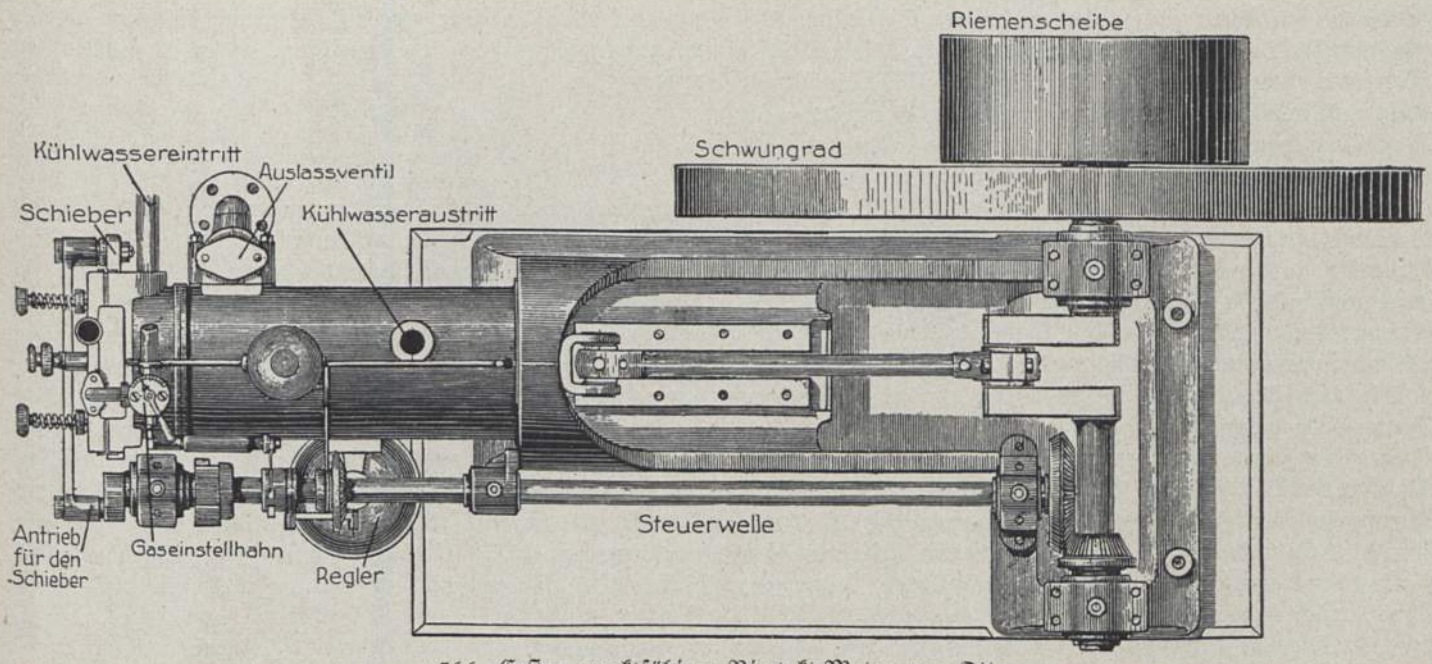
Wie bei allen folgenden Gasmaschinen müssen wir auch bei dieser die Erklärung der Arbeitsform in einem Augenblick beginnen, in dem sich die Vorrichtung bereits in Betrieb befindet. Sobald der Kolben seine unterste Lage erreicht hat, bei welcher er auf dem Boden des Zylinders aufruht, wird er durch das zweite Exzenter auf der Nebenwelle sogleich wieder ein wenig emporgehoben, indem dieses Exzenter unter eine Nase am oberen Ende der Kolbenstange greift (Bild 558). Hochgehend saugt der Kolben bei geeigneter Stellung des Steuerschiebers Gemisch ein, und dieses wird entzündet. Der Verpuffungsdruck von etwa 3,5 Atmosphären schleudert den infolge Entkupplung sich jetzt völlig frei bewegenden Kolben empor. Damit er nicht hinausfliegen kann, sind am oberen offenen Zylinderende Gummipuffer angebracht.

Die heißen Gase kühlen sich darauf ab, und zwar sehr schnell, weil das durch den Mantel strömende Wasser die Zylinderwandung kalt hält. Bereits kurz bevor der Kolben seine Höchstlage erreicht hat, bei der die ihm durch den Verpuffungsdruck verliehene lebendige Kraft erlahmt ist, befindet sich unter ihm ein Raum mit stark verdünntem Inhalt. Darauf preßt der Druck der atmosphärischen Luft den Kolben hinunter, wobei auch noch sein Gewicht mithilft. Während dieser Bewegung ist die Kolbenstange mit der Hauptwelle gekuppelt, es vollzieht sich der Arbeitshub. Beim Niedergehen des Kolbens verschwindet das Vakuum mehr und mehr. Wenn wieder Atmosphärendruck im Zylinder erreicht ist, öffnet der Schieber den Auslaß, und die Gase, die von der Verpuffung zurückgeblieben sind, werden hinausgedrückt. Darauf hebt das Exzenter den Kolben wieder an.

Wir haben hier eine Bauart vor uns, die auf den ersten Blick für ein Spielzeug geeigneter scheint als für eine Betriebsmaschine. Und dennoch stellte die Vorrichtung einen praktisch sehr gut brauchbaren Motor dar. Sie war sehr sorgfältig und technisch richtig durchgebildet, wofür der geringe Gasverbrauch das beste Zeugnis ist. Seltsam erscheint insbesondere der Freilauf des Kolbens beim Aufwärtsgang. Die Kraft der verpuffenden Gase hat nur die Aufgabe, ihn emporzuschleudern. Antriebsarbeit kommt an die Hauptwelle allein durch den Druck der Außenluft, wenn man von der zusätzlichen Wirkung des Kolbengewichtes absieht. Ottos Konstruktion ist also geradeso eine atmosphärische Maschine wie die Schöpfung Newcomens (Seite 171). Die erste betriebsfähige Dampfmaschine, wie der erste praktisch verwendbare Gasmotor fußen also auf dem gleichen Grundgedanken, nur daß die Luftverdünnung auf verschiedenartige Weise erzeugt wird. Die andere Artung des Betriebsstoffs, seine Führung und Arbeitsweise in der Krafterzeugungsanlage sind die Ursachen, daß die Newcomen-Maschine ein riesenhaftes, weit




565. Steuereinrichtung von Ottos Viertakt-Motor

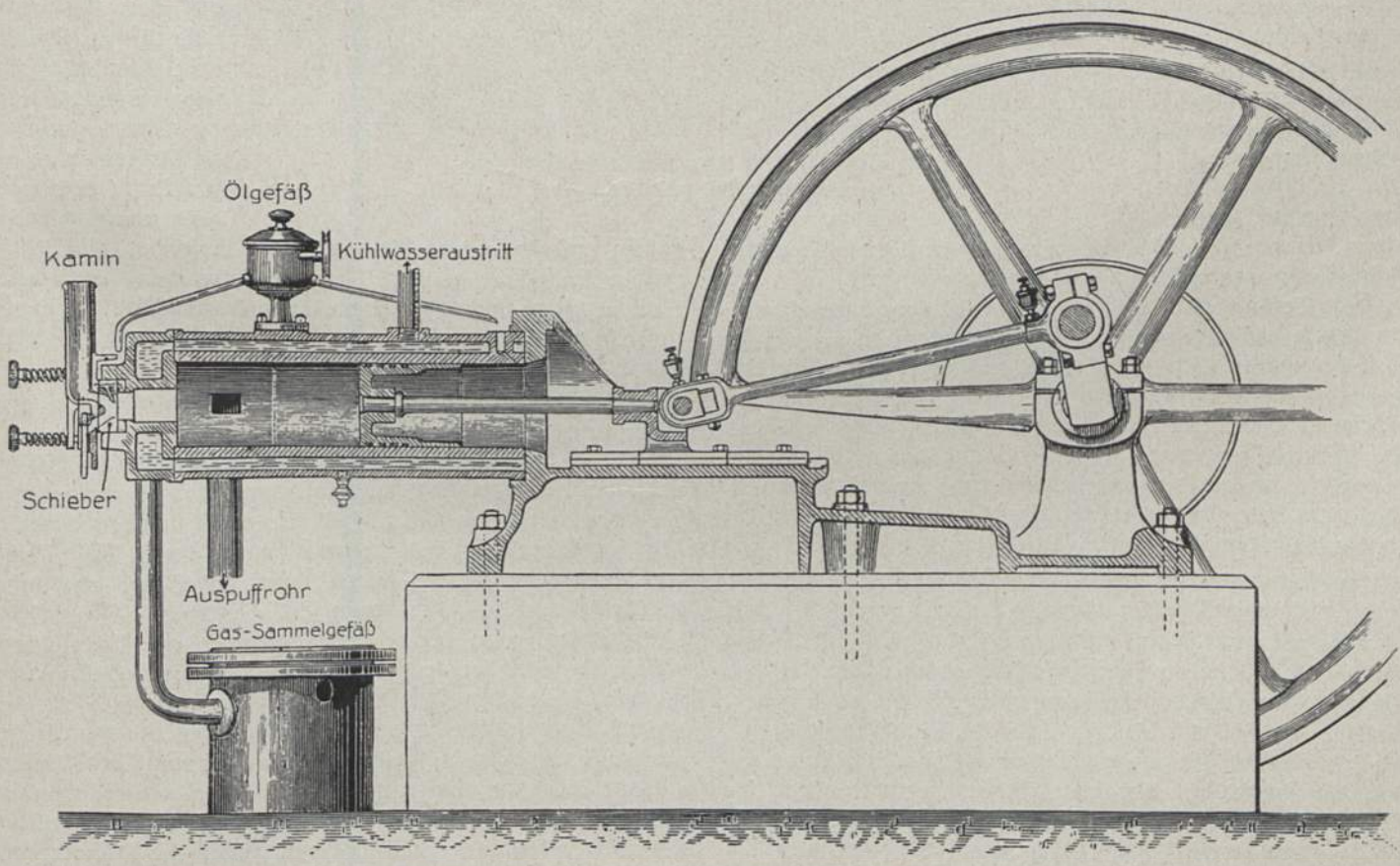



566. Erster marktfähiger Viertakt-Motor von Otto
Ansicht von oben

gebreitetes Gerät, der Otto-Motor aber eine verhältnismäßig sehr schmale Vorrichtung war. Fällt doch bei dieser jede Bereitung von Betriebsstoff außerhalb des Zylinders fort.

Das fortwährende Anschlagen des Kolbens gegen die obere Hubbegrenzung und auf den Zylinderboden verursachte den lärmenden Gang der Maschine. Sie machte 70 bis 80 Umdrehungen in der Minute, und ebenso oft stampfte der Kolben auf. Ganz besonders störend war es, daß dieses Geräusch nicht gleichmäßig blieb, sondern bei jeder Änderung der Belastung in anderem Rhythmus erscholl. Dennoch fand der Flugkolbenmotor, wie die Maschine auch genannt wurde, rasch Eingang in die Werkstätten. Sie war eben der erste wirtschaftlich arbeitende Kleinmotor, der sehr viel bequemer aufzustellen und zu bedienen war als eine Dampfmaschine, und die Sehnsucht nach einem solchen Kraftlieferer war damals so groß, daß der Lärm kein Hindernis für die Einführung bildete.

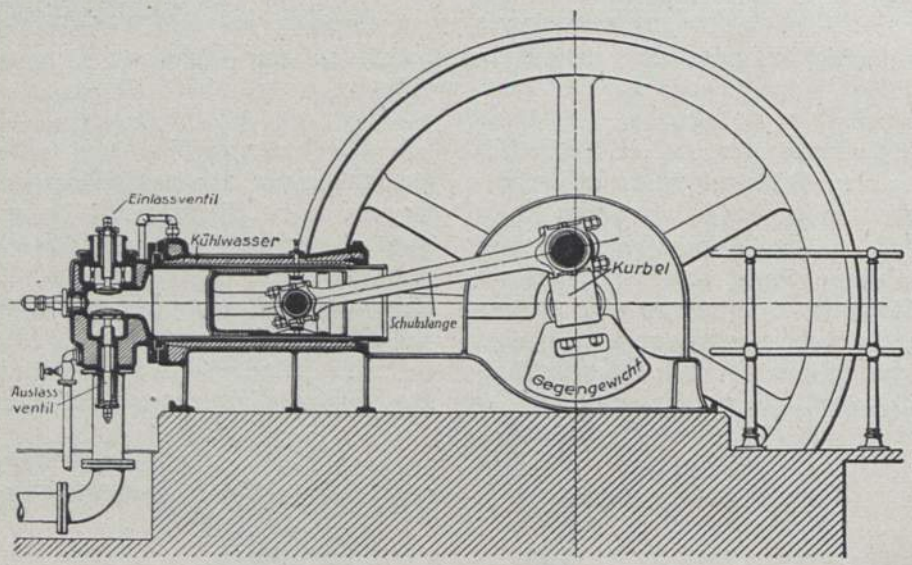
In 10 Jahren hat die Firma Langen & Otto mehr als 5000 solcher Maschinen ausgeführt und verkauft. Mancher




567. Schnitt durch den ersten marktfähigen Viertakt-Motor von Otto

Kleingewerbetreibende hat freilich nach ihrer Aufstellung Unannehmlichkeiten mit der Nachbarschaft gehabt. Keiner dieser Motoren leistete mehr als 3 Pferdestärken. Schon hierfür mußte ein erhebliches Eisengewicht aufgewendet werden. Die Herstellung von Maschinen mit größerer Leistung war nicht angängig, da ja der Betriebsdruck beschränkt war. Über eine Atmosphäre konnte naturgemäß bei Verwendung der Außenluft als Antreiber nicht hinausgegangen werden. Und wir wissen ja von der Erörterung der Dampfmaschine her — es ist aber auch ohnedies leicht einzusehen — daß mit der Steigerung des Arbeitsdrucks auf den Kolben das für jede Pferdestärke aufzuwendende Maschinengewicht geringer werden muß.

Wir durchschreiten die Arbeitsweise der atmosphärischen Gasmaschine gedanklich noch einmal an Hand des Diagramms, das stets der beste Führer bei einer solchen Wanderung ist (Bild 559). Von A bis B wird Gemisch unter Atmosphärendruck angesaugt. Bei B erfolgt die Zündung. Wie diese hier eingerichtet war, werden wir später im Zusammenhang mit den neueren Zündungsarten besprechen. Der Druck unter dem Kolben steigt nun bis C. Noch bevor der Kolben seine oberste Stellung erreicht hat, haben die Gase sich bereits wieder bis auf Atmosphärendruck entspannt, und die Luftleere, durch Zusammenziehung schreitet weiter bis D fort. Gegen Ende seines abwärts gerichteten Wegs verdichtet der Kolben die Verbrennungsrückstände wieder bis zur Atmosphäre. Bei E öffnet sich der Auspuff und die unverbrennlichen Restgase werden unter Atmosphärendruck ausgeschoben, worauf wieder das Ansaugen beginnt.




568. Schnitt durch einen modernen Gasmotor
Gebr. Körting A.-G., Hannover-Linden

Der Verkauf der atmosphärischen Gasmaschinen brachte der Firma nach Überwindung vieler Schwierigkeiten gute Geschäftsergebnisse. Die Werkstätten mußten erweitert werden, und im Jahre 1869 wurde eine neue Fabrik jenseits des Rheins in dem Köln gegenüberliegenden Ort Deutz eröffnet. Die Niederlassung wurde 1872 in eine Aktiengesellschaft umgewandelt, die den Namen Gasmotoren-Fabrik Deutz erhielt. Sie entwickelte sich zu einem Großunternehmen, das heute zu den angesehensten Firmen Deutschlands gehört.

Im Gründungsjahr noch trat als Chefingenieur und leitender technischer Direktor Gottlieb Daimler in die Fabrik ein. Manche grundsätzlich wichtige Erfindung ging aus seiner Hand hervor, und er schuf später in eigener Werkstätte zu Cannstatt den leichten, schnellaufenden Gasmotor, die erste praktisch brauchbare Maschine für den Kraftwagenantrieb. Daimler brachte als jungen Techniker Wilhelm Maybach mit, der später sein tüchtigster Helfer wurde und wichtige Arbeit besonders im Bau von Luftschiff-Motoren geleistet hat.

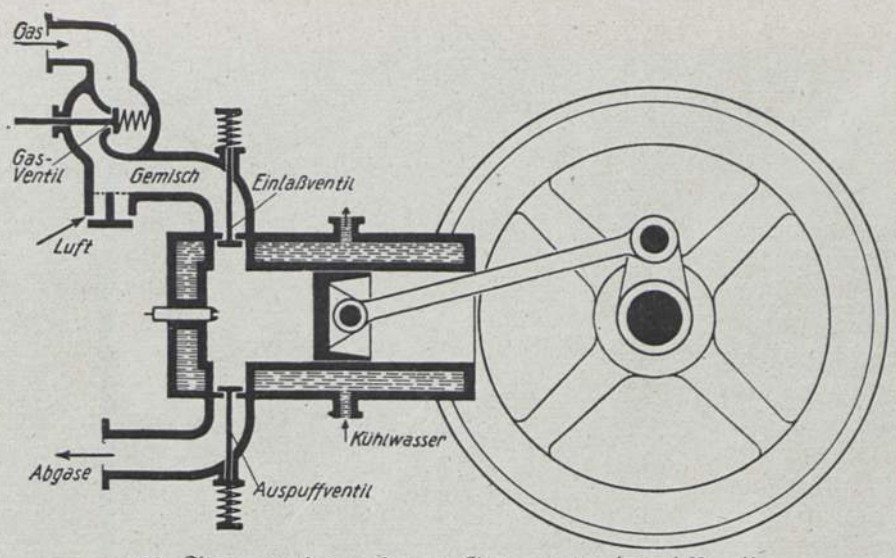
Die Gasmotoren-Fabrik Deutz sollte, nachdem das Ursprungshaus die atmosphärische Maschine entwickelt hatte, zur Geburtsstätte einer zweiten Erfindung werden, die bis in unsere Tage den Kraftmaschinenbau aufs stärkste beeinflußt hat.

*

Otto gab sich nicht damit zufrieden, mit der „Atmosphärischen" eine Maschine geschaffen zu haben, deren Wirkungsbereich stets arg beschränkt bleiben mußte. Der Gedanke, verpuffbare Gase zur Krafterzeugung zu verwenden, erfüllte seine Seele so sehr, daß er nicht Ruhe finden konnte, bevor er den Nutzungsprozeß in eine allgemein verwendbare Form gebracht hatte. Er strebte danach, eine Gasmaschine zu bauen, die ruhig wie die Dampfmaschine ihre Arbeit verrichtete, ebenso wie diese für jede beliebige Leistung gebaut werden konnte, die Vorfahrin aber durch Wohlfeilheit des Betriebs übertreffen sollte. Es gelang ihm, diese Aufgabe zu lösen. Er vollbrachte eine zweite hervorragende erfinderische Tat, die mit der ersten kaum mehr als die Person des Urhebers gemeinsam hat.

Es ist ein sehr seltener Fall in der Geschichte der Technik, daß zwei vollkommen neue Gedanken demselben Kopf entspringen, und der Kaufmann Nikolaus August Otto ist daher den größten Erfindern zuzuzählen. Wieder auf einer Weltausstellung in Paris, im Jahre 1878, erfuhr die Welt, daß die Bauart, die vor elf Jahren so großes Aufsehen erregt hatte, von ihm vollständig verlassen worden war. Mit der Maschine (Bild 563) auf der Ausstellung von 1878 beschritt Otto einen völlig neuen Weg im Gasmaschinenbau. Von dieser Konstruktion stammen sämtliche Gasmotoren ab, die heute in allen Ländern der Erde so ausgezeichnete Arbeit verrichten.

Der „Neue Otto", wie die Maschine bald allgemein genannt wurde, hatte einen etwas höheren Gasverbrauch als der „Alte Otto", nämlich statt 0,8 Kubikmeter 1 Kubikmeter für die Pferdekraftstunde. Hiermit war sie aber immer noch dreimal besser gestellt als die Maschine von Lenoir. Vor der Atmosphärischen zeichnete sie sich durch Einfachheit der Bauart, Ruhe und Gleichmäßigkeit des Gangs aus, und da der Betriebsdruck in ihrem Zylinder innerhalb gewisser Grenzen frei gewählt, auf ein Vielfaches der Atmosphäre gesteigert werden konnte, so war sie auch für große Leistungen mit verhältnismäßig kleinsten Abmessungen und stark verringertem Körpergewicht herzustellen. Dieses sank von 1000 Kilogramm für die erzeugte Pferdestärke schon bei den ersten Stücken auf 500 Kilogramm und beträgt heute bei den ortfesten Kleinmotoren kaum $^1/_{10}$ hiervon. Die Maschine war ein liegender Motor mit einseitiger Wirkung der Kraftgase im Zylinder; sie arbeitete nach dem so berühmt gewordenen Viertaktverfahren.




569. Steuerung des modernen Gasmotors mit drei Ventilen

Dieser Viertakt ist ein höchst seltsamer Vorgang. Man findet in der gesamten Maschinentechnik nicht seinesgleichen. In seiner äußeren Gestaltung höchst unvollkommen, schafft er dennoch etwas recht Vollkommenes. Maschinen, die einen so ruhigen Gang haben, daß sie Dynamos zur Erzeugung des Stroms für gleichmäßig brennende, nicht zuckende Lampen anzutreiben vermögen, werden mit seiner Hilfe gebaut. Er wirkt aber im Zylinder höchst ungleichmäßig. Dreimal muß der Kolben seine Hubbahn durchlaufen, ohne daß das Kraftmittel ihn antreibt; erst bei jedem vierten Hub tritt es Energie spendend auf. Die Kurbelwelle muß zwei volle Umdrehungen machen, bis der ganze Prozeß einmal durchlaufen ist. Während der ersten dieser Umdrehungen arbeitet die Maschine als Kompressor, nur in der ersten Hälfte der zweiten Umdrehung ist sie Kraftlieferer, während der letzten Viertelperiode Druckpumpe. Es gehörte ein genialer Blick dazu, ein solches Krafterzeugungsverfahren als nützlich zu erkennen. Otto besaß solche Genialität.

Bild 561 stellt die vier Takte mit den zugehörigen Kolbenbewegungen und Diagrammteilen dar.

Erste Umdrehung der Kurbelwelle:

Erster Hub: Ansaugen. Der Kolben bewegt sich in dem rechts offenen Zylinder von seiner äußersten Stellung links nach außen. Das Einlaßventil ist geöffnet, und das Gasluftgemisch wird in den Zylinder gesaugt, er wird geladen. Am Hubende schlägt das Einlaßventil zu, und während der beiden folgenden Vorgänge bleibt der Zylinder völlig abgeschlossen.

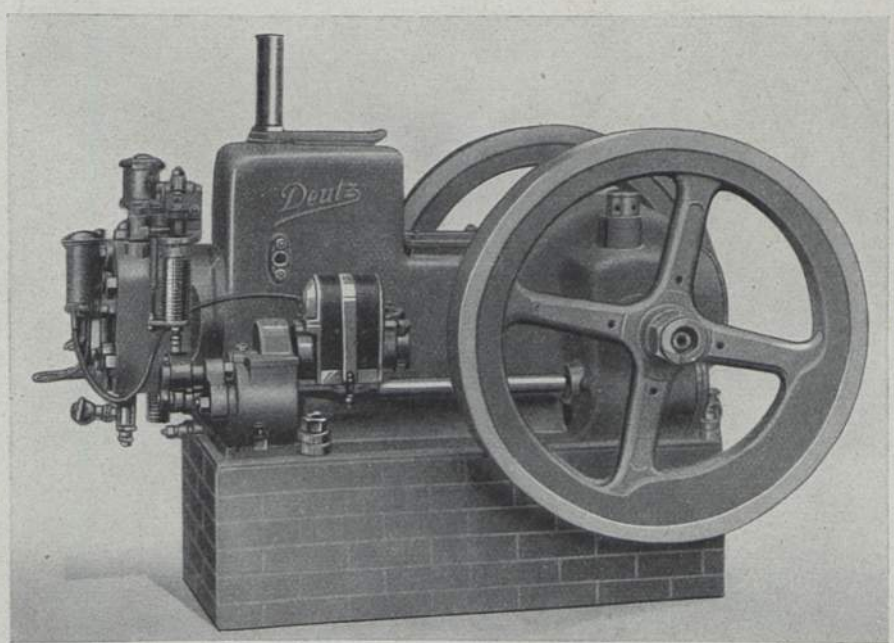
Zweiter Hub: Verdichtung (Kompression). Der Kolben kehrt, wenn die Kurbelwelle durch die lebendige Kraft des Schwungrads weiter gedreht wird, um und verdichtet das Gemisch, das nirgendhin ausweichen kann, bis auf etwa 3 Atmosphären.

Zweite Umdrehung der Kurbelwelle:

Dritter Hub: Zündung und Ausdehnung. Sowie der Kolben jetzt von neuem nach außen zu gehen beginnt, wird das verdichtete Gemisch auf irgendeine Art entzündet, z. B. durch einen elektrischen Funken. Die rasch sich fortpflanzende Verbrennung bereitet hoch erhitzte Gase von etwa 1000 Grad, die sich sehr lebhaft ausdehnen. Mit einem Druck von zunächst 11 Atmosphären, der aber infolge der Ausdehnung rasch bis auf etwa 2 Atmosphären Überdruck absinkt, wird der Kolben vorwärts getrieben. Dies ist der Krafthub.

Vierter Hub: Auspuff. Bevor noch der Kolben seinen Lauf beendet hat, öffnet sich das Auslaßventil. Die bei der Verpuffung zurückgebliebenen unverbrennbaren Gase beginnen von selbst zu entweichen. Sie werden durch den rückkehrenden Kolben fast völlig ausgeschoben bis auf den Rest, der im „schädlichen Raum", das ist die Lücke zwischen Kolbenboden und Zylinderdeckel, zurückbleibt. Mit Beendigung des Kolbenhubs schließt das Auspuffventil wieder, und das Spiel beginnt von neuem. Der geringe Rest der zurückbleibenden indifferenten Gase, der Verbrennungsrückstand, übt praktisch keine Wirkung, da er in dem breiten Strom des nun von neuem eintretenden frischen Gemischs verschwindet.

Dieser Viertakt des jüngeren Otto-Motors ist den Vorgängen in dem Zylinder einer einseitig wirkenden Dampfmaschine so unähnlich wie möglich. Trotzdem zeichnet ein angesetzter Indikator von derselben Art, wie er bei der Dampfmaschine verwendet wird (Bild 342, Seite 197), ein Diagramm, das sehr große Ähnlichkeit mit dem beim Betrieb einer einfach wirkenden Dampfmaschine aufgenommenen Schaubild hat. Beim Vergleich von Bild 562 mit Bild 338 auf Seite 196 findet man dieselbe Grundform. Die Verdichtungslinie liegt etwas anders, die Ausdehnung schließt sich auf dem Gasmaschinen-Diagramm mit sehr scharfem Knick an den Punkt des höchsten Füllungsdrucks an, während der Übergang bei der Dampfmaschine sanfter ist, aber die beiden Aufzeichnungen sind trotzdem Geschwister. Auch hierdurch erweist die Gasmaschine ihre Berechtigung, als Fortsetzerin des von

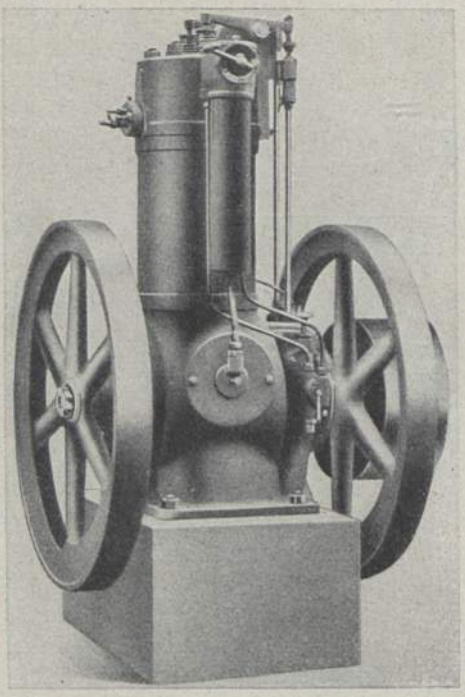



570. Liegender Gasmotor mit Verdampfungskühlung
wird in Größen von 1 bis 4 Pferdestärken Leistung gebaut. Gasmotorenfabrik Deutz, Köln-Deutz

der älteren Schwester begonnenen Werks aufzutreten.

Zwei neue Gedanken von höchster grundsätzlicher Wichtigkeit sind in dem Otto-Viertakt verankert, nämlich die Verdichtung des Gemischs und die Zündung im Totpunkt. Sie haben hauptsächlich den durchschlagenden Erfolg der Maschine bewirkt.

Unverdichtetes Gemisch verpufft nicht so geschwind wie komprimiertes. Die brennbaren Teilchen schwimmen ja in unverbrennbarer Luft, und es ist klar, daß die Zündwelle sich langsamer fortpflanzt, wenn die Teile weiter auseinander liegen. Die Verdichtung bringt sie eng aneinander, da die Gesamtmasse des Gemischs sich nun mit einem weit kleineren Raum begnügen muß. Man kann bei Anwendung der Kompression auch mit ärmerem Gemisch arbeiten, und es wächst die Sicherheit der Zündung.



571. Stehender Gasmotor
Gasmotorenfabrik Deutz, Köln-Deutz

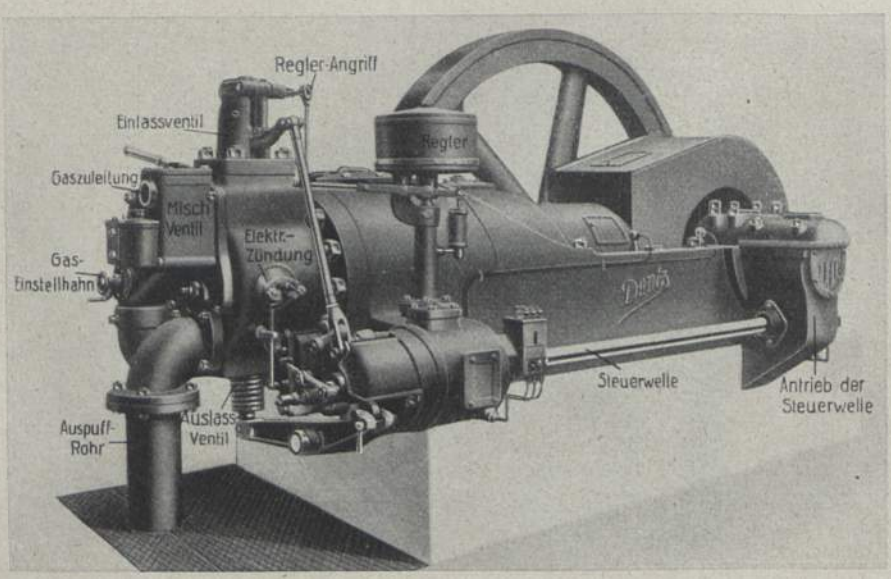
Die Ladungsmasse füllt bei Atmosphärendruck, wenn sie also nicht verdichtet ist, den ganzen Zylinder aus. Sie steht nun mit den Wandungen, die durch das Wasser im umgelegten Mantel kühl gehalten werden, in breiter Berührung. Bei so weit gelagertem Gemisch geht deshalb ein großer Teil der Wärme, die bei der Verpuffung auftritt, in die Wandung. Der thermische Wirkungsgrad der Maschine bleibt geringer, als wenn die Berührungsfläche zwischen Gemisch und kalter Zylinderwandung durch die Kompression verkleinert wurde, denn es ist ja letzten Endes die Wärme, welche die Treibkraft bildet. Freilich hat die Maschine ständig Arbeit durch das Verdichten des Gemischs zu leisten, wodurch der innere Verlust steigt, der mechanische Wirkungsgrad gemindert wird. Im Gesamthaushalt der Maschine hat das jedoch wenig zu bedeuten, der Gewinn ist überragend groß.

Otto mußte viele lang dauernde Versuche anstellen, bis es gelang, die in jener Zeit recht erheblichen Schwierigkeiten bei der Verbrennung verdichteter Gasgemische zu überwinden. Hierbei leitete ihn wohl weniger die klare Erkenntnis der Wirkungen und Erscheinungen, er folgte mehr seinem Gefühl, das ihn sicher führte.

Die Stoßkraft der verpuffenden Gase wirkt am günstigsten, wenn sie mit größter Macht in dem Augenblick auftritt, in welchem der Kolben gerade den Weg nach außen, d. h. zur Kurbelwelle hin, begonnen hat. Wird im inneren Totpunkt, besser noch ganz kurze Zeit vor diesem Totpunkt gezündet, so trifft der Höchstdruck, der ja, da keine Explosion vorliegt, erst nach dem Ablauf eines Sekundenbruchteils sich ausbildet, den Kolben, wenn er nach der Bewegungsumkehr noch langsam läuft. Der Gasdruck hat also beste Gelegenheit, Beschleunigungsarbeit zu leisten. Alle Gasmaschinen werden deshalb derart gezündet.

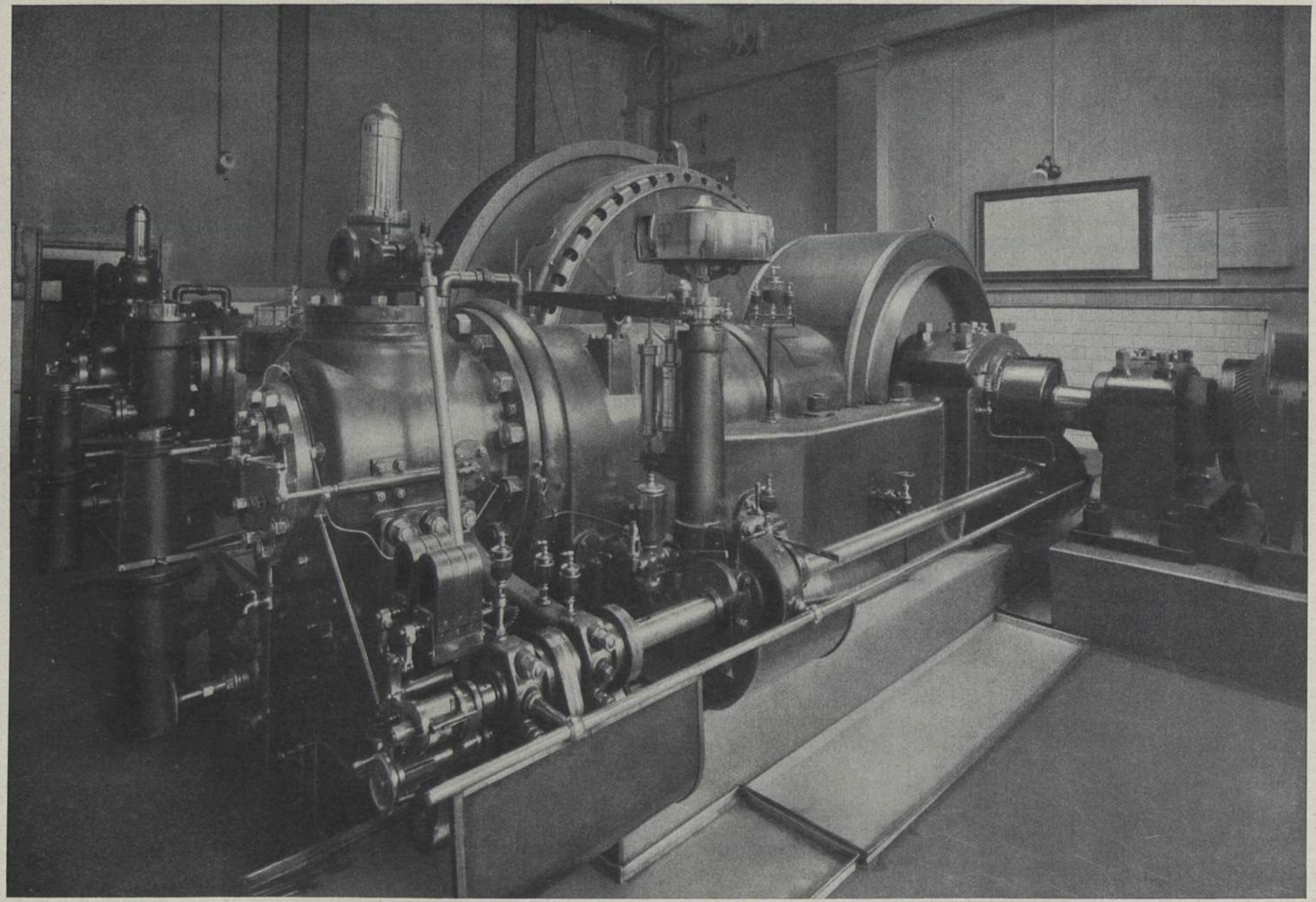
Auf Grund dieser Erwägungen werden wir nun auch verstehen, warum Lenoir zu keinem günstigen Ergebnis kommen konnte. Die Verdichtung kannte er nicht. Das verpuffende Gemisch lag in seiner Maschine einem großen Teil der kühlen Zylinderwandung an, da der Kolben sich bei der Zündung etwa in Hubmitte (der hier doppelt wirkenden Maschine) befand. Die Temperatur blieb gering, die Zündung war unsicher. Außerdem traf der Kraftstoß den Kolben, wenn er ohnedies die höchste Geschwindigkeit hatte. Denn der Kurbelantrieb bringt es mit sich, daß der Kolben in der Hubmitte am raschesten läuft (Seite 207, 226). Die Ausdehnung der Gase konnte daher in der Maschine des Franzosen nur eine stark geminderte Wirkung haben.

Daß die erste Viertaktmaschine von Otto gebaut worden ist, wird von niemandem angezweifelt. Der Viertakt selbst aber ist bereits 1862 von dem Franzosen Beau de Rochas beschrieben worden. Dieser hat jedoch eine Ausführung nicht einmal versucht, und in den Jugendjahren der neueren Otto-Maschine wußte niemand etwas von ihm. Es steht fest, daß der Deutsche die französische Abhandlung nicht gekannt hat. Als es sich dann später zeigte, daß die Herstellung von Gasmaschinen mit Viertakt ein gutes Geschäft war, wurden alle alten Schriften, die sich mit Verbrennungsmaschinen beschäftigen, durchsucht, und hierbei stieß man dann auf die Arbeit von Beau de Rochas. Von verschiedenen Seiten wurden hierauf Klagen auf Löschung des an Otto erteilten Patents eingereicht, und die Prozesse führten tatsächlich dazu, daß das Reichsgericht durch Urteil vom 30. Januar 1886, 5½ Jahr vor dem Ablauf des Patents, den Viertakt der allgemeinen industriellen Ausnutzung freigab. Das war ein schwerer Schlag für die Pionierfirma, die ihn aber dennoch durch die größeren Erfahrungen, die sie damals bereits im Bau von Viertakt-Gasmaschinen besaß, überwinden konnte.




572. Liegender Gasmotor
wird in Größen von 16 bis 65 Pferdestärken Leistung gebaut. Gasmotorenfabrik Deutz

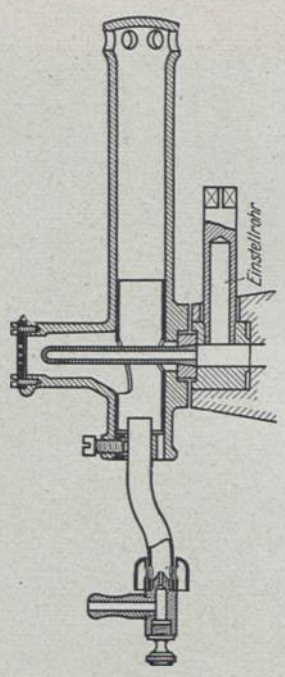
Gewerblich hatten die Gegner Ottos einen bedeutenden



573. Liegender Viertakt-Motor von 250 Pferdestärken
Gebr. Körting A.-G., Hannover-Linden

Sieg davongetragen, sein Erfinderruhm aber blieb unberührt, wenngleich er persönlich das Urteil als eine schwere Kränkung empfand. In seinem großen Werk „Die Gasmaschine" schreibt Schöttler nach der Erwähnung der Arbeit von Rochas:

„Aus allem diesen hat man wohl folgern wollen, daß Otto überhaupt keine Erfindung gemacht habe, daß er nur, geschickt im Entwerfen, die Gedanken früherer Erfinder in eine brauchbare Form gegossen habe. Wer da weiß, wie weit es von einem hingeworfenen Gedanken bis zur Ausführung einer Maschine ist, wird diese Ansicht nicht teilen. Die Patente Barnetts und Millions (anderer erfolgloser Vorläufer) waren tief in den Sammlungen der englischen Patentschriften vergraben, die Schrift Beau de Rochas' kaum bekannt geworden und längst vergessen, als Otto mit seiner Maschine die Bewunderung der Welt herausforderte. Erst dem eifrigen Spüren solcher, die an dem Erfolg Ottos teilnehmen und dazu seine Erfindung benutzen wollten, was nur nach Vernichtung seiner Patente möglich war, ist es gelungen, diese vergessenen Schriften wieder an das Tageslicht zu fördern. Gewiß haben sie der Wissenschaft damit einen Dienst geleistet, gewiß ist es billig, daß man der Männer gedenkt, welche schon so früh die grundlegenden Gedanken einer so großen Erfindung faßten, aber die Erfindung selbst haben diese nicht gemacht; nicht ihnen, die ihre Gedanken nicht auszuführen wußten, welche fast fünfzehn Jahre, in denen doch gewiß eifrig nach der brauchbaren Gasmaschine gesucht wurde, verstreichen ließen, ohne daß irgendein Erfolg sich zeigte, ist unsere heutige Gasmaschine zu verdanken, sondern allein dem Scharfsinn und der Ausdauer Ottos verdanken wir sie. Ehre, dem Ehre gebührt! Es hat denn auch keiner der Vorgänger Ottos, soweit sie zur Zeit seiner Erfindung noch unter den Lebenden weilten, ihm sein Erfinderrecht streitig zu machen gesucht."




574. Glührohrzündung mit auswechselbarem Rückständerohr
Aus Matschoß, Geschichte der Gasmotorenfabrik Deutz. VDI-Verlag, Berlin

*

Aus der Zeichnung auf Bild 561 können wir bereits erkennen, daß der Bau des Gasmotors zwei wichtige Abweichungen gegenüber der Gestalt der Dampfmaschine in sich schließt.

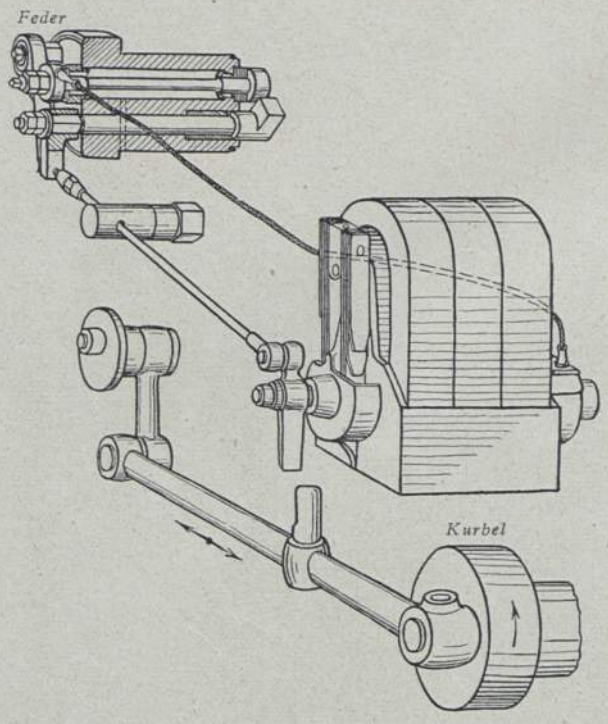
An die Stelle des wärmenden Dampfmantels ist der Kühlmantel getreten, weil die hohe Temperatur der Verpuffung Wärmeabfuhr erfordert. Der hiermit verbundene Verlust an Maschinenleistung ist groß, aber unvermeidlich. Ferner fehlt die Kolbenstange. Die Schubstange ist unmittelbar an einen Schwingbolzen im Kolbenkörper gesetzt. (Siehe auch Band II, Bild 135 auf Seite 82.) Es entsteht hierdurch eine willkommene Verkürzung der Maschine. Der Fortfall der Kolbenstange ist möglich, weil ja der Zylinder auf der Seite, die der Kurbelwelle zugewendet ist, offen steht.

Lange Zeit war es unmöglich, doppelt wirkende Gasmaschinen zu betreiben. Denn der Kolben wird alsdann auf beiden Seiten von einem Glutmeer eingeschlossen, und der Einbau von Kühleinrichtungen für ihn, der sich hin und her bewegt, konnte früher nicht hergestellt werden. Noch heute sind alle kleineren Gasmaschinen einfach wirkend.

Der Kolben wird in solchem Fall an der offenen Seite durch Luft gekühlt. Er muß stets eine beträchtliche Länge haben, damit sein Körper die Aufgabe des fortgelassenen Kreuzkopfs übernehmen kann, nämlich die Geradführung des Schwingbolzens für die Schubstange.

Da der Ungleichförmigkeitsgrad bei der Viertaktmaschine natürlich größer ist als bei einer einfach wirkenden Dampfmaschine, so erfordert er ein sehr schweres Schwungrad auf der Kurbelwelle. Diese Hilfsvorrichtung hat auch hier wie bei der Dampfmaschine die im Kurbeltrieb begründeten Veränderungen der Laufgeschwindigkeiten auszugleichen (Seite 207, 226), sie muß ferner aber die Maschine über drei kraftlose Hübe hinwegbringen, während bei der einfach wirkenden Dampfmaschine schon jeder zweite Hub ein Krafthub ist. Der Otto-Motor machte 600 minutliche Umdrehungen, so daß also der Viertakt sich 300 mal in der Minute, 5 mal in jeder Sekunde abspielte. Schon das ist erstaunlich. Wir erinnern uns aber, daß ein neuzeitlicher Kraftwagenmotor, der ebenfalls mit dem Viertakt arbeitet, gar 2000 minutliche Umdrehungen macht.

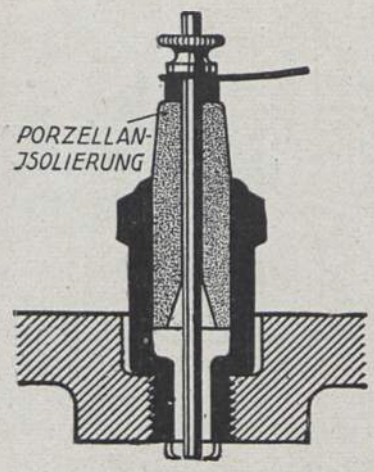
Den Gesamtbau des zweiten Otto-Motors erörtern wir an Hand der eingehenden bildlichen Darstellungen aus einer alten Anpreisungsschrift der Gasmotoren-Fabrik Deutz. Hier ist, abweichend von allen späteren Bauarten die Schubstange nicht unmittelbar an den Kolben gefügt, sondern da man noch ganz im Bannkreis der Dampfmaschine stand, die Kolbenstange beibehalten.




575. Wirkungsweise der Abreißzündung
Aus Matschoß, Geschichte der Gasmotorenfabrik Deutz. VDI-Verlag, Berlin

Wir sehen auf Bild 567 den Zylinder mit seinem Kühlmantel. Auf den Deckel am linken Ende ist der Schieber gesetzt, der den Gemischeinlaß und die Zündung steuert. Hierfür brennt dicht hinter dem Schieber eine offene Flamme in einem kleinen Kamin. Mit dem anderen Ende ist der Zylinder an einen runden Flansch geschraubt, zu dem sich der Träger für die Gleitbahn des Kreuzkopfs erweitert (Bild 566). Die Schubstange greift an der Kurbel der gekröpften Hauptwelle an, die das Schwungrad und die zum Abnehmen der Maschinenarbeit vorgesehene Riemenscheibe trägt.

Als Steuerorgane sind außer dem Schieber zwei Ventile vorhanden: eines, das die Gaszuleitung öffnet (Bild 565) und den Brennstoff während der Ansaugperiode zu den Einlaßkanälen des Schiebers strömen läßt, und ein anderes, das den Auspuff bedient. Gasventil und Auspuffventil sowie der Schieber werden von der Steuerwelle geöffnet und geschlossen, die gleichgerichtet mit der Zylinderachse liegt und von der Hauptwelle durch ein Kegelräderpaar angetrieben wird. Die Übersetzung ist so bemessen, daß bei zwei Umdrehungen der Kurbelwelle die Steuerwelle einmal umläuft. Denn jedes Ventil und auch der Schieber sollen ja bei zwei Umdrehungen der Hauptwelle nur einmal bewegt werden.




576. Schnitt durch die Bosch-Zündkerze

Das Ansaugen von Luft und des Leuchtgases aus dem vorgeschalteten, an die Straßenleitung angeschlossenen Sammelgefäß erfolgt, während der Kolben sich nach rechts bewegt, durch das Ansaugrohr (Bild 565), sobald das Gasventil geöffnet ist und der Schieber durch seine Kanäle eine Verbindung mit dem Zylinderinneren hergestellt hat. Das Öffnen des Gasventils, das stets als besonderes Organ vorhanden sein muß, damit nicht Gas durch die Luftzulaßöffnung ins Freie strömt, wird mittels der Einlaßmuffe auf der Steuerwelle geöffnet, sobald der darauf gesetzte Nocken den Gasventilhebel anhebt.

Das auf der anderen Zylinderseite liegende Auslaßventil öffnet sich, wenn der Nocken der Auslaßmuffe den mit einem Gleitröllchen versehenen Auslaßhebel anstößt. Wie Bild 564 zeigt, wird hierbei der Ventilteller durch einen zweiarmigen Hebel nach innen gedrückt. Denn alle Ventile öffnen natürlich auch hier nach der Seite des höheren Drucks, und das ist bei der Gasmaschine immer das Zylinderinnere. Eine kräftige Feder hält für gewöhnlich den Auslaß wie das Gasventil geschlossen.

Am Ende der Steuerwelle befindet sich eine kleine Kurbel, die mittels Schubstange die Bewegungen des Schiebers veranlaßt (Bild 566 links). Wie dieser Gas und Luft mischt, den Einlaß in den Zylinder herstellt und die Zündung bewirkt, wird später erörtert. Die Speisung der im Rücken des Schiebers immer brennenden Zündflamme geschieht durch eine besondere Gasleitung, von der eine Abzweigung auch zu einem Kanal im Schieber führt.

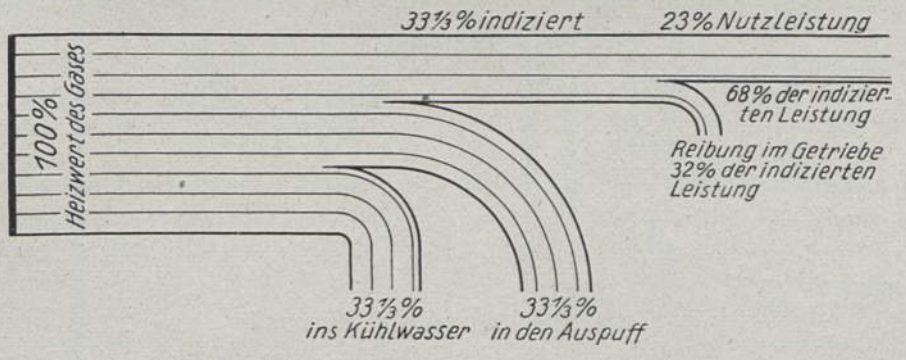
Die Arbeit des Reglers soll gleichfalls erst später besprochen werden. Er ist in der uns bekannten Schwungkugel-Ausbildung unter der Steuerwelle angebracht und wird von ihr wieder mittels Kegelrädern gedreht. Wir sehen schon hier, daß der von dem Regler beeinflußte Winkelhebel an der Einlaßmuffe angreift, die nach rechts und links verschiebbar auf der Steuerwelle sitzt. Die Ähnlichkeit des Gesamtbaus mit einer Ventil-Dampfmaschine ist so groß, daß das Vorbild von niemandem verkannt werden kann.

Der Bau der neuzeitlichen einzylindrigen Gasmaschinen schließt sich aufs engste an den Otto-Motor an. Grundsätzlich abweichend sind heute nur Gemischeinlaß und Zündung ausgebildet. Der Schieber, dessen Gleitflächen sich nur schwer gegen die hohen Drücke im Zylinderinneren dicht halten ließen, ist verschwunden. Für die Zündung sind besondere, sehr viel feiner und doch einfacher wirkende Mechanismen vorgesehen. Der Einlaß wird stets durch ein Ventil besorgt.

Wie auf Bild 568 zu erkennen ist, liegen Einlaß- und Auslaßventil senkrecht übereinander in besonderen Ventilköpfen, die leicht zugänglich sind und ringsum ausgiebig mit Wasser gekühlt werden. Es ist außerdem immer noch ein drittes Ventil vorhanden, das den Querschnitt der Gasleitung nur während der Ansaugperiode frei gibt (Bild 569). Die Einströmung erfolgt also bei gleichzeitigem Offenstehen des Gas- und des Einlaßventils. Für das letzte ist sehr häufig kein Steuerorgan auf der Steuerwelle vorgesehen. Es arbeitet selbsttätig. Denn wenn der Kolben sich im ersten Takt nach rechts bewegt, bildet sich im Zylinder ein Unterdruck aus, der genügt, um den Ventilteller gegen den Druck seiner Schließfeder nach innen zu ziehen. Während der übrigen drei Takte tritt ein solcher Saugzug nicht auf, das Einlaßventil bleibt, während Verdichtung, Verpuffung und Auspuff vor sich gehen, geschlossen, wie das ja notwendig ist.

Um den rüttelnden Gang der Maschine ein wenig zu mäßigen, ist oft ein Ausgleichgewicht an der Kurbel angebracht, dessen Fliehkraftwirkung die entgegengesetzt gerichtete der Kurbel aufhebt. Der Regler wird nicht mehr hängend, sondern stehend mit Schwungkugeln oder mit Federn ausgeführt.

Zur Herbeiführung der Kühlung kann man, wenn genügende Mengen zur Verfügung stehen, Wasser ständig durch den Zylindermantel und die Ventilgehäuse hindurchlaufen lassen. Da es die Maschine mit hoher Temperatur verläßt, benutzt man es oft zum Anwärmen von Behältern, Heizkörpern oder zu ähnlichen Zwecken. Wo dies nicht der Fall ist, wird das Wasser rückgekühlt, wie die Kondensator-Flüssigkeit von Dampfmaschinen-Anlagen (Seite 236), und von neuem zugeführt. Muß mit dem Kühlwasser gespart werden, so kann die selbsttätige Umlaufkühlung verwendet werden, bei der ständig die gleiche Menge kreist und nur in großen Abständen eine Nachfüllung erforderlich ist. Die Bewegung des Wassers erfolgt hierbei durch den Gewichtsunterschied zwischen einer warmen und einer kalten Wassersäule. Die Methode wird am häufigsten bei Motoren auf Fahrzeugen angewendet und in Band II auf Seite 95 ausführlich besprochen.

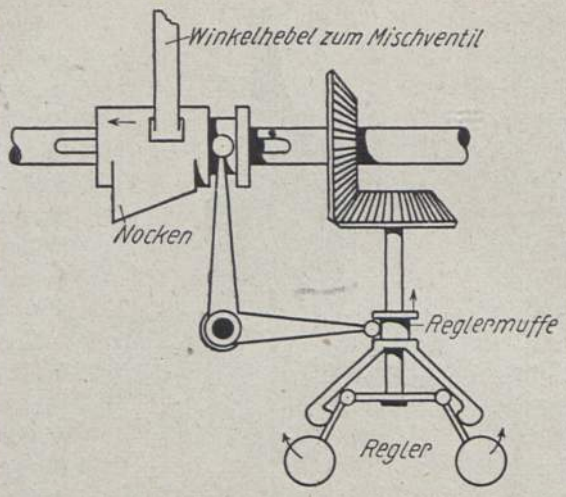



577. Wärmestrom-Diagramm des Gasmotors

Dort wurde auch bereits eine dritte Kühlungsart kurz erwähnt. Es wird auf den Zylinderrücken ein großes Wassergefäß gesetzt, dessen Inhalt mit dem Kühlmantel in Verbindung steht und durch einen Kamin auf dem Deckel allmählich verdampft (Bild 570).

Verdampfendes Wasser kann nie wärmer werden als 100 Grad, die hier eine ausreichend niedrige Temperatur darstellen. Häufiges Nachfüllen ist bei der Verdampfungskühlung notwendig. Sie wird besonders gern bei schweren fahrbaren Gasmaschinen, also besonders für Lokomotiv- und Lokomobil-Motoren, angewendet.

Bild 572 zeigt eine ortfeste einzylindrige Leuchtgasmaschine. Links kommt die Gaszuleitung heran, die mit einem Einstellhahn versehen ist. Durch eine Gasuhr werden die verbrauchten Mengen gemessen. Ein Druckregler muß vorgesehen sein, damit die Maschine den Brennstoff stets mit gleicher Pressung erhält, obgleich der Druck im Rohrnetz entsprechend der schwankenden Entnahme im Lauf des Tags häufig wechselt.




578. Regelung der Gaszufuhr durch schrägen Nocken

Unentbehrlich ist auch die Einschaltung eines Gummibeutels in die Zuleitung. Denn die Maschine entnimmt das Gas ja nicht wie eine Flamme mit ruhiger Beständigkeit, sondern stoßweis. Nur einmal bei zwei Umdrehungen wird angesaugt, und alsdann muß die Leitung beträchtliche Mengen hergeben. Diese stoßweise Entnahme würde an sämtlichen Gaslampen in dem Haus, das die Arbeitsstätte der Maschine ist, ein ständiges Zucken bewirken, ja die Schwankungen würden sogar noch auf die Straßenleitung übergreifen. Um dies zu verhindern, hatte schon Otto ein Sammelgefäß in der Zuleitung für seinen Motor angebracht. Es hatte aber feste Wände und mußte sehr groß sein, um wirklich ausgleichend zu wirken. Besser ist es, ein elastisches Gefäß anzuwenden.

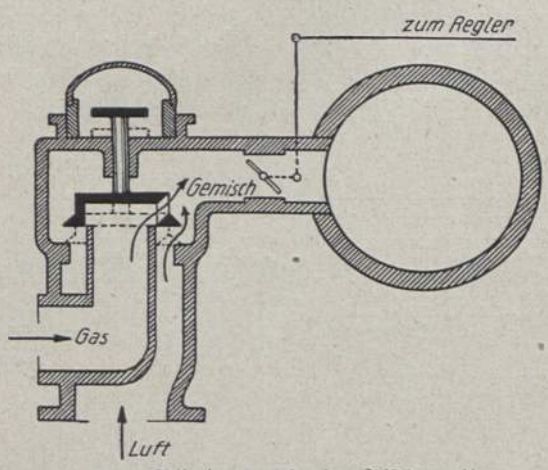
Der linsenförmige Gummibeutel, der durch den Gasdruck in der Leitung aufgebläht ist, zieht sich zusammen, sobald die Maschine saugt, und läßt so die Druckminderung nicht in die Leitung gelangen. Es genügt, daß er etwa zwölfmal so viel Gas faßt, wie die Maschine bei jedem Saughub braucht. Vor den Gummibeutel ist noch einmal ein Absperrhahn gesetzt, der beim Stillsetzen der Maschine vor den letzten Hüben geschlossen wird, damit der Beutel während des Stillstands nicht unter Druck bleibt.

Nach Belieben kann der Motor einen liegenden oder einen stehenden Zylinder haben. Die erste Bauart ist übersichtlicher und macht die Bedienung einfacher. Stehende Maschinen (Bild 571) werden hauptsächlich da gebraucht, wo der Platz für die Aufstellung beschränkt ist. Die Abgase gehen durch einen Auspufftopf, ein Gefäß, in dem mitgerissene Schmierölröpfchen und sonstige Verunreinigungen sich absetzen, und das zugleich das Ausstoßgeräusch mindert. Von hier wird die Abgasleitung möglichst ohne Krümmung über das Dach des Hauses geführt.

Wie für die Dampfmaschine kann auch für die Gasmaschine ein Wärmestrom-Diagramm (Bild 577) entworfen werden. Von dem Wärmeinhalt des zugeführten Gases geht ein Drittel in das Kühlwasser, ein zweites Drittel verbleibt in den heißen Auspuffgasen. Die indizierte Leistung, das heißt die Pferdestärkenzahl, die sich ergibt, wenn man den Inhalt eines mit dem Indikator am Zylinder aufgenommenen Diagramms auswertet, ist daher nicht mehr als ein Drittel der ursprünglichen Leistungsfähigkeit des zugeführten Brennstoffs. Wie Wärme-Energie in mechanische Energie umgerechnet wird, ist auf Seite 98 auseinandergesetzt. Im Getriebe der Maschine verschwindet durch Reibung noch einmal nahezu ein Drittel der indizierten Leistung, so daß der mechanische Wirkungsgrad der Maschine 68 v. H. beträgt. Als Nutzleistung an der Kurbelwelle gibt die Maschine also schließlich nur noch 23 v. H. der Arbeitsfähigkeit wieder, die dem verbrauchten Gas innewohnte. Es kommt hinzu, daß bei dessen Erzeugung auch bereits bedeutende Verluste entstanden sind.

Die Zündung des Gemischs im Zylinder einer Gasmaschine kann ausreichend genau und sicher nur mittels einer fein wirkenden Vorrichtung vollbracht werden. Muß die Entflammung doch nach Beendigung des Verdichtungshubs in einem überaus kleinen Bruchteil einer Sekunde vor sich gehen, wenn der Kolben die innere Totlage erreicht hat oder besser noch kurz vorher. Schon bei einer Maschine, die nur 600 Umdrehungen in der Minute macht, dauert der Verpuffungshub, während dessen die Folge der Gemischzündung sich auszuwirken hat, nicht länger als $^1/_{20}$ Sekunde. Die Zündung muß also während eines bescheidenen Teils dieser kurzen Zeit durchgeführt sein. Der elektrische Funke besorgt das heute mit seiner unvergleichlichen Flinkheit ohne allzu große Schwierigkeiten. Als aber die elektrischen Apparate noch nicht genügend ausgebildet waren, mußten zunächst mechanische Kunststücke vollbracht werden, bis man schließlich auch in dieser Vorstufe zu einer bewundernswerten Einfachheit gelangte.

Bei nichtelektrischer Zündung ist es stets notwendig, daß in der Nähe der Zündstelle ständig eine offene Gasflamme brennt, die aber die Zündung nicht unmittelbar besorgen darf, weil sie dabei sofort verlöschen würde. Otto verstand es, diese Schwierigkeit durch eine sehr sinnreiche Vorrichtung zu überwinden. Er brachte im Schieber eine Mulde an, die eine „Vermittlungsflamme" von der offenen Gasflamme im Kamin zum Zylinder weiterreichte. Die Zündung hat vorzüglich gearbeitet und war lange Zeit die einzige zuverlässige, die es gab.




579. Schnitt durch ein Mischventil
Ventilteller schwarz gezeichnet: Ventil offen; Ventilteller gestrichelt: Ventil geschlossen

Bald wurde aber eine außerordentliche Verbesserung erfunden. Es entstand die Glührohr-Zündung, die wiederum ein sehr merkwürdiges Gerät darstellt (Bild 574).

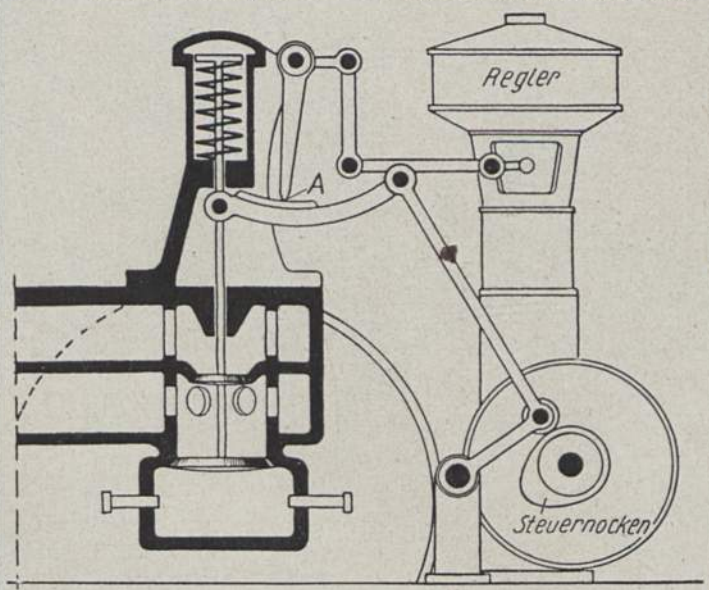
Am Zylinderkopf ist ein dickwandiges Röhrchen angebracht, das nur eine Öffnung nach innen besitzt. Es wurde zuerst aus Eisen hergestellt, später zeigte es sich, daß Porzellan geeigneter war. Vor dem Ende

des Röhrchens brennt eine Gasflamme, die seine Wandung glühend macht. Ein Schieber oder Hahn, der von der Steuerwelle bewegt wird, schließt das Röhrchen für gewöhnlich gegen den Zylinder ab. Am Ende des Verdichtungshubs wird das Abschlußorgan aufgezogen, das Gemisch dringt in das Röhrchen und entzündet sich an dessen heißen Wänden. Die Vereinfachung der Einrichtung ist verblüffend. Sie wurde aber noch weiter geführt.

Daimler, der ja damals in Deutz arbeitete, sah ein, daß die Steuerung des Glührohrs durch einen Schieber gar nicht notwendig ist. Von der letzten Verpuffung bleiben immer unverbrennliche Gase im Zylinder zurück. Diese füllen das Röhrchen, und erst wenn die Verdichtung ihre größte Höhe erreicht hat, werden sie so weit nach hinten gepreßt, daß frisches Gemisch die glühende Wandung erreicht. Selbst wenn dies ein wenig früher geschehen sollte, entsteht doch keine schädliche Frühzündung, da die Flamme nicht in den Zylinder hineinschlägt, solange noch Gemisch von diesem in das Röhrchen strömt. Erst wenn der Kolben nicht mehr drückt, entflammt sich die Masse des Gemischs.

Der Gedanke, ein ungesteuertes Glührohr für die Zündung anzuwenden, hat Daimler insbesondere die Möglichkeit gegeben, rasch laufende Motoren zu bauen. So konnte er im Jahre 1883 den ersten für den Betrieb eines Fahrzeugs wirklich geeigneten Gasmotor herstellen.

Aber auch die Glührohr-Zündung ist heute völlig veraltet. Sie wird vielleicht noch bei einigen kleinen ortfesten Maschinen angetroffen, sonst aber herrscht durchaus die Zündung mittels des elektrischen Funkens. Dieser springt im Zylinder entweder an einer Abreißvorrichtung oder an einer Zündkerze über.




580. Regelung der Gaszufuhr mit Hubhöheneinstellung durch Winkelhebel

Bei Maschinen mit verhältnismäßig geringer Drehzahl wird die Abreiß-Zündung verwendet. Es genügt hierfür Niederspannung. Der Strom kann einer Batterie von Elementen oder Akkumulatoren entnommen werden, meist aber wird zu seiner Erzeugung eine kleine magnet-elektrische Maschine benutzt, die weder Nachfüllung noch Ladung nötig hat.

Ein solches Maschinchen besteht aus einem Gewölbe hufeisenförmiger Stahlmagnete und darin drehbarem Anker, einem im Querschnitt Doppel-T-förmigen Eisenstück, um das Wicklungen aus isoliertem Draht gelegt sind. Wie bereits bei der Zündung für Kraftwagen-Motoren (Band II, Seite 90) erörtert wurde, entsteht ein Strom, wenn dieser Anker sich im Magnetfeld dreht. Ausreichend groß ist die Wirkung der Magnetmaschine aber nur, wenn der Anker sehr geschwind bewegt wird. Bei den immerhin recht gemächlich sich drehenden ortfesten Gasmaschinen würde der ständige Antrieb von der Steuerwelle aus eine sehr hohe Übersetzung erfordern. Man begnügt sich daher hier damit, die Magnetmaschine nur stoßweis in dem Augenblick laufen zu lassen, in dem sie gebraucht wird.

An der Steuerwelle befindet sich, wie bei Ottos Schiebersteuerung, eine kleine Kurbel mit Schubstange (Bild 575). Diese trägt einen Nocken, der bei jeder Umdrehung der Steuerwelle, also immer wieder, nachdem die Hauptwelle zwei Umdrehungen gemacht hat, auf einen Hebel am Magnetanker trifft und ihn ein Stück aus seiner Ruhelage mitnimmt. Hierbei wird durch ein Querhaupt eine Druckfeder gespannt. Sobald der Nocken von dem Hebel abgleitet, springt der Anker unter dem Druck der Feder sehr geschwind zurück, spannt die zweite Feder, wird hin und her geworfen und erzeugt hierbei den Zündstrom.

Damit aber das Gemisch entflammt werden kann, muß ein Teil seiner Bahn eine Luftstrecke sein, die er in Form eines Funkens überspringt. Der Ankerstromkreis wird deshalb durch zwei Metallstifte geschlossen, die in das Zylinderinnere, in den „schädlichen Raum", der vom Kolben nicht erreicht wird, hineinragen. Der eine dieser Stifte ist fest und isoliert durch den Zylinderdeckel hindurch geführt. Der andere kann sich drehen und liegt für gewöhnlich mit einer Nase dem ersten Stift auf. Das Eisen des Zylinders ist die eine Stromzuführung, eine besondere Drahtleitung die zweite Stromzuführung. Springt der Anker zurück, so fließt der hierbei erzeugte Strom durch Leitungsbahn und Stifte, aber beim Abschnappen des Ankerhebels stößt eine Stange gegen einen Vorsprung des drehbaren Kontaktstifts, so daß dessen Nase von dem anderen Stift geschwind entfernt wird. Bei diesem Abreißen wird der Zündfunke gezogen.

Das Dichten des drehbaren Stifts im Zylinderdeckel gegen den hohen Kompressionsdruck macht Schwierigkeiten, und andere Abreißvorrichtungen, die vollständig im Zylinderinneren liegen und vom Kolben bewegt werden, sind nicht zuverlässig. Weit vollkommener arbeitet die Zündkerze mit feststehenden Elektroden (Bild 576). Sie wird bei rasch laufenden Motoren heute immer angewendet, braucht aber für die Stromversorgung Hochspannung, weil der immer vorhandene Spalt zwischen den beiden Elektroden durch das verdichtete Gemisch hindurch nur bei hoher Voltzahl vom Strom überschlagen werden kann.

Die Magnetmaschine läuft jetzt ständig, sie bringt, da der Anker zwei Wicklungen trägt, hochgespannten Strom hervor. Der Bau der besonders von Robert Bosch in Stuttgart ausgezeichnet entwickelten elektrischen Kerzenzündung ist in Band II auf Seite 90 und den folgenden ausführlich erörtert. Bei der Einzylindermaschine fällt natürlich der Verteiler fort, der bei den stets mehrzylindrigen Kraftwagenmotoren notwendig ist, da sämtliche Kerzen von derselben Stromquelle bedient werden.

Die elektrische Zündung hat die sehr willkommene Wirkung gehabt, daß an der Gasmaschine keine offene Flamme mehr zu brennen braucht, die stets eine gewisse Gefahr bildete, da das Austreten von Gas aus einer Dichtungsstelle immer möglich ist. Wenn schwerer entzündliche Brennstoffe für den Betrieb der Maschine benutzt werden, als das Leuchtgas es ist, vermag allein die elektrische Zündung sicher zu arbeiten.

Die Regelung der Gasmaschine auf gleichbleibende Drehzahl bei wechselnder Belastung geschieht auf vier verschiedene

Arten: durch Aussetzer, Gemischveränderung, Füllungsänderung und Zündzeitpunkt-Verstellung.

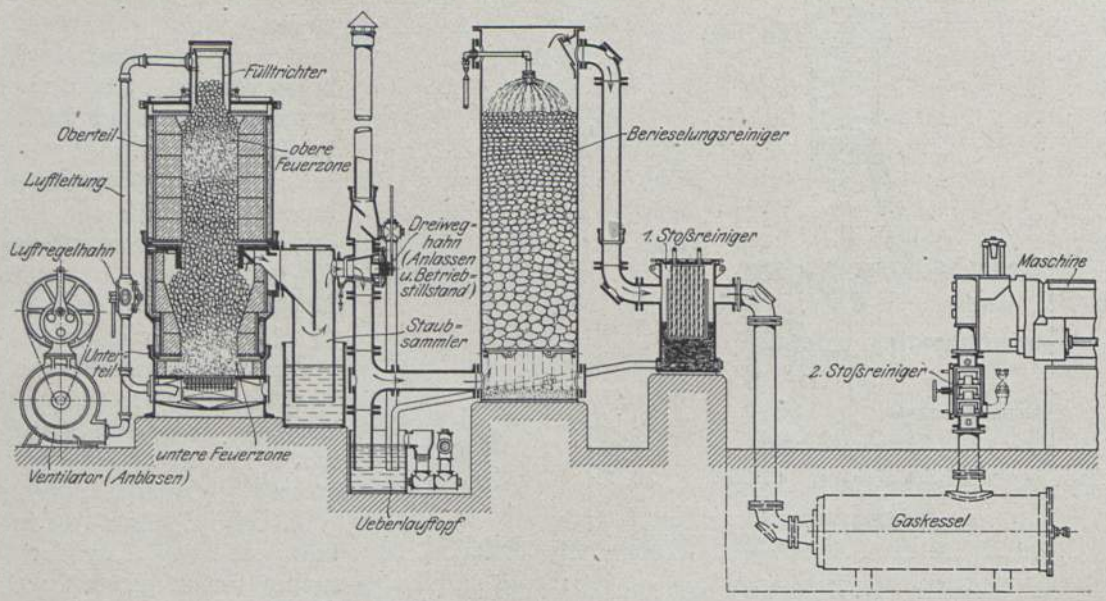
Gegenüber der Dampfmaschine besteht der grundsätzliche Unterschied, daß hier kein Kraftbehälter zur Verfügung ist, dem bei Überlastung ohne weiteres größere Kraftmengen entnommen werden können. Die Gasmaschine ist ja Selbstversorger, der von draußen nur Energiesaat erhält und sie erst selbst zum Aufkeimen und einem sehr plötzlichen Heranreifen bringt. Die Maschine muß daher, wenn der Regler nicht nur aufhaltend, sondern auch fördernd wirken soll, für gewöhnlich gedrosselt laufen, damit beim Auftreten einer Überlastung noch eine Reserve vorhanden ist.

Otto regelte seinen zweiten Motor durch Aussetzer. Wenn die Maschine zu rasch lief, die Kugeln des Reglers auf Bild 565 also sehr stark ausschwangen, dann wurde der wagerechte Arm des angeschlossenen Winkelhebels gehoben, das Ende des senkrechten Arms rückte nach links und verschob damit die Einlaßmuffe auf der Steuerwelle. Die Folge war, daß der Einlaßnocken auf dieser Muffe den Einlaßhebel verfehlte. Das Gasventil blieb während der Ansaugperiode geschlossen, die Maschine nahm durch den Schieber hindurch nur Luft. Beim dritten Takt konnte keine Zündung stattfinden, die Maschine erhielt keinen Energiestoß. Hierdurch lief sie dann nach einigen Umdrehungen langsamer.

Es war Vorsorge getroffen, daß bei normaler Belastung der Maschine, etwa bei jeder achten Umdrehung, von selbst ein Aussetzer eintrat, und daß diese Rückhaltung von Energiezufuhr aufhörte, wenn die Einlaßmuffe beim tiefsten Stand der Reglerkugel etwas nach rechts rückte. Auf diese Art konnte der Regler auch fördernd wirken.

Die Einrichtung war, wie alles an dem Otto-Motor, gut durchdacht und sicher wirkend, sie arbeitete auch sparsam, da die Rückhaltung der Maschine durch Gasersparnis herbeigeführt wurde. Der Ungleichförmigkeitsgrad war jedoch sehr groß. Es ließ sich nicht vermeiden, daß nach dem Ansteigen der Umlaufzahl stets mehrere Aussetzer nacheinander eintraten. Dann war nur jeder achte oder zwölfte Hub ein Krafthub, so daß die Geschwindigkeit erheblich sank. Das Schwungrad konnte nicht so schwer gemacht werden, um die erheblichen Energieschwankungen auszugleichen. Man findet deshalb die Aussetzer-Regulierung heute nur noch ausnahmsweis bei ganz kleinen Maschinen. Wo Regelmäßigkeit des Gangs Grundbedingung ist, wie beim Antrieb von Spinnereimaschinen oder Lichtdynamos, ist sie unmöglich.

Der nächste Schritt war, eine feinere Änderung der Energiezufuhr dadurch herbeizuführen, daß der Regler, wenn er infolge erhöhter Drehzahl in Tätigkeit trat, den Verpuffungsstoß nicht gleich ganz beseitigte, sondern nur seine Wirkung milderte. Hierzu war es nun nötig, an die Stelle des schmalen Einlaßnockens einen breiten, schrägen Nocken zu setzen (Bild 578). Läuft die Maschine sehr rasch, dann steht der Nocken unter dem Einfluß des Reglers so, daß seine niedrige rechte Seite den Gashebel aufschlägt. Das Gasventil hebt sich nur wenig, der Luft, die durch das Mischventil einströmt, gesellt sich nur eine geringe Gasmenge zu. Bei tief liegenden Reglerkugeln kommt die linke hohe Nockenseite zur Wirkung, das einströmende Gemisch wird sehr gasreich. Es ergeben sich hieraus allmähliche Übergänge, der Ungleichförmigkeitsgrad der Maschine könnte an sich gering sein.

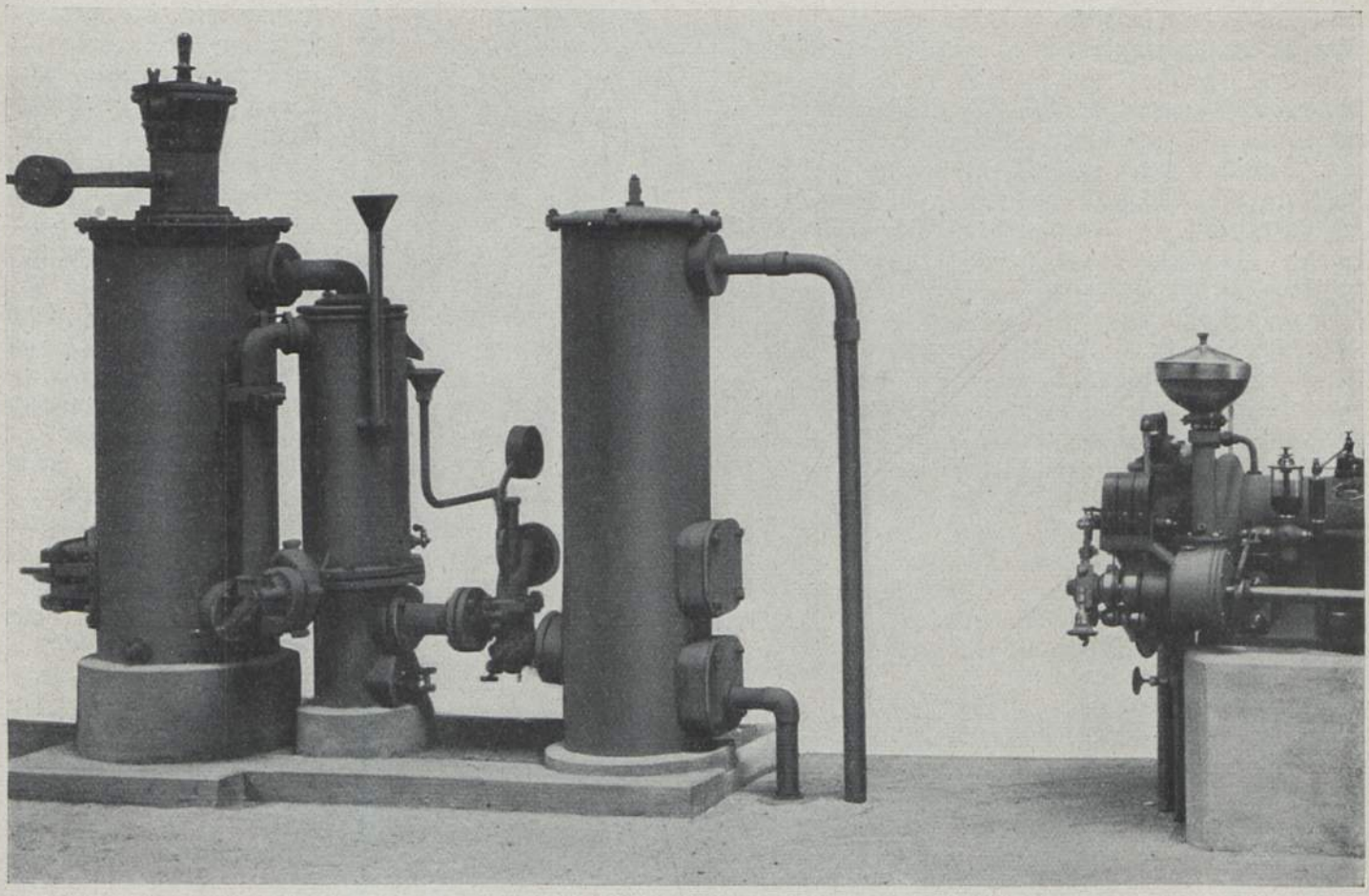



581. Doppelfeuer-Gaserzeugungsanlage für Braunkohlenbriketts
mit Zerlegung der Teere in der Feuerschicht. Aus Matschoß, Geschichte der Gasmotorenfabrik Deutz. VDI-Verlag, Berlin

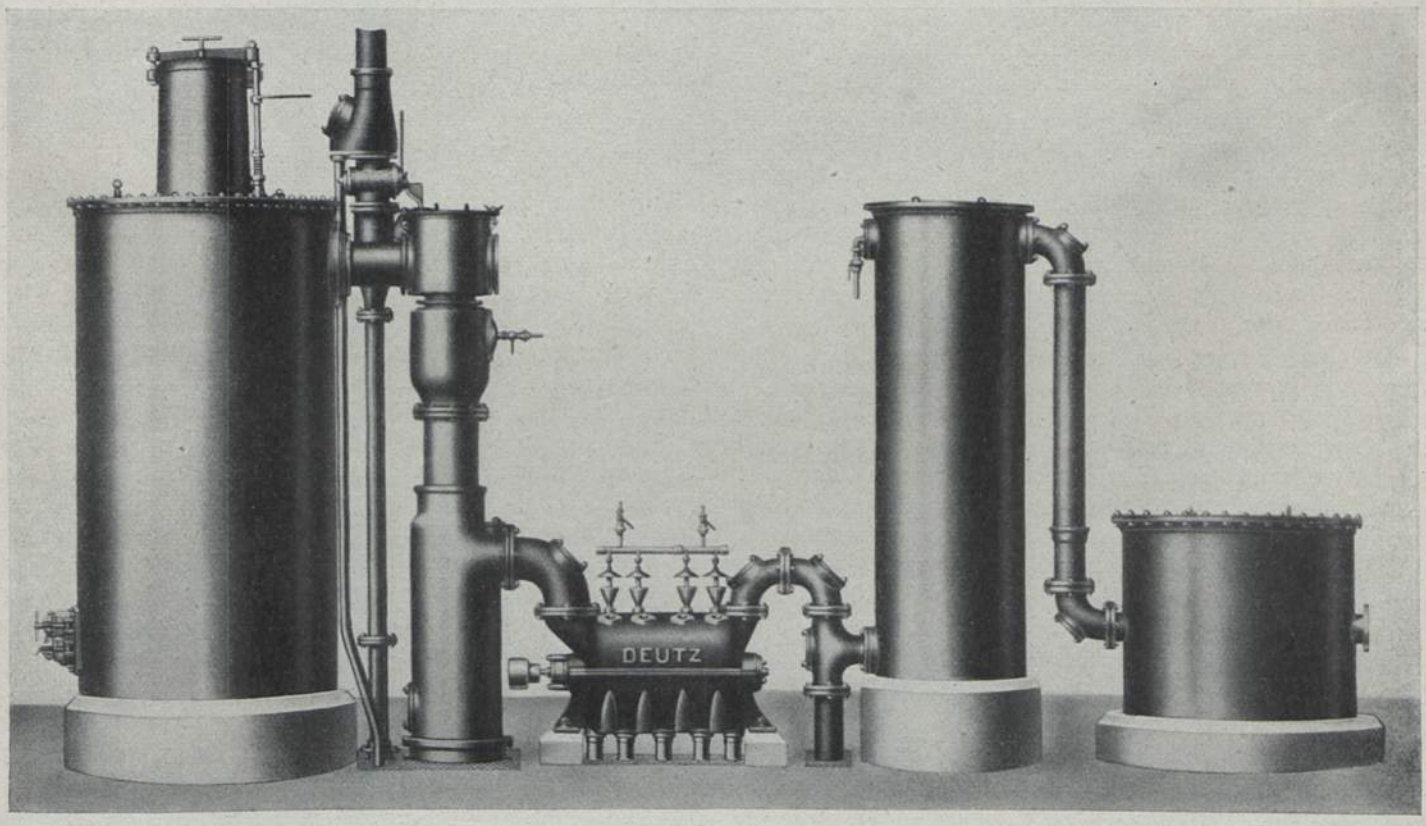
Diese Verbesserung tritt aber tatsächlich nur in bescheidenem Grad ein, da die Verpuffungskraft des Gemischs nicht nur entsprechend der verminderten Anreicherung mit Gas sinkt. Mit dem Verpuffungsdruck erniedrigt sich nach unserer Liste auf Seite 324 auch die Temperatur im Zylinder, die Wände werden kühler, die Zeitdauer der Verpuffung wächst, die Zündung wird immer träger, um bei zu starkem Überwiegen der Luftfüllung schließlich ganz zu versagen. Es geht dann unverbrauchtes Gas durch die Maschine, was unwirtschaftlich ist, und es wird schließlich doch wieder mit Aussetzern geregelt.

Weit günstiger arbeitet die jetzt allgemein übliche Veränderung des Füllungsgrads, die der bei Dampfmaschinen üblichen Regelungsart am nächsten kommt. Bei dieser Methode ist die prozentuale Zusammensetzung der Füllung aus Luft und Gas bei jeder Stellung des Reglers stets die gleiche. Es kommt immer auf fünf Raumteile Luft ein Raumteil Gas, die Maschine ist stets mit dem „stärksten Gemisch" versorgt, so daß die eingelassene Gasmenge dauernd bestens ausgenutzt wird.

Damit das Gemisch ständig gleiche Zusammensetzung hat, ist es notwendig, den Lufteinlaß mit demselben Organ zu steuern, das den Gaseinlaß bedient. Luftzulaß-Öffnung und Gaszulaß-Öffnung müssen gleichzeitig größeren oder geringeren Querschnitt erhalten. Dies kann zum Beispiel durch die Anwendungen eines selbsttätig mischenden Mischventils bewirkt werden, dessen Hubhöhe durch den Regler mittelbar beeinflußt wird. Ein solches Mischventil ist auf Bild 579 dargestellt. Der Ventilteller kann sowohl die Gasleitung



582a. Sauggas-Anlage
Gebr. Körting A.-G., Hannover-Linden




582b. Gaserzeugeranlage zur Herstellung von Motorengas aus Braunkohle
mit Reinigungs- und Kühlanlagen, bestehend aus Staubfänger, Teerabscheider, Skrubber und Trockner. Gasmotorenfabrik Deutz, Köln-Deutz

wie die Luftzufuhr freigeben. Wenn die Querschnitte ein für allemal so berechnet sind, daß die Mischung von Gas und Luft 1:5 ist, so bleibt dies Verhältnis bei jeder Hubhöhe des Mischventils aufrecht erhalten.

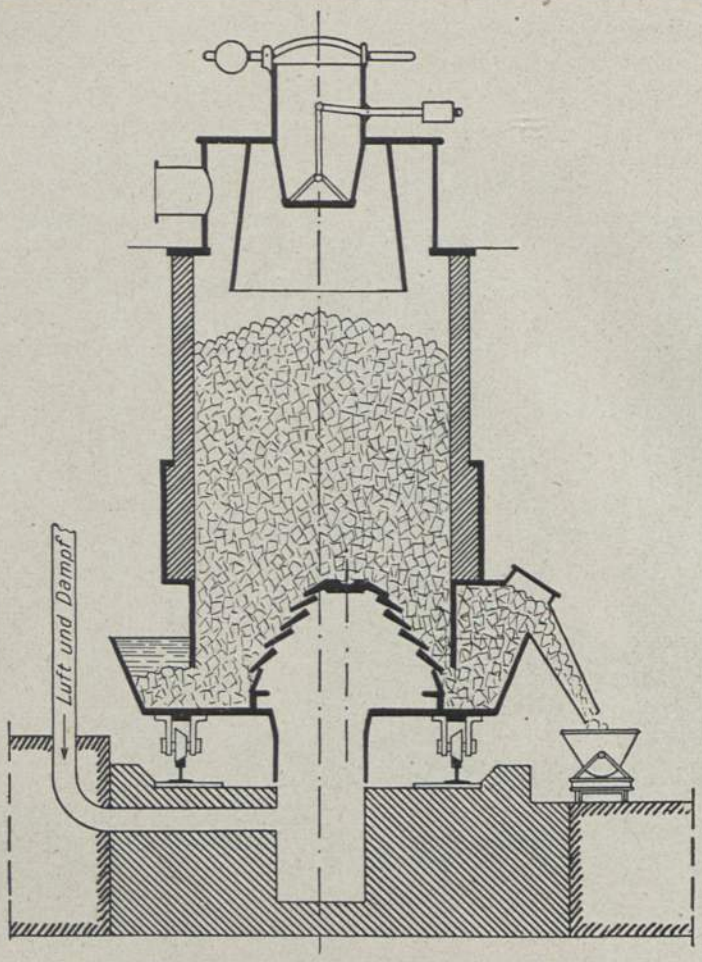
Diese ist abhängig von der Saugkraft des Zylindervakuums, das beim Saughub des Kolbens entsteht. Der Regler bestimmt, wie weit das Vakuum auf das Mischventil wirken und es aufziehen kann. Er tut das, indem er zum Beispiel eine Drosselklappe in dem Kanal zwischen Mischventil und Einlaßventil verstellt. Ist diese nur ein wenig geöffnet wie auf Bild 579, so hebt sich das Mischventil bloß um ein kurzes Stück, steht die Klappe wagerecht, so wird das Mischventil weit angehoben.

Das zwangläufig gesteuerte Einlaßventil arbeitet bei dieser Regelungsart immer gleichmäßig. Sorgt man aber dafür, daß seine Hubhöhe durch den Regler verändert werden kann, so tritt die gleiche Wirkung ohne Zwischenschaltung eines weiteren Drosselgeräts ein. Bei der Einrichtung nach Bild 580 verstellt der Regler den Drehpunkt A für den Hubhebel des Einlaßventils.

Regeln kann man die Gasmaschine endlich durch Verlegung des Zündzeitpunkts. Findet die Entflammung des Gemischs nicht im Totpunkt, sondern später statt, so hat die Verpuffung nicht Zeit, sich während des Kolbenhubs völlig auszuwirken. Das Gemisch wird auch erst entzündet, wenn es nicht mehr den höchsten Verdichtungsgrad besitzt, da der Kolben ja bereits den Rückweg angetreten hat, und der Höchstdruck trifft den Kolben, wenn er ohnedies bereits eine beträchtliche Geschwindigkeit erlangt hat.

Das Fehlen eines besonderen Kraftbehälters ist auch Ursache, daß die Gasmaschine nicht von selbst anzulaufen vermag. Mindestens zwei Takte müssen durchlaufen sein, damit ein Krafthub eintreten kann. Kleine Maschinen werden einfach am Schwungrad angedreht, wobei zur Verringerung des Verdichtungsdrucks das Auslaßventil ein wenig geöffnet gehalten werden kann. Will man die Gefahr vermeiden, die beim plötzlichen Anspringen der Maschine entsteht, während die Hände noch das Schwungrad gefaßt halten, wird auf die Hauptwelle eine Anwerfkurbel gesetzt, wie sie jeder vom Kraftwagen her kennt. Sobald die Maschine den selbständigen Lauf beginnt, rückt sich die Kurbel von selbst aus.

Für das Andrehen großer Maschinen genügt aber die Menschenkraft nicht mehr. Motoren, die eine höhere Leistung als zwölf Pferdestärken haben, können kaum noch von Hand in Tätigkeit gesetzt werden. Es wird alsdann Druckluft bereit gehalten, die durch ein besonderes Ventil in den Zylinder




583. Schnitt durch einen Generator mit Drehrost

strömen kann. Sie expandiert, stößt den Kolben vorwärts und entweicht dann durch den Auslaß gerade wie die Dampffüllung einer Dampfmaschine. Nach wenigen Umläufen geht der Gasmotor rasch genug, daß auf Gemisch umgeschaltet werden kann; dieses wird nun alsbald gezündet.

Das Druckluftgefäß kann durch eine Handpumpe gefüllt werden, bei größeren Maschinen benutzt man hierzu einen kleinen von der Maschine selbst angetriebenen Kompressor. Einzylinder-Motoren müssen vor dem Einlassen der Druckluft so gestellt werden, daß sich der Kolben in günstiger Lage befindet, also gerade den Saug- oder Verpuffungshub beginnen will. Hierzu bedient man sich einer Andreh-Vorrichtung, wie sie Bild 379 a u. b auf Seite 219 für die Dampfmaschine darstellt.

Besonders bequem kann eine Gasmaschine angelassen werden, die eine Dynamo-Maschine antreibt, falls eine Akkumulatoren-Batterie vorhanden ist. Der Strom der Elektrizitäts-Speicher wird alsdann in die Dynamo geleitet, so daß diese kurze Zeit als Motor läuft und nun der Gasmaschine das erweist, was diese während des Betriebes für den Stromerzeuger tut.

*

Wir haben bisher ausschließlich die Speisung der Gasmaschine mit Leuchtgas betrachtet. Vermöchte sie nur mit diesem Stoff zu arbeiten, so wäre ihre Anwendung auf die Orte beschränkt, in denen Gaswerke bestehen. Der verhältnismäßig so günstig arbeitende, bequeme Motor hätte nicht die Welt zu erobern vermocht, er könnte nicht jeglichem, im entlegensten Winkel liegenden Kleinbetrieb dienen und wäre auch nicht imstande, Land-, Luftfahrzeuge oder Schiffe anzutreiben, da diese ja nicht mit einer fest verlegten Leitung in Verbindung sein können. Es ist ein großes Glück für die Kraftmaschinentechnik, daß die Versorgung des Verpuffungsmotors auch mit einem Gas geschehen kann, das jeder Besitzer einer Maschine sich selbst zu erzeugen vermag, und daß ferner die Speisung mit Ölen verschiedenster Art möglich ist. In diesem Fall bedarf die Anlage überhaupt keines besonderen Gasbereiters. Nur hierdurch konnten der Kraftwagen, das lenkbare Luftschiff und das Flugzeug entstehen.

Leuchtgasmaschinen hätten, abgesehen von ihrer Bindung an die Städte, schon deshalb keine umfassende Anwendung finden können, weil sie zu teuer arbeiten. Das Leuchtgas ist kein billiger Betriebsstoff. Die Arbeit der Gaswerke zielt auf die Bereitung eines Stoffs, der besonders für die Ver-

sorgung von Lampen geeignet ist, während die Forderungen der Maschinen anders geartet sind. Die Unterhaltung des großen Rohrnetzes verursacht Kosten, die in den Verkaufspreis des Leuchtgases eingerechnet werden.

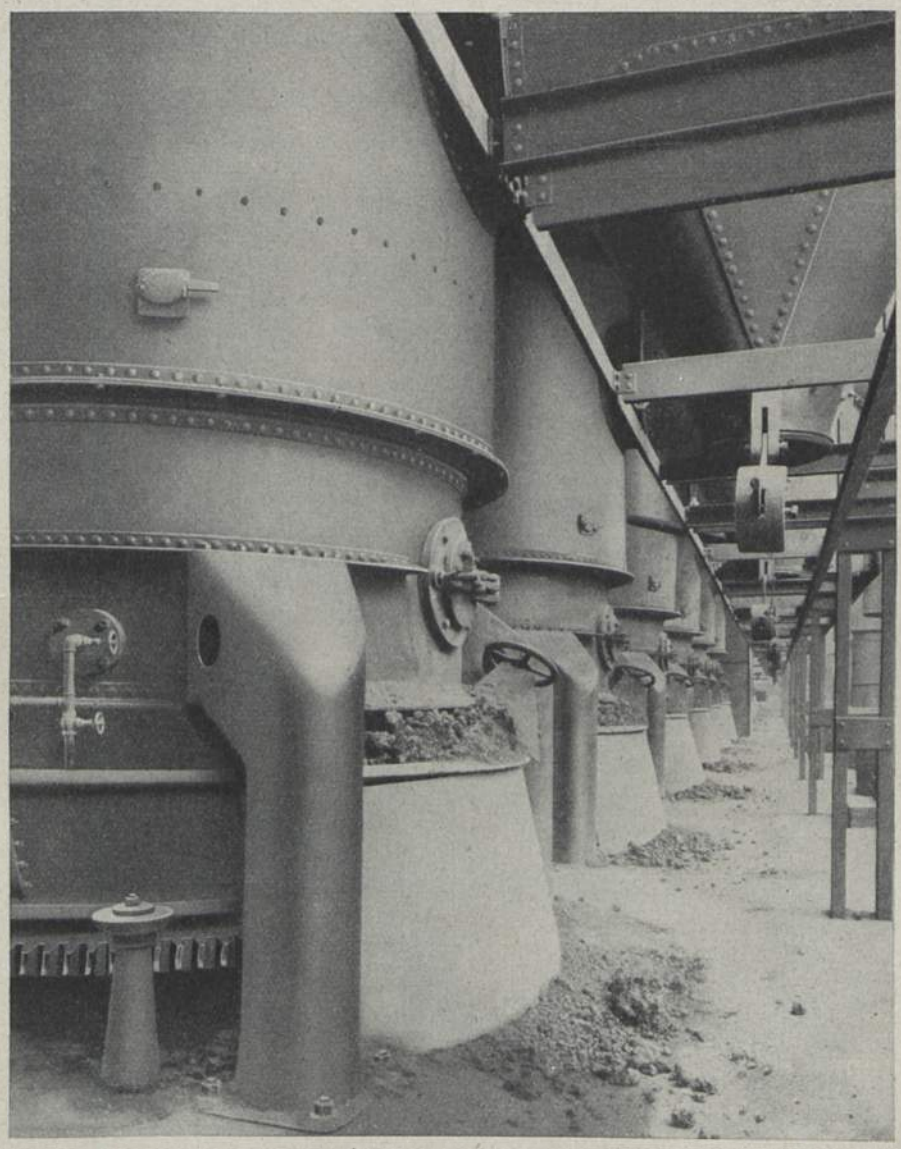
Dieses wird aus Steinkohle gewonnen, indem man sie unter Luftabschluß in Retorten, das sind große Gefäße aus feuerbeständigen Schamottsteinen, hoch erhitzt. Der Gasinhalt der Kohle wird hierbei ausgetrieben, und er kann nicht verbrennen, da der hierzu erforderliche Sauerstoff fehlt. Das aus den Retorten strömende Gas wird gereinigt, wobei sehr wertvolle Stoffe, insbesondere Teer und Ammoniak, gewonnen werden. In den Gefäßen bleibt der Koks, ein vorzüglicher Brennstoff, zurück. Das gereinigte Leuchtgas besteht in der Hauptsache aus Kohlewasserstoffen, Wasserstoff, Kohlenoxyd mit geringen Beimengungen von Sauerstoff und Stickstoff. Es ist weit besser zum Gebrauch in Brennern als in Maschinenzylindern geeignet.

Die Verpuffungsmotoren können auch mit Erdgas betrieben werden, wie es in Pennsylvanien, in der Nähe von Baku am Kaspischen Meer, in Neuengamme bei Hamburg und an vielen anderen Stellen dem Boden entströmt. Das ist eine Naturversorgung trefflichster Art, die aber auf bestimmte Gegenden beschränkt bleibt. In ähnlicher Weise ist die Speisung von Maschinen mit Gichtgas und Koksofengas an die Stellen gebunden, wo Hochöfen für Eisengewinnung betrieben werden. Wir kommen auf diese Art der Gaserzeugung, bei der ungeheure Mengen anfallen, noch zurück. Gichtgasmaschinen sind die größten Krafterzeuger der Gattung.

Der Engländer Dowson gab zuerst eine Methode der Gasbereitung an, die überall angewendet zu werden vermag, da hierfür nicht riesige Gaswerke, sondern nur kleine Apparate notwendig sind. Sie arbeiten mit hohem Nutzeffekt, das heißt, das in ihnen erzeugte Gas enthält einen sehr großen Teil des Heizwerts der Kohle. Der Betrieb ist daher billig.

Wir wissen bereits von der Besprechung der Dampfkesselfeuerung auf Seite 296 her, daß Kohle bei ungenügender Luftzufuhr zu Kohlenoxyd verbrennt. Während man bei jedem Ofen, und das ist ja auch eine Dampfkessel-Feuerung, die Entstehung von Kohlenoxyd zu vermeiden sucht, weil dieses Gas nur einen geringen Heizwert hat, führte Dowson in seinem Gaserzeuger diese Entwicklung absichtlich herbei.

In einem runden, senkrecht stehenden Füllofen, dessen eiserner Mantel mit Schamottsteinen ausgefüttert ist, wird Kohle in hoher Schicht aufgegeben und von unten her entzündet, während nur geringe Luftmengen eindringen können. Es entwickelt sich Kohlenoxyd als ein sehr heißes, leicht entzündliches Gas. Wegen dieser beiden Eigenschaften ist es ohne Zumengung für die Versorgung der Maschine nicht geeignet, weil es die Zylinderwände zu hoch erhitzen würde und sich nicht, ohne von selbst in Brand zu geraten, genügend weit verdichten ließe. Es hat ferner auch einen zu geringen Heizwert. Läßt man aber mit der Luft Wasserdampf unter den Rost des Gaserzeugers oder Generators eintreten, so spaltet sich das Wasser unter dem Einfluß der Hitze in seine beiden Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff. Der Wasserstoff mischt sich dem Kohlenoxyd bei, während der Sauerstoff bei der Unterhaltung des unvollkommenen Verbrennungsvorgangs zum größten Teil aufgebraucht wird. Es entsteht ein Mischgas, das ausreichenden Heizwert hat und sich erst bei höherer Temperatur von selbst entzündet, so daß es zur Verwendung im Zylinder einer Gasmaschine vorzüglich geeignet ist.



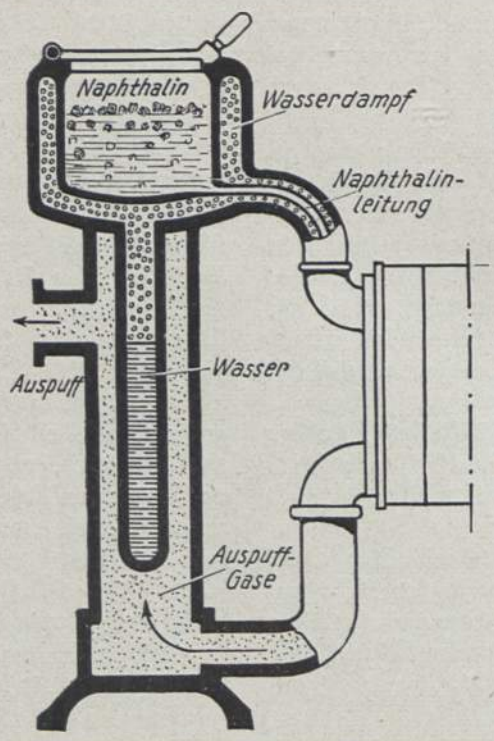
584. Drehrost-Generatoren für Steinkohlen
Thyssen & Co. A.-G., Mülheim (Ruhr)

Dowson brachte den Wasserdampf in den Generator, indem er einen kleinen Kessel aufstellte und in diesem Dampf mit einer Pressung von 4 bis 6 Atmosphären erzeugte. Damit war der Gasmaschine aber wieder ein Genosse beigesellt, dessen Fernbleiben gerade einen ihrer besonderen Vorzüge bildet. Ferner standen bei dieser Methode Generator, Leitungen und alle sonst noch eingeschalteten Apparate unter Druck, so daß bei der geringsten Undichtigkeit Kohlenoxyd in den Maschinenraum austreten konnte. Dieses Gas ist aber sehr

giftig und besonders gefährlich deshalb, weil es völlig geruchlos ist.

Dowson- oder Druckgasanlagen werden heute nicht mehr verwendet. Man ist unter enger Anlehnung an sein Verfahren zur Sauggasbereitung übergegangen. Eine hierfür geeignete Einrichtung, ein kleines Gaswerk für Motorspeisung, wie es überall ohne Schwierigkeit und ohne großen Platzbedarf aufgestellt werden kann, zeigt Bild 581 im Schnitt, Bild 582 a und b in der Ansicht.

Links steht der Füllofen oder Generator mit Eisenmantel und feuerfester Ausfütterung. Die hohe Kohleschicht ruht auf einem Rost, durch den die Asche in einen tiefer liegenden Raum hineinfallen kann. Nach der Entzündung brennt die Kohle ständig fort. Das Beschicken des Ofens, in dem die Schicht durch Abbrand allmählich niedriger wird, erfolgt von oben her durch einen Doppelverschluß. Der oberste Deckel wird geöffnet, Brennstoff in den Hohlraum getan, worauf man den Deckel wieder schließt. Alsdann wird eine darunter liegende Klappe geöffnet, und die Kohle stürzt nieder. Auf diese Weise wird verhütet, daß Gas aus dem Generator in die Außenluft abströmen kann.

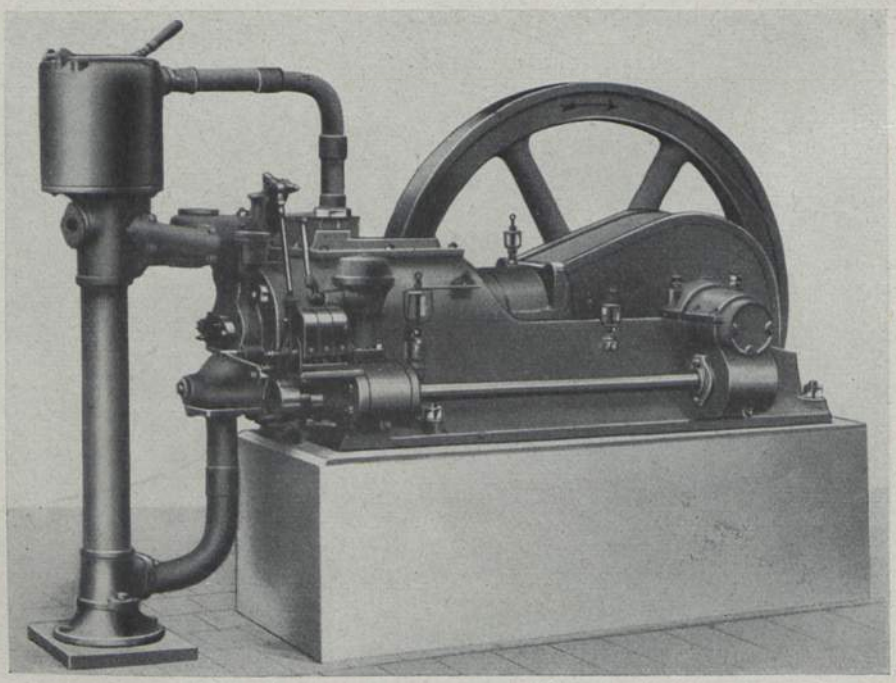



585. Schnitt durch einen Naphthalin-Behälter

In den unteren Ofenteil tropft Wasser, das rasch verdampft. Eine zusammenhängende Leitung führt vom Ofeninneren durch mehrere Apparate schließlich zum Maschinenzylinder.

Wenn das Einlaßventil geöffnet ist und der Kolben saugt, entsteht ein Unterdruck in der Leitung und dem Ofeninneren. Dadurch wird Luft hineingesaugt und, indem die genau bemessenen Mengen von Wasserdampf die glühende Kohle durchstreichen, das Mischgas erzeugt.

Die Maschine saugt es durch die Anlage. Es streicht durch das Kaminrohr, das uns im Augenblick noch nichts angeht, in den Unterteil des Wäschers, der auch mit einem englischen Wort skrubber (sprich skröbber) genannt wird. Hierin befinden sich Koksstücke, und von oben her strömt kaltes Wasser aus einer Brause nieder.



586. Gasmotor für Naphthalin
Gasmotorenfabrik Deutz, Köln-Deutz

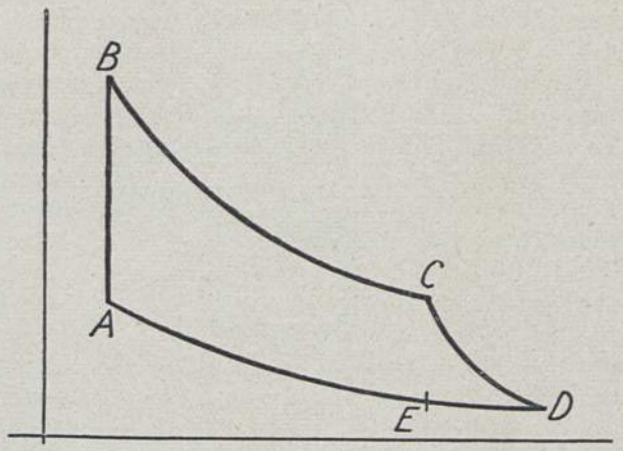
Im Wäscher wird das Gas von vielen Beimengungen befreit und gekühlt. Es geht nun weiter durch den Teerabscheider zu einem Sammelbehälter, und von diesem gelangt es durch einen letzten Feinregelungs-Apparat in den Zylinder der Maschine. Unmittelbar vorher wird die fünffache Luftmenge zwecks Bereitung des zündungstüchtigen Gemischs beigesellt.

Die Sauggas-Anlage hat viele Vorzüge gegenüber der Druckgas-Einrichtung. Zunächst fällt der Dampfkessel fort, dessen Aufstellung, wie wir wissen, behördlichen Beschränkungen unterliegt und an eine Genehmigung geknüpft ist. Der Dampfkesselbetrieb muß auch ständig überwacht werden, damit der Druck nicht zu hoch steigt und das Wasser niemals fehlt. Der Generator dagegen braucht nur in größeren Abständen gefüllt zu werden, worauf er ohne Wartung dauernd seine Pflicht erfüllt. Da der Druck in der Gesamtanlage niemals über die Atmosphäre hinaussteigt, meist bedeutend niedriger ist als der Druck der freien Luft, so ist ein Austreten giftiger Gase ausgeschlossen. Es wird auch die Menge des bereiteten Gases in jedem Augenblick dem Bedarf der Maschine angepaßt, da diese ja den Durchtritt von Luft und Wasserdampf durch den Generator mit ihrem Saugzug regelt. Der ganze Betrieb vollzieht sich mit hoher Wirtschaftlichkeit. Explosionsgefahr ist nicht vorhanden, so daß Sauggas-Generatoranlagen ohne besondere Genehmigung unter und über bewohnten Räumen aufgestellt werden können. Man verwendet sie auch auf Schiffen.

Freilich findet eine selbsttätige Gasbereitung nur dann statt, wenn die Maschine läuft und ihre Saugkraft wirkt. Für die Inbetriebsetzung ist deshalb links vom Generator ein kleines Gebläse angeordnet, das einen Sonderantrieb haben muß. Es bewirkt den Durchzug, solange die Maschine still steht. Wird diese angehalten, dann öffnet der Wärter einen Hahn am Kaminrohr, worauf das noch vorhandene Gas durch das Rohr ausströmt, das nach außen führt. Mit Hilfe des Gebläses kann der letzte Rest beseitigt werden.

Wenn keine besonderen Vorkehrungen getroffen sind, muß

der Generatorbetrieb nach einigen Stunden immer wieder stillgesetzt werden, damit die Schlacke abgezogen werden kann, die sich auf dem Rost ansammelt, und dem Luft-Dampf-Gemisch allmählich den Durchtritt verwehrt. Die Pausen lassen sich jedoch vermeiden, wenn ein Drehrost angewendet wird (Bild 583).




587. Diagramm der Oechelhäuser-Maschine

Der Ofenmantel ist jetzt freihängend ausgeführt. Sein Ende taucht in eine wassergefüllte Schale, wodurch der Luft der Zutritt von unten auch hier verwehrt wird. Auf dem Boden der Schale ruht der treppenförmige Rost, dessen Achse ein wenig gegen die Ofenachse verschoben ist. Der ganze Untersatz wird mit Hilfe eines Zahngetriebes langsam gedreht. Hierbei wird die Schlacke dauernd in die Wasserschale ausgemahlen, weil sie infolge der verschiedenen Achslagen des ruhenden und des bewegten Teils immerfort verschoben und zerbrochen wird. Sie stößt in der sich drehenden Schale gegen ein festes dort hineingesetztes Schlackenmesser, staut sich in die Höhe und wird selbsttätig über den Schalenrand hinausbefördert. Der Seitendruck, den der Rost durch das Andrücken der Schlackenmasse gegen die Ofenwand dort erleidet, wo seine Achse dieser am nächsten steht, wird durch eine seitliche Rollenführung aufgenommen, die ein Entgleisen des Drehteils unbedingt verhindert.

Bild 584 zeigt die Unterteile mehrerer großer Drehrostgeneratoren, wie sie in solchen Abmessungen zur Beheizung von Stahlöfen, nicht zum Maschinenbetrieb, verwendet werden. Mit Hilfe derart gebauter Vorrichtungen kann die Gaserzeugung ohne Unterbrechung stattfinden.

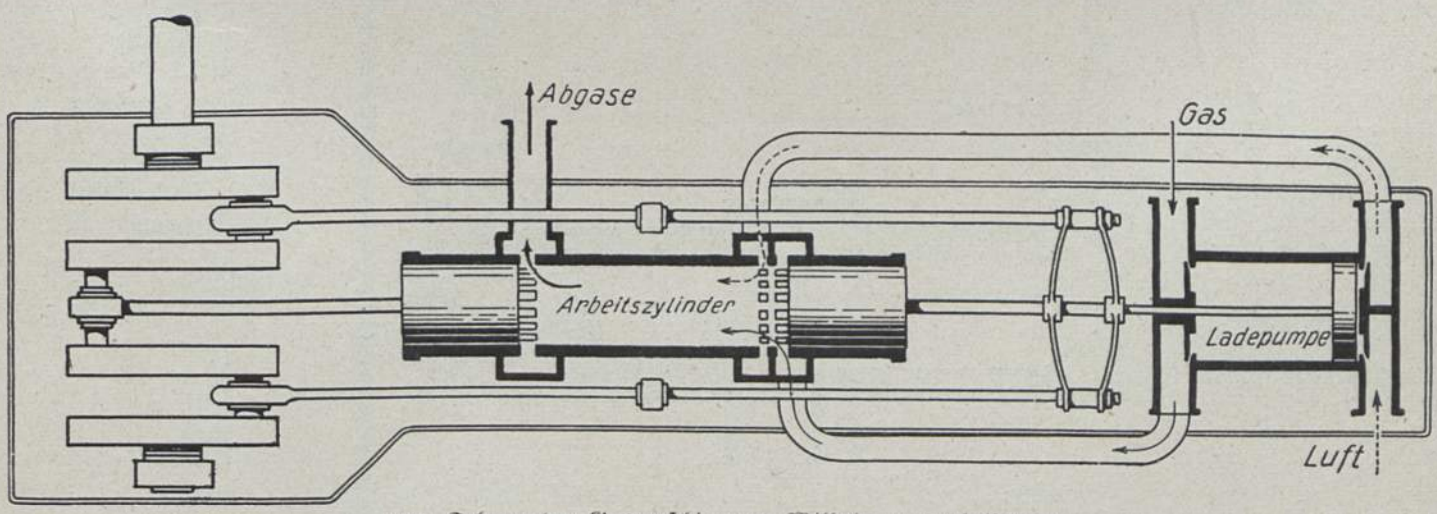
In früheren Jahrzehnten konnten in den Generatoren nur sehr hochwertige Brennstoffe, Anthrazit, das ist geologisch sehr alte, gasarme Kohle, und Koks verfeuert werden. Heute verbrennt man in den Füllöfen auch schlechtere Steinkohle, Braunkohle, Holzkohle, ja sogar Torf, wodurch der Wirkungsbereich der Anlagen sehr bedeutend erweitert, die Wirtschaftlichkeit des Gasmaschinenbetriebs erhöht ist. Viele Nebenanlagen sind notwendig, um bei der Beschickung des Generators mit minderwertigen Brennstoffen die sich reichlich entwickelnden Teerdämpfe von der Maschine fernzuhalten, damit die Ventile nicht fortwährend verschmutzen. Die Herstellung von Apparaten für die Reinigung von Generatorgasen ist heute ein Sondergebiet des Maschinenbaus.

*

Die Gasbereitung mittels Generator-Anlagen macht die Verpuffungsmaschine unabhängig von dem Anschluß an ein öffentliches Röhrennetz. Aber solch ein Gaserzeuger beansprucht doch Raum und will bedient sein, so daß bei seiner Anwendung ein gut Teil der Einfachheit verloren geht, die gerade für Kleinkraftmaschinen notwendig ist. Ein Kraftwagen oder ein Flugzeug, die zur Speisung ihres Antriebmotors eine Generator-Anlage mit auf die Landstraße oder in die Luft nehmen müßten, sind nicht gut denkbar. Sie brauchen eine andere, einfacher zu befördernde und ohne jede Bedienung ständig und leicht sprudelnde Gasquelle. Diese ist heute in den Ölen verschiedenster Art für sie und auch für die ortfesten Maschinen bereit.

Wenn ein Öl sehr fein zerstäubt und mit Luft vermengt wird, so entsteht wiederum ein brennbares Gemisch. Entzündet verpufft es unter Entwicklung starker Hitze, also hohen Drucks. Was hierbei im Zylinder der Maschine wirkt, ist nicht eigentlich ein Gas, sondern Luft, die mit äußerst fein verteilten Öltröpfchen angereichert und durch diesen Ölnebel sozusagen brennbar gemacht worden ist. Für die Praxis darf der Betriebsstoff aber als Gas angesehen werden, und dieselben Maschinen, die für die Versorgung mit Leucht- oder Generatorgas gebaut worden sind, können nach geringen Abänderungen auch mit Öl betrieben werden. Der Übergang von der einen Ölart auf die andere ist ebenfalls leicht, so daß die Möglichkeit gegeben ist, den Gasmotor je nach seinem Standort immer mit demjenigen Stoff zu speisen, der dort gerade den billigsten Betrieb gewährleistet.

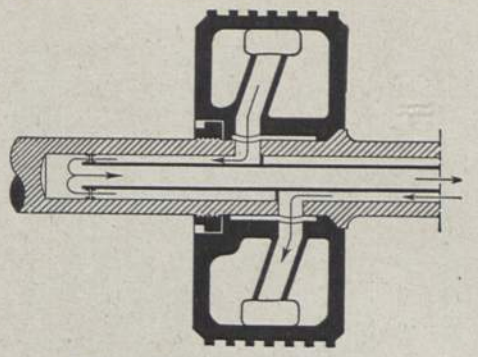
Vom Einlaßventil bis zum Auspuffventil, also im eigentlichen maschinellen Teil, ist der Ölmotor — vorläufig abgesehen von einer höchst bedeutsamen Sondergattung — grundsätzlich genau so gebaut wie die Gasmaschine. Aber an die Stelle des Gaswerks, das letzten Endes zu jedem Leuchtgas-




588. Schema der Gasmaschine von Wilhelm v. Oechelhäuser

motor gehört, oder des Generators tritt beim Ölmotor als Versorgungsanlage der Brennstoffbehälter mit dem Vergaser.

Das erste Gerät ist nichts weiter als ein Blechkasten, aus dem das Öl auf irgendeine Weise der Maschine zuströmt. Dies kann dadurch geschehen, daß der Behälter hoch aufgestellt und mit einem Fallrohr versehen ist, oder daß Preßluft über dem Flüssigkeitsspiegel in das Gefäß eingelassen wird. Die gleiche Druckarbeit vermögen auch die gespannten Abgase zu leisten, und wir haben in Band II auf Seite 84 gehört, daß es beim Kraftwagen vielfach die Abgase sind, die zur Brennstoffförderung dienen. Für die Inbetriebsetzung des Motors steht eine Handpumpe zur Verfügung.



589. Kühlung des Kolbens bei der Körting-Maschine

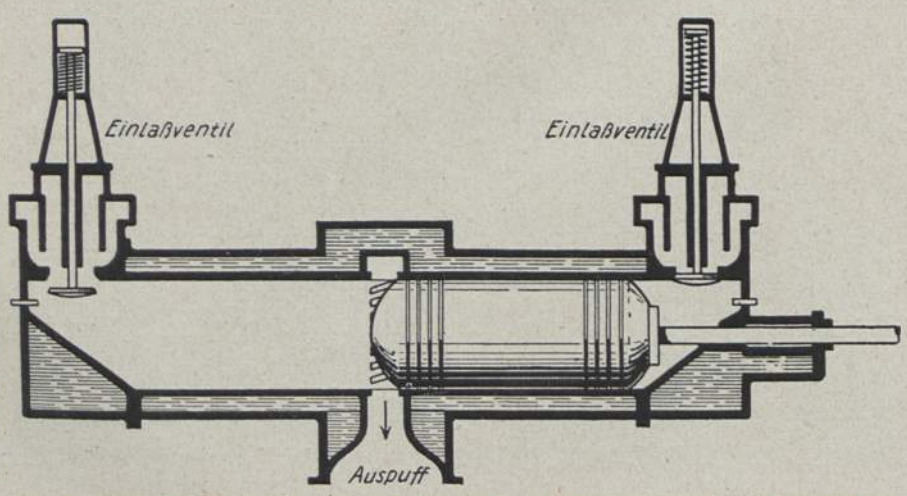
Der Vergaser, der richtiger Zerstäuber genannt werden müßte, dient dazu, die für jeden Saughub der Maschine nötige Brennstoffmenge abzusondern und sie alsdann, zu einem Nebel aufgelöst, in den Zylinder zu schicken. Das Befördern in den Zylinder besorgt die gleichzeitig einströmende Luft, mit der sich die feinen Öltröpfchen zum verpuffbaren Gemisch vereinigen. Beispiele für die Bauart solcher Vergaser sind in Band II auf Tafel VI angegeben.

Die Fähigkeit, flüssige Brennstoffe benutzen zu können, gibt der Verpuffungsmaschine schon an sich, das heißt abgesehen von dem wärmetheoretisch günstiger verlaufenden Arbeitsprozeß, eine Überlegenheit über die Dampfmaschine. Denn die flüssigen Brennstoffe haben einen höheren Heizwert als die festen. Bei gleicher Gewichtmenge kann aus ihnen sehr viel mehr Wärme entbunden werden, sie sind weit leichter zu befördern und aufzubewahren. Betriebsstoffe für Verpuffungs-Ölmaschinen sind heute hauptsächlich Benzin, Benzol und Spiritus.

Das Benzin wird aus dem Rohöl oder Erdöl gewonnen, das auch Naphtha genannt wird. Es ist dies eine meist dunkelgrüne, ziemlich dickflüssige Masse, die hauptsächlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff besteht. Bedeutende Fundstätten für das Rohöl befinden sich in den Vereinigten Staaten, Mexiko, Kanada, Baku am Kaspischen Meer, in Galizien und in Rumänien. Auch Deutschland besitzt vereinzelt, so bei Celle und Wietze in der Provinz Hannover, Ölquellen, deren Ergiebigkeit jedoch nicht im entferntesten mit dem Reichtum der Lager in den anderen genannten Ländern verglichen werden kann. Die Vereinigten Staaten bringen von der Welterzeugung, die rund 100 Millionen Tonnen jährlich beträgt, allein etwa 65 Millionen Tonnen hervor. Deutschland, das durch den Friedensvertrag von Versailles das elsässische Ölgebiet bei Pechelbronn an Frankreich verloren hat, fördert nur wenig mehr als 100 000 Tonnen im Jahr. Man gewinnt das Erdöl durch Niedertreiben von Bohrlöchern bis zur führenden Schicht, aus der es oft infolge auflastenden Gasdrucks in gewaltigen Mengen von selbst emporsprudelt. Wo das nicht der Fall ist, wird das Öl durch die eisernen Rohre oder Sonden heraufgepumpt. Die geologische Wissenschaft nimmt heute an, daß das Erdöl zum größten Teil ein Zersetzungsprodukt tierischer Körperstoffe ist, ähnlich wie die Kohle aus Pflanzen entstanden ist. Seine Entstehung wird so gedacht, daß Meeresbuchten mit einem reichen Tierleben durch geologische Hebungen und Senkungen vom übrigen Meere abgeschlossen wurden, so daß die eingeschlossenen Tiere allmählich zugrunde gehen mußten. Wurde dann eine solche Massenanhäufung von Tierleichen mit Sand oder Ton bedeckt und dadurch von der Luft abgeschlossen, so mußte eine Zersetzung eintreten, als deren Ergebnis schließlich Erdöl entstand. Es ist gelungen, durch Versuche die Möglichkeit der Entstehung des Erdöls auf diese Art nachzuweisen. Das Erdöl oder Naphtha enthält eine Reihe verschiedener Stoffe, die durch Destillation voneinander getrennt werden können.

Das lateinische Wort destillare bedeutet hinab- oder hineinträufeln. Das nach ihm benannte Trennungsverfahren beruht darauf, daß der Grundstoff in einem Gefäß bei allmählich steigender Temperatur zum Verdampfen gebracht wird. Hierbei werden die am leichtesten flüchtigen Bestandteile, deren Verdampfungstemperatur am niedrigsten liegt, zuerst in den gasförmigen Zustand übergeführt. Sie strömen durch eine Öffnung im Oberteil des Gefäßes in ein anderes hinüber, das gekühlt wird, und schlagen sich dort von neuem als Flüssigkeit nieder; sie träufeln hinein. Vor jeder Steigerung in der Beheizung der Destillations-Blase wird das gekühlte Aufnahmegefäß gewechselt, so daß man die verschiedenartigen Flüssigkeiten gesondert erhält.

Wenn Rohöl dem Destillations-Prozeß unterworfen wird, so geht zunächst der leichteste Bestandteil, das Benzin, über. Es verdampft bereits bei 90 bis 150 Grad. Die nächste Flüssigkeit, die übergeht, und zwar bei einer Temperatur von 150 bis 300 Grad, ist das Leucht- oder Lampen-Petroleum. Darüber hinaus werden die Schweröle gewonnen, Solaröle oder Gasöle, die so heißen, weil sie auch zur Erzeugung eines Gases dienen, das dem Leuchtgas beigemengt wird. Es folgen die ausgezeichneten Zylinder-Schmieröle, als Mineralöle bezeichnet, das salbenartige Vaselin, und schließlich bleiben als Rückstände Masut, Paraffin und Goudron übrig.




590. Schnitt durch den Zylinder einer Zweitakt-Gasmaschine der Gebr. Körting A.-G., Hannover-Linden

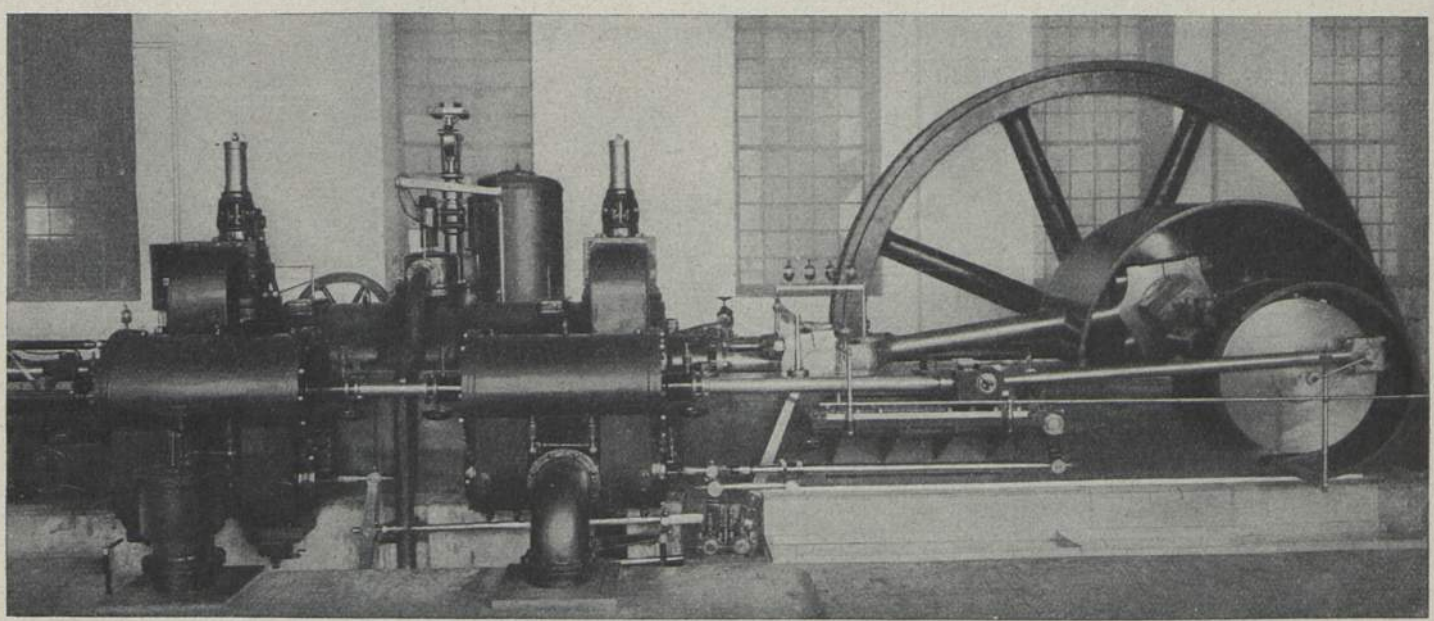
Von allen diesen Stoffen kommt für uns hier nur das

Benzin in Betracht. Wir werden aber später hören, daß die Ölmaschine bei Anwendung eines besonderen Verfahrens auch sehr viele andere Destillationsprodukte des Naphthas verwenden kann.

Benzin verdunstet schon bei gewöhnlicher Temperatur von selbst. Dieses Leichtöl ist deshalb besonders gut zur Erzeugung eines brennbaren Gemischs geeignet. Es hat einen sehr hohen Heizwert und gestattet die Anwendung einfacher Vergaser. Der einzige Fehler, der dem Benzin bei seiner Verwendung in Deutschland anhaftet, ist sein Ursprung aus einem Stoff, der in unseren Grenzen nur in ganz unbeträchtlichen Mengen gewonnen werden kann. Müßten wir unsere Kraftfahrzeuge zu Land, zu Wasser und in der Luft unumgänglich mit Benzin betreiben, so wären uns durch die Geldabgabe an das Ausland schwere Fesseln auferlegt. Es steht aber ein Ersatzstoff zur Verfügung, der ein wirklicher Ersatz, also nicht in dem neuen, während des Kriegs geborenen Sinn dieses Worts, ist. Schon im Namen hat er große Ähnlichkeit mit dem Rohölflüchtling: er heißt Benzol.

wirtschaftliche Betriebe häufig Branntwein-Brennereien besitzen, so war der Wunsch der Fabriken, Gasmotoren auch auf dem flachen Land einzuführen, Hauptantrieb für die Herstellung von Spiritus-Maschinen. Ihre Zylinderabmessungen fallen etwas größer aus, da dieser Betriebsstoff nicht so heizkräftig ist wie Benzin oder Benzol; es mußten auch andere Vergaser konstruiert werden. Sonst aber arbeiten Spiritus-Motoren durchaus zuverlässig, und sie haben den Vorzug, daß die Abgase völlig geruchlos sind. Es ist deshalb bedauerlich, daß dieser Brennstoff wegen seines hohen Verkaufspreises für Kraftwagen im allgemeinen nicht verwendet werden kann.

In neuerer Zeit ist es gelungen, ein weiteres Produkt des Steinkohlenteers für die Versorgung von Verpuffungsmaschinen fähig zu machen. Es fällt aus dem Steinkohlenteeröl in sehr viel größeren Mengen an als das Benzol und ist deshalb billiger. Das Naphthalin, wie das Benzin und das Benzol ein Kohlenwasserstoff, konnte früher nur aus



591. Doppeltwirkende Zweitakt-Gasmaschine
der Gebr. Körting A.-G., Hannover-Linden

Auch der Grundstoff für diese wasserhelle Flüssigkeit wird dem Boden entnommen. Das Benzol entsteht, wenn Steinkohle im Koksofen unter Luftabschluß entgast wird und hierbei das Teeröl liefert. Bei dessen Destillation ist Benzol derjenige Stoff, der am leichtesten übergeht. Diese Flüssigkeit ist ein wenig schwerer flüchtig als Benzin und hat einen etwas geringeren Heizwert. Aber die Vergaser der Motoren arbeiten nach einer einfachen Neueinstellung mit dem einen Öl gerade so gut wie mit dem anderen. Nun besitzt Deutschland trotz des Verlustes der Saargruben und eines Teils von Oberschlesien immer noch sehr viel Steinkohlen. Die Koksbereitung erfolgt im kleinen in den Gaswerken, in sehr großem Maßstab in den Hüttenbetrieben ohnedies, so daß Benzol als ein ausgezeichneter Inland-Brennstoff für Ölmaschinen in großer Menge zur Verfügung ist. In allerneuester Zeit gelang es Bergius und Fischer, Kohle zu verflüssigen und hierbei durch Destillation die gleichen Stoffe wie aus dem Erdöl zu gewinnen.

Spiritus wird aus Kartoffeln oder Getreide durch Gärung des darin enthaltenen Traubenzuckers erzeugt. Da land-

Rohöl oder Naphtha gewonnen werden. Daher stammt sein Name. Das Steinkohlenteeröl und auch das Braunkohlenteeröl sind aber heute weit wirtschaftlichere Quellen. Für die Verwendung in der Ölmaschine muß das Naphthalin, das bekanntlich auch als Desinfektions- und Konservierungsmittel verwendet wird, erst flüssig gemacht, niedergeschmolzen werden. Denn es scheidet sich als fester Körper ab.

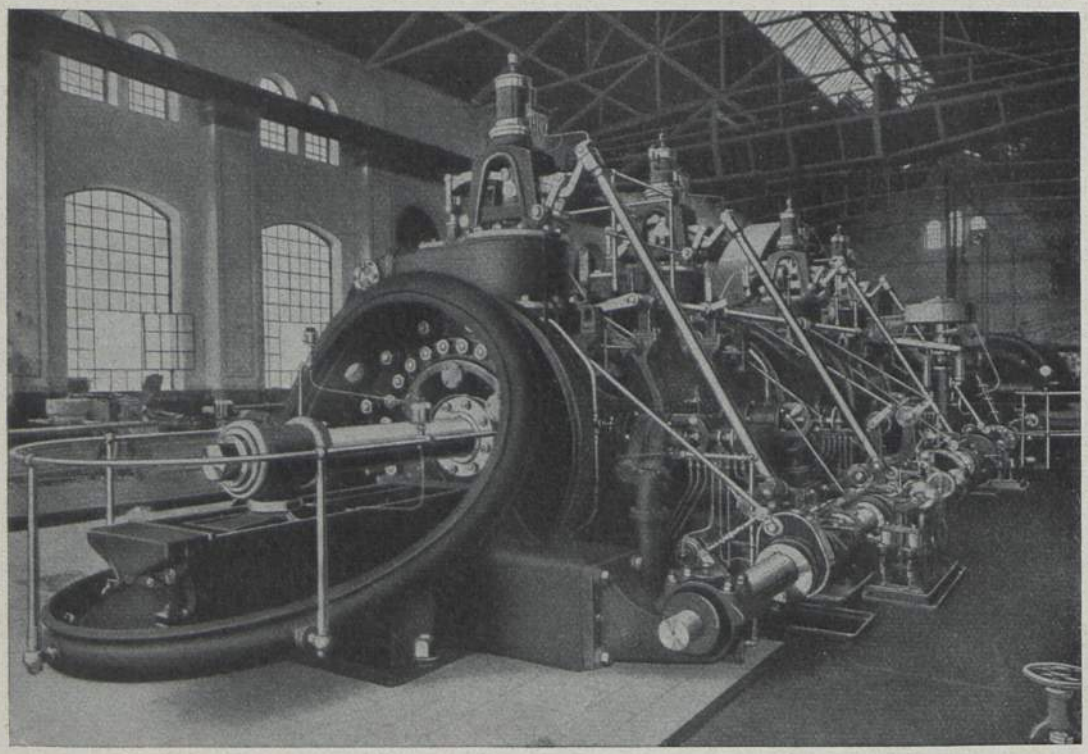
Das Schmelzen geschieht in einem Zusatzgefäß (Bild 585), das an der Maschine angebracht wird. Der Motor (Bild 586) muß mit Benzin, Benzol oder einem anderen flüssigen Brennstoff in Betrieb gesetzt werden. Die heißen Auspuffgase gelangen alsdann in das Naphthalin-Gefäß, wo sie ein Rohr umspülen und das darin enthaltene Wasser rasch zum Kochen bringen. Es bildet sich Dampf im Oberteil des Gefäßes um den Behälter, in dem Naphthalin in kleinen Brocken liegt. Diese schmelzen und die so erhaltene Flüssigkeit strömt durch ein gleichfalls von Dampf eingehülltes Rohr zum Vergaser, von wo es, mit der Ansaugeluft fein vermischt, in den Zylinder gelangt.

Der Naphthalin-Behälter muß alle zwei bis drei Stunden neu gefüllt werden, und die auf dem Boden des Behälters

liegenbleibenden Rückstände sind von Zeit zu Zeit zu entfernen. Diese geringe Zusatzarbeit wird durch die Wohlfeilheit des Betriebsstoffs reichlich gelohnt.

*

Wenn man noch vor vier Jahrzehnten nachts durch das rheinisch-westfälische Industriegebiet fuhr, dann sah man allerorten gewaltige Fackeln lohen. Ungeheure Brände schlugen zum Himmel empor und verkündeten auf eine Art, die jedes Malerauge entzücken mußte, daß das Großgewerbe keinen Augenblick Zeit hatte, müde zu sein. Aber auch hier stand, wie immer, die Stärke des künstlerischen Eindrucks in schroffem Gegensatz zu der Güte des technischen Vorgangs, der ihn hervorbrachte. Die prächtig lodernden Fackeln leckten



592. Doppelt-Viertakt-Gasmaschine in Tandem-Anordnung
Leistung: 2000 Pferdestärken. Gasmotorenfabrik Deutz, Köln-Deutz

mit ihren Zungen Kraft hinweg, sie strahlten auf Kosten des National-Eigentums. Diese festliche Nachtbeleuchtung des Industriegebiets war sehr teuer.

Man ließ damals die Gase, die aus den Kronen der Hochöfen, den Gichten, strömten, frei verbrennen. Sie schlugen aus breiten Öffnungen hinaus, nichts hinderte die Abgänge der großen Roheisenbereiter am Entweichen. Als aber das wirtschaftliche Fühlen der Ingenieure immer stärker wurde, schien es schließlich unumgänglich, der hier stattfindenden Kraftvergeudung ein Ende zu machen. Es wurden Gichtverschlüsse angebracht und die Hochofengase unter Dampfkessel geleitet, wo sie zur Feuerung dienten.

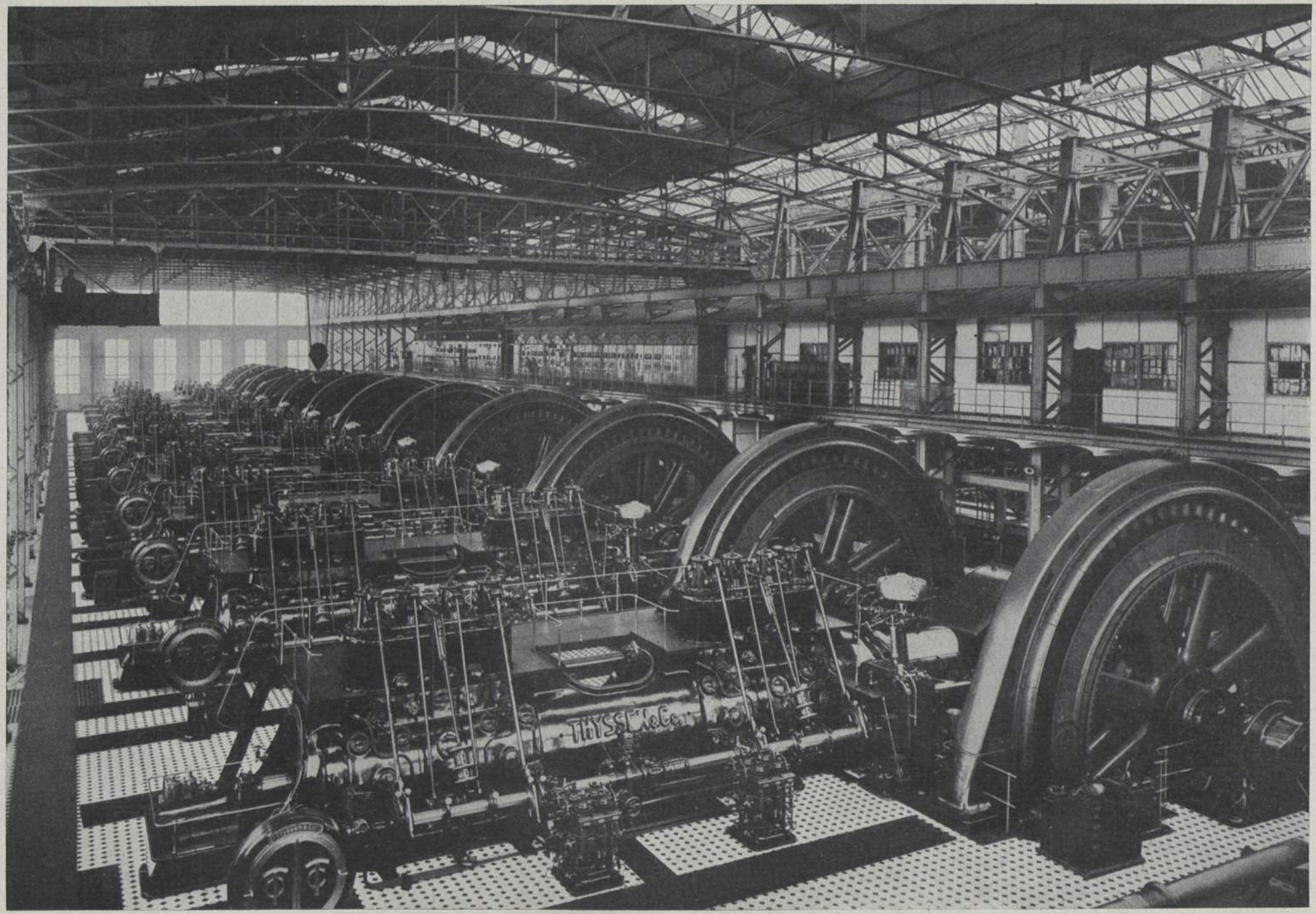
Das war bereits ein Fortschritt, aber doch kein großer, da die Hüttenwerke ja billigen Koks zur Dampfkesselheizung in größten Mengen zur Verfügung haben, so daß die sehr beträchtlichen Ausgaben für das Auffaugen und die Fortleitung der Gichtgase sowie die Erschwerung der Hochofenbeschickung durch die Gichtverschlüsse nicht immer gerechtfertigt waren. Ein durchschlagender Erfolg wurde erst erzielt, als man auf einen Vorschlag des ausgezeichneten deutschen Hütten-Ingenieurs Lürmann daran ging, die Gichtgase zur Speisung von Verpuffungsmotoren zu verwenden. Die unmittelbare Ausnutzung der Gase in den Zylindern ist fast dreimal so günstig, als wenn sie unter Dampfkesseln verbrennen. Die Kraftgewinnung in Hüttenbetrieben wurde nun billiger und einfacher zugleich.

Die für Gichtgasmaschinen zur Verfügung stehenden Kraftmengen sind sehr groß. Ein Hochofen mittlerer Größe liefert in 24 Stunden rund 150 Tonnen = 150 000 Kilogramm Roheisen. Bei der Erzeugung jeder Tonne fallen 4000 Kubikmeter Gichtgase an, während eines Tags also 600 000 Kubikmeter. Die Hälfte davon wird zur Erwärmung der Einblaseluft für den Hochofen (Wind-Erhitzung) und für andere Zwecke unmittelbar aufgebraucht. Im Zylinder der Maschine kann aus 3 Kubikmetern Gichtgas eine Pferdestärke für die Dauer einer Stunde bereitet werden. Ein einziger, noch nicht einmal sehr großer Hochofen stellt also $\frac{300\,000}{3 \cdot 24}$ das sind rund 4000 Pferdestärken dauernd zur Verfügung.

Die Hüttenwerke brauchen große Kraftmengen zum Betrieb von Gebläsemaschinen, für Walzenstraßen, Krane, Förderbahnen und zur Bereitung elektrischen Stroms. Soweit sie die Energie aber nicht selbst verwenden, können sie diese nach außen abgeben. Es sind große Überlandwerke entstanden, deren kraftliefernde Mittelpunkte Hüttenbetriebe sind. Allein durch die Ausnutzung der Gichtgase in Maschinen sind auf solche Art in Deutschland im Jahre 1913 60 Millionen Mark erspart worden.

Die Hergänge bei der Eisenverhüttung zwingen aber noch ein zweites Mal zur Gasbereitung in sehr großem Umfang. Damit die Eisenerze in dem Hochofen niedergeschmolzen werden können, müssen sie zusammen mit Koks eingebracht werden. Jede Hütte besitzt also auch große Koksofen-Anlagen, Retorten von grundsätzlich derselben Art, wie sie in den Gaswerken gebraucht werden. Das ausgetriebene Gas hat aber hier eine andere Zusammensetzung als dort, weil geologisch ältere, gasärmere Kohle benutzt wird. Das Ziel ist in den Gaswerken ja die Leuchtgas-, hier aber die Koksgewinnung. Trotzdem liefern die Öfen immer noch sehr bedeutende Gasmengen, aus denen das Teeröl abgeschieden wird, während der Rest gleichfalls in Maschinen-Zylindern verbrannt werden kann. Die Gichtgasmengen überwiegen jedoch.

Das den Hochöfen entströmende Gas besteht aus Kohlenoxyd, Kohlensäure und Stickstoff. Das Gemisch ist zwar recht arm, aber doch brennbar. Damit es ergiebig wirken kann, muß es im Zylinder sehr stark, bis auf 11 oder 12 Atmosphären, verdichtet werden. Alsdann verpufft es bei elektrischer



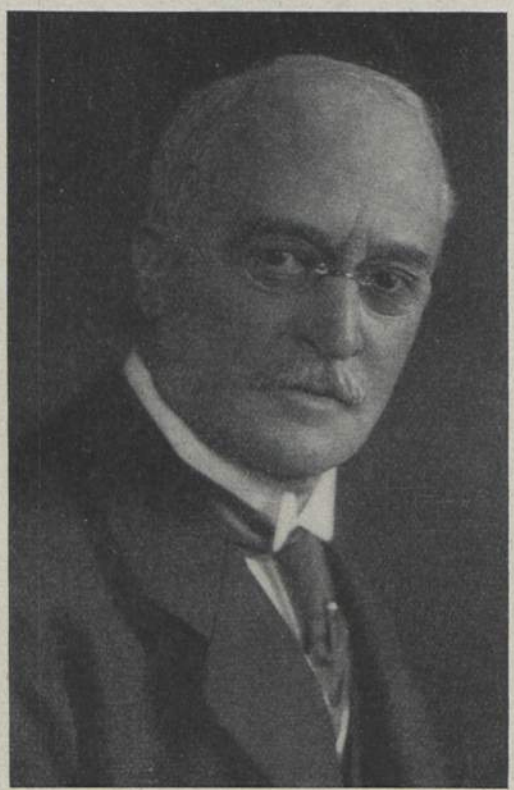
593. Alte Kraftzentrale der August-Thyssen-Hütte in Bruchhausen
mit 12 Doppelt-Viertakt-Gasmaschinen in Tandem-Anordnung. Leistung: 32 000 Pferdestärken

Entzündung durchaus sicher. Ferner ist es notwendig, vorher die sehr bedeutenden Staubmengen zu entfernen, welche die Gase aus dem Hochofen mitreißen, weil diese sonst die Ventile und das Zylinderinnere verschmutzen würden. Die Reinigung geschieht in Gefäßen, in denen der Gasstrom oft die Richtung wechseln, also seine Geschwindigkeit verlangsamen muß, wobei ein Teil des Staubs zu Boden sinkt, oder auf nassem Weg beim Durchgang durch Rieseler.

Mit der Verwendung der Gichtgase begann ein neues Zeitalter für die Gasmaschine. War sie bisher nur Kraftspender für kleine und mittlere Betriebe gewesen, so mußte sie nun zum Riesen erstarken. Die Hütten mit ihren gewaltigen Energieforderungen brauchten bedeutende Kraftmengen, die in großen Einheiten zusammengeballt sein mußten.

Verbundwirkung, das heißt stufenweises Arbeiten desselben Kraftmittels in mehreren Gefäßen (Seite 241), gibt es bei der Gasmaschine nicht. Deshalb mußte man zunächst danach streben, größere Arbeitsmengen in Einem Zylinder hervorzubringen. Wo besonders hohe Leistungen verlangt werden, läßt man dann mehrere voneinander unabhängige Zylinder auf eine gemeinsame Kurbelwelle arbeiten.

Steigerung der Kraftwirkung des einzelnen Zylinders hätte an sich durch einfache Vergrößerung des Zylinderdurchmessers erreichbar sein müssen. Denn hiermit steigt die Menge des bei jedem Saughub eindringenden Gemischs und seine Kraftwirkung nach der Zündung, weil die Kolbenfläche ja gewachsen ist. Aber bald macht sich eine Hinderung besonderer Art geltend. Im Zylinder tritt bei jeder Verpuffung eine Temperatur von 1600 bis 1800 Grad auf. Die Hitze muß durch das Kühlwasser, das den Mantel umspült, rasch und gründlich abgeführt werden, wenn der Kolben nicht festbrennen soll. Bei kleinen Zylindern gelingt das recht bequem, nicht so bei großen. Der Unterschied ist in einem geometrischen Gesetz begründet.



594. Dr. Rudolf Diesel
Phot. Kester & Co., München

Bekanntlich gilt für die Berechnung der Mantelfläche eines Zylinders die Formel $2 r \pi h$, das heißt, der Zylindermantel ist gleich dem Durchmesser des Zylinders ($d = 2$ Halbmessern $r$) × der Ludolffschen Zahl $\pi$ (Pi 3,14159) × der Höhe des Zylinders. Der Inhalt aber hat die Formel $r^2 \pi h$. Während also bei einer Vergrößerung des Durchmessers die Mantelfläche nur im einfachen Verhältnis wächst, vergrößert sich der Inhalt quadratisch. Je weiter man einen Zylinder macht, desto größer wird das Mißverhältnis zwischen Oberfläche und Inhalt, und bei der Gasmaschine gelangt man rasch an eine Stelle, wo der Mantel nicht mehr genügend Kühlfläche zur Verfügung stellt, um die Hitze aus dem Zylinderinneren abzuführen.

Gasmaschinen mit riesigen Zylindern kann man daher nicht bauen, und diese Schwierigkeit der Wärmeabführung ist allgemein der Grund, weshalb sehr große Einheiten von Gasmaschinen bis zum heutigen Tag nicht ausführbar sind. Bei der Dampfmaschine, deren Zylindertemperatur selbst bei Anwendung höchster Dampfüberhitzung 450 Grad nicht überschreitet, liegen die Verhältnisse sehr viel günstiger. Sie braucht keine Kühlung.

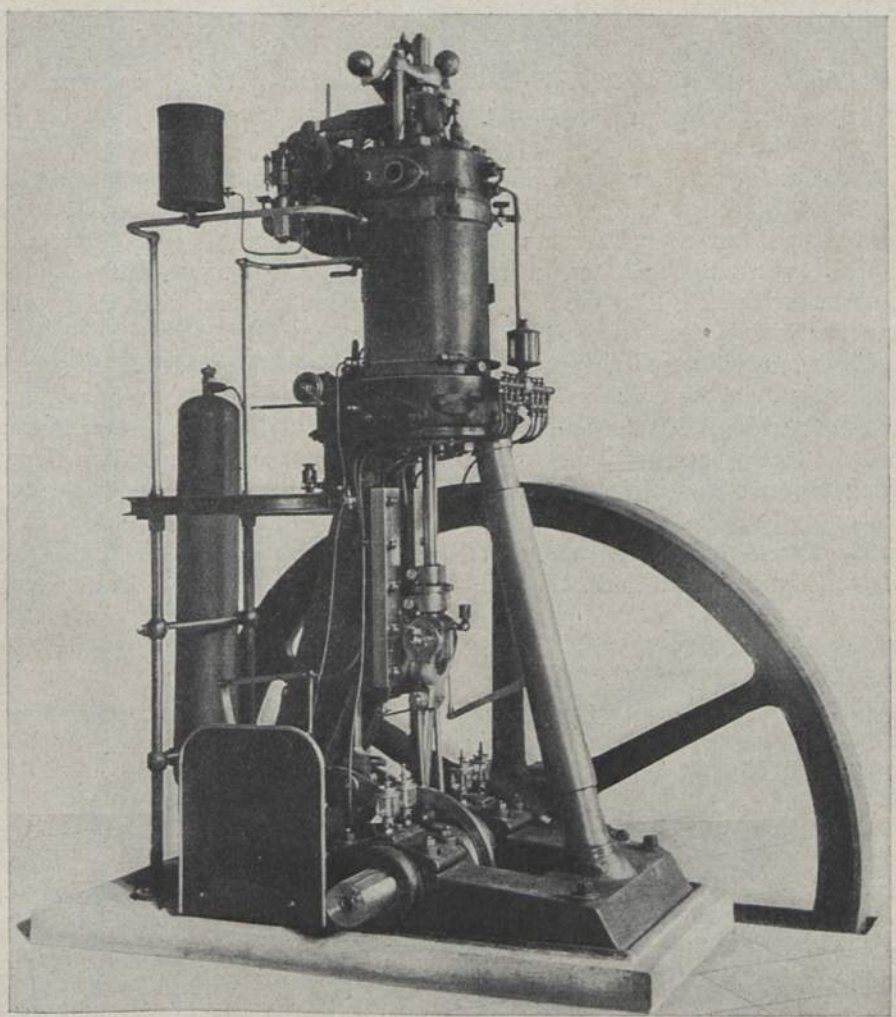
Ein anderer Weg zur Schaffung der Großgasmaschine hätte sogleich durch Verdopplung des Viertakts beschritten werden können. Bei allen bisher besprochenen Maschinen ist ja das Zylinderende, das der Kurbelwelle zugekehrt ist, offen. Verpuffung findet immer nur auf Einer Kolbenseite statt, während die andere luftgekühlt ist. Bei dieser Anordnung ist nur jeder vierte Hub ein Krafthub. Es kann aber bereits bei jedem zweiten Hub eine Verpuffungswirkung und damit eine Verdopplung der Maschinenleistung ohne Vergrößerung des Zylinders erzielt werden, wenn man den Zylinder auch vorn verschließt und den Viertakt beiderseits mit versetzten Perioden sich abspielen läßt. Vor vierzig Jahren aber war die Maschinentechnik noch nicht genügend entwickelt, um die Aufgabe lösen zu können. Die Kolbenkühlung machte zu große Schwierigkeiten. Die ersten Großgasmaschinen wurden deshalb auf einer neuen Grundlage erbaut. Man wich bei ihnen zum erstenmal vom Prinzip des Ottoschen Viertakts ab.

Die Vermehrung der Krafthübe, bezogen auf die Umdrehungszahl der Kurbelwelle, konnte allein die gewünschte Vergrößerung der Maschinenleistung bringen. Es wurde deshalb vom Viertakt zum Zweitakt übergegangen.

Wie der Name sagt, vollzieht sich hierbei ein ganzes Spiel im Zylinder nicht mehr wie beim Otto-Motor während vier, sondern bereits während zwei Hüben, also nicht bei zwei Umdrehungen der Kurbelwelle, sondern bereits bei jeder einzelnen Umdrehung. Jeder zweite Kolbenlauf bringt einen Krafthub. Das wird grundsätzlich dadurch bewirkt, daß der Arbeitszylinder aufhört, eine Saugpumpe zu sein, daß Laden und Verdichten während eines einzigen Hubs statt wie bisher in zwei Hüben vor sich gehen, und daß ferner der Auspuffhub mit dem Verpuffungshub vereinigt wird. Die mechanische Möglichkeit für diese Verkürzung des Spiels wird durch Anordnung besonderer Pumpen geschaffen, die Gas und Luft in den Arbeitszylinder fördern, und durch Änderung des Zylinderbaus, die bewirkt, daß der Arbeitskolben zugleich Steuerorgan ist. Es wird ihm Gelegenheit geboten, wie bei der Gleichstrom-Dampfmaschine (Seite 225) über Schlitze im Zylinder zu schleifen.

Wilhelm von Oechelhäuser, der bedeutende Förderer der Gastechnik, baute gemeinsam mit Junkers, der später Wichtigstes für die Flugzeugtechnik geleistet hat, in den Werkstätten der Anhaltischen Maschinenbau-Aktiengesellschaft in Dessau die erste Großgasmaschine. Sie wurde 1898 in einer elektrischen Zentrale des Hörder Bergwerks- und Hüttenvereins als Zwillingsmaschine für den Betrieb mit Gichtgasen aufgestellt, und mit diesem Motor von 600 Pferdestärken war die deutsche Industrie damals wiederum der ganzen Welt voran. Die Oechelhäuser-Maschine hat ein ganz anderes Gesicht als

alle unsere bisherigen Bekannten (Bild 588). Der Zylinder ist ein an beiden Seiten offenes Rohr, in dem zwei Kolben gegenläufig arbeiten. Sie bewegen sich zu gleicher Zeit stets nach verschiedenen Richtungen. Der linke Kolben greift mittels Kolbenstange, Kreuzkopf, Geradführung und Schubstange an der mittleren Kröpfung der Kurbelwelle an. Der rechte Kolben trägt an seiner Stange ein Querhaupt, von dem aus, an beiden Seiten des Zylinders vorbei, Treibstangen wiederum zu Kreuzkopf-Geradführungen laufen. Mittels Schubstangen sind die Treibstangen mit den beiden äußeren Kröpfungen der Kurbelwelle verbunden, die gegen die mittlere um 180 Grad versetzt sind. Auf der verlängerten hinteren Kolbenstange sitzt eine Pumpe, die Ladepumpe, die auf der einen Seite Luft, auf der anderen Gas ansaugt und beide getrennt mit geringem Überdruck über die Atmosphäre in den Zylinder fördert. Zwischen den beiden Kolbenköpfen im Zylinder liegt der Arbeitsraum, in dem das Gemisch verdichtet und durch den elektrischen Funken gezündet wird.



595. Erster Diesel-Motor
aus dem Jahre 1897. Leistung: 26 Pferdestärken. Deutsches Museum, München

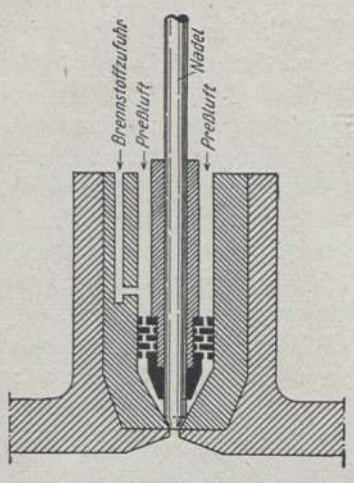
Wir nehmen an, daß die beiden Kolben gerade ihre tiefste Innenstellung erreicht, ihre Köpfe also den geringsten Abstand voneinander haben. Alsdann befindet sich zwischen ihnen ein Gemisch von Luft und Gichtgas, das bis auf 12 Atmosphären verdichtet ist. Sobald die Kolben anfangen, sich wieder nach außen zu bewegen, wird gezündet, und es geht der Arbeitshub vor sich. Während seines Laufs nach außen legt zunächst der linke Kolben Schlitze im Zylinder frei, durch welche die Verbrennungsgase, da sie einen sehr großen Ausgangsquerschnitt vorfinden, rasch entweichen. Bereits währenddessen legt der rechte Kolben einen zweiten schmalen Schlitzkranz frei, in dessen umgebendem Ringraum die von der Ladepumpe zugedrückte Luft von 1,3 Atmosphären Spannung bereits auf das Eindringen wartet. Sie gelangt nun in den Zylinder und spült, indem sie den Rest der Abgase vor sich her treibt, den Raum gründlich frei.

Ganz wenig später hat aber der rechte Kolben auch den dritten Schlitzkranz freigelegt, aus dem nun Gas hinter der Spülluft in den Zylinder eintritt. Der Gasstrom hat nur Zeit, etwa $^3/_4$ des Zylinderraums auszufüllen. Alsdann haben beide Kolben ihre Bewegungsrichtungen bereits umgekehrt, der linke verschließt den Auspuff, der rechte in kurzer Folge die Gas- und die Luft-Eintrittsschlitze, und nun werden beide Gemischteile, während die Verdichtung stattfindet, gut miteinander vereinigt. Bei engstem Abstand der Kolbenköpfe voneinander erfolgt von neuem die Zündung.

Wir sehen, daß bei dieser Maschine Saughub und Auspuffhub als selbständige Hübe fortgefallen sind. Dadurch hat sich der Viertakt zum Zweitakt verkürzt. Das Diagramm aber ist, wie Bild 587 zeigt, trotz der völlig veränderten Bauart doch dem Druck-Schaubild eines Otto-Motors sehr ähnlich geblieben. Grundsätzlich neu ist allein die Form des Übergangs der Ausdehnungslinie in die Auspufflinie, weil hier der steuernde Kolben während eines Teils des Auspuffs noch weiter nach außen läuft. Bei A findet die Zündung des Gemischs statt, wodurch der Druck im Zylinder bis nach B steigt. Während die Kolben nach außen gehen, dehnt das Gemisch sich aus, bis bei C der Auspuff freigegeben wird und die Spannung rasch bis in die Nähe der Atmosphäre sinkt. Beim Rücklauf der Kolben findet von D bis E die Füllung durch die Ladepumpe statt. Alsdann sind alle Auslässe geschlossen, das Gemisch wird verdichtet, bis von neuem im Totpunkt der Zündfunke überspringt.

Ein großer Vorzug der Oechelhäuser-Maschine ist es, daß sie gar keine Ventile besitzt, sondern nur Schlitze, also ruhende Steuerungs-Einrichtungen für den Aus- und Einlaß. Das bringt freilich die Notwendigkeit mit sich, mit der Gasfüllung vorsichtig zu sein. Denn wenn diese zu lange dauert, geht unverbranntes Gas durch den Auspuff hinaus, bevor dieser durch den rücklaufenden Kolben abgeschlossen ist. Die große Freifläche der Schlitze erlaubt sehr geschwindes Auslassen der Rückstände und sehr rasches Eindringen der Ladung, die ja hier auch dringend notwendig sind, weil nur sehr geringe Hubteile dafür zur Verfügung stehen. Die Massenwirkung des Gestänges ist durch die Versetzung der Mittelkurbel gegen die äußeren Kröpfungen um 180 Grad gut abgeglichen. Der Zylinder nimmt überhaupt keine Kraftwirkung auf, diese geht ausschließlich durch die Kolben- und die Treibstangen.

Eine andere Zweitakt-Großgasmaschine (Bild 591) wurde kurze Zeit später von der Fabrik Gebrüder Körting in Hannover gebaut. Ihre Ausführung ist ganz besonders bemerkenswert deshalb, weil hier ein doppeltwirkender Zweitakt stattfindet, wodurch der Krafterzeuger zur Eintaktmaschine wird, bei der, gerade wie bei der Dampfmaschine, jeder Kolbenhub ein Krafthub ist. Das gleiche hatte bereits Lenoir erreicht, nur mit so unvollkommenen Mitteln, daß eine praktische Auswirkung nicht möglich war.




596. Schnitt durch das Einblaseventil eines Diesel-Motors

Bei der Körting-Maschine ist zum erstenmal, seit Otto seine Erfindungen auf den Markt gebracht hatte, der Zylinder auf beiden Seiten geschlossen. Die Maschine braucht zur Steuerung des Eintritts sechs Ventile, drei auf jeder Zylinderseite. Nur der Auspuff geschieht durch Schlitze. Der Kolben ist sehr lang, er füllt die Hälfte der Zylinderlänge aus. An beiden Enden trägt der Kolben Dichtungsringe, so daß zwei Kanten zur Steuerung des Auslaß-Schlitzkranzes in der Zylindermitte benutzt werden können, dessen Höhe $^1/_{10}$ des Hubs beträgt. Die Maschine hat zwei getrennte Ladepumpen, die eine für Luft-, die andere für Gaszuführung. Sie sind zur Seite des Zylinders angebracht und werden von einer Stirnkurbel der Hauptwelle bewegt.

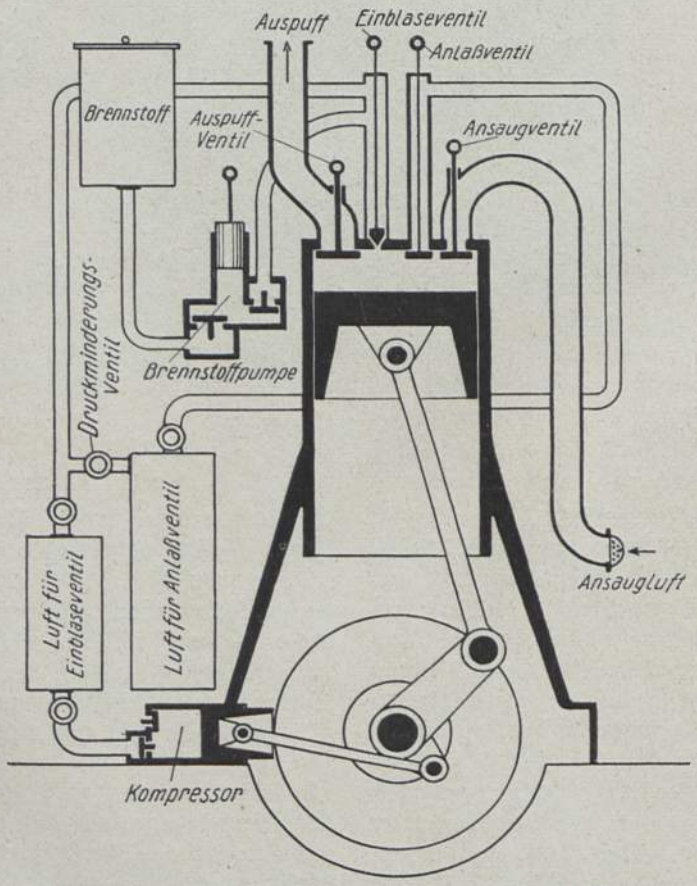
Wir betrachten die rechte Zylinderseite (Bild 590). Der Kolben ist gerade über die rechte Totlage hinausgelangt und hat den Rücklauf begonnen. Einlaßventil und Auspuffschlitze sind für die rechte Zylinderseite abgeschlossen. Das Gemisch ist verdichtet und wird gezündet. Der Kolben läuft nach links und legt während des letzten Zehntels seines Hubs den Auspuff frei. Die Verbrennungsrückstände stürzen hinaus, das Einlaßventil öffnet sich fast gleichzeitig, Spülluft dringt, da zugleich auch das Luftventil offen ist, in den Zylinder und vertreibt den Rest der Abgase. Ein wenig später, während der Kolben schon wieder zurückläuft, strömt auch Gas, bei nun geöffnetem Gasventil, durch das Einlaß-Ventil ein, worauf dieses schließt. Das eingeschlossene Gemisch wird verdichtet und wiederum gezündet.

Auf der anderen Zylinderseite vollziehen sich die gleichen Vorgänge, nur so versetzt, daß hier Ausdehnung, also Kraftwirkung, erfolgt, während drüben verdichtet wird. Dieselben Auslaßschlitze dienen dem Auspuff auch auf der zweiten Zylinderseite, indem sie von der anderen Kolbenkante bei Annäherung an die äußerste Linkslage des Kolbens eröffnet werden.

Körting hatte als erster den Mut, eine Stopfbüchse bei einer Verpuffungsmaschine anzuwenden. Diese war jetzt für die Durchführung der Kolbenstange durch den rechten Zylinderdeckel notwendig. Die hohe Temperatur, der die Packung ausgesetzt ist, machte den Bau sehr schwierig. Körting gelang es auch, den Kolben zu kühlen, der ja in dem völlig geschlossenen Zylinder seiner Maschine zwischen zwei höllischen Feuern arbeitet.

Die Kühlung des Kolbens wird durch fließendes Wasser bewirkt. Die Kolbenstange ist durchbohrt, der Kolben hohl. In die Bohrung der Kolbenstange ist ein Rohr, das sich nach dem Kolben-Hohlraum öffnet, konzentrisch eingesetzt (Bild 589). Das Kühlwasser wird durch die Gleitbahn des Kreuzkopfs zugeführt, und zwar mittels eines Schlitzes, den der sehr lange Kreuzkopfschuh stets verdeckt hält, wie er auch stehen mag. Das Wasser dringt durch Körper und Zapfen des Kreuzkopfs in das Rohr der Kolbenstange, durchfließt dieses, gelangt in den Kolben-Hohlraum und fließt aus diesem durch den Ringraum zwischen Kolbenstangenrohr und Kolbenstangenbohrung zum Kreuzkopf zurück, von dem es durch einen zweiten Schlitz in der Gleitbahn austreten kann.

Durch die Stopfbüchse, die der hohen Verpuffungstemperatur zu widerstehen vermag, und durch die Anordnung der Kolbenkühlung wurde die Körting-Maschine der Ausgang für den Bau aller neuzeitlichen Großkraftgasmaschinen, ohne selbst dazuzugehören. Während die Oechelhäuser-Maschine heute vollständig verschwunden ist, befinden sich Körting-Zweitakt-Motoren noch im Betrieb als Antrieb für Gebläse und Pumpen, weil ihre Umlaufgeschwindigkeit bequem verändert werden kann, was für diese Zwecke erwünscht ist. Sonst aber hat die moderne Entwicklung den Zweitakt für Verpuffungsmaschinen wieder verlassen und ist zum Viertakt zurückgekehrt, der in großartiger Weise ausgestaltet wurde.

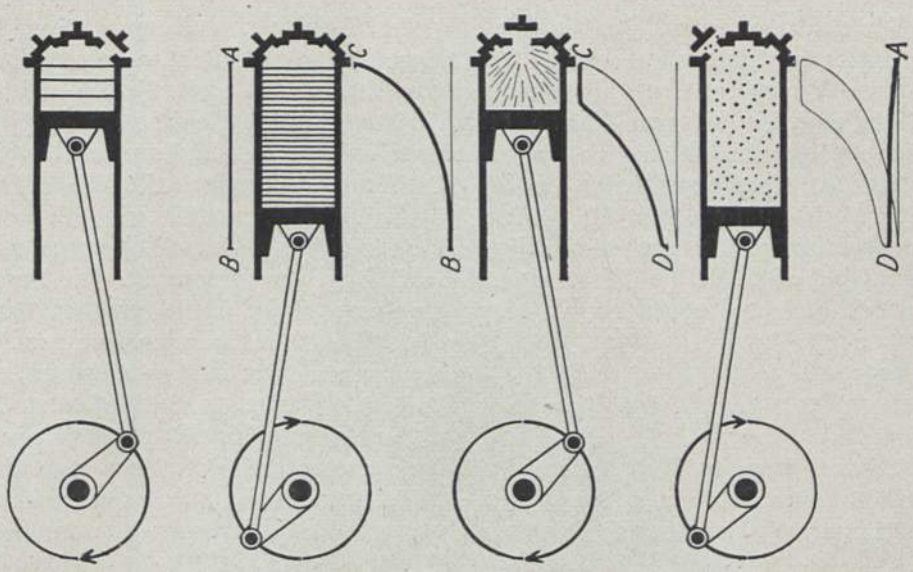



597. Schematischer Schnitt durch einen Diesel-Motor

Man sollte eigentlich meinen, daß eine Zweitaktmaschine die doppelte Leistung entwickeln müßte wie eine gleich große Viertaktmaschine. Das ist aber tatsächlich nicht der Fall, weil der Betrieb der Ladepumpen mit ihren Steuerungseinrichtungen hinzukommt, der kraftverzehrend wirkt. Der ganze Bau ist verwickelter, und beträchtliche Verluste an Gas, das unverbrannt durch die Maschine geht, lassen sich nicht vermeiden. Wenn bei jeder Umdrehung der Kurbelwelle nur immer ein wenig Gas ungenutzt durch die Auspuffschlitze entweicht, dann entsteht bei 600 minutlichen Umdrehungen der Kurbelwelle während eines Betriebstages schon ein sehr erheblicher Gasverlust.

Beim Viertakt ist eine solche Verschwendung ausgeschlossen, diese Betriebsart der Maschine hat — das mag manchem eigentümlich erscheinen — doch den Vorzug großer Einfachheit. Der Viertakt-Motor vermag auch mit höherer Drehzahl umzulaufen.

Nachdem durch die Körting-Maschine die Stopfbüchse, also der doppelseitige Zylinderverschluß, und die Kolbenkühlung in die Gasmaschinentechnik eingeführt waren, gab es kein Hindernis mehr, um zur Ausführung von Doppelt-Viertakt-Maschinen überzugehen. Bei Anwendung nur Eines Zylinders erhält man dann praktisch einen Zweitakt. Die Perioden werden auf die beiden Zylinderseiten in folgender Anordnung verteilt:




1. Takt: Einsaugen 2. Takt: Kompression 3. Takt: Arbeitsleistung 4. Takt: Auspuff

598. Arbeitsvorgänge in einem einfachwirkenden Viertakt-Diesel-Motor mit theoretischem Diagramm

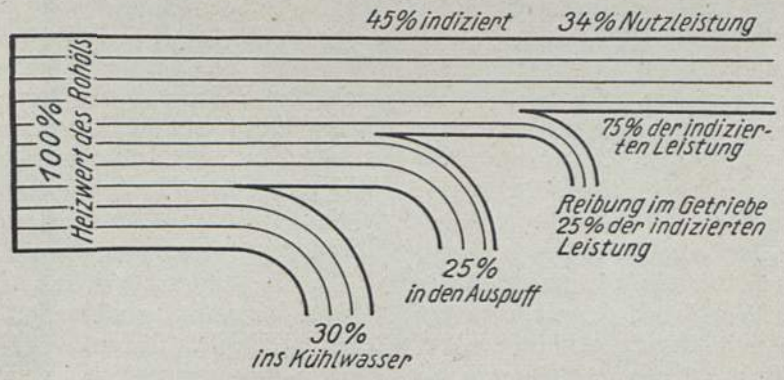
| | Erste Umdrehung der Kurbelwelle | | Zweite Umdrehung der Kurbelwelle | |
|---|---|---|---|---|
| Rechte Kolbenseite | Ansaugen | Verdichten | **Ausdehnen** | Auspuff |
| Linke Kolbenseite | Auspuff | Ansaugen | Verdichten | **Ausdehnen** |

| | Dritte Umdrehung der Kurbelwelle | | Vierte Umdrehung der Kurbelwelle | |
|---|---|---|---|---|
| Rechte Kolbenseite | Ansaugen | Verdichten | **Ausdehnen** | Auspuff |
| Linke Kolbenseite | Auspuff | Ansaugen | Verdichten | **Ausdehnen** |

Wie man sieht, folgen immer zwei Krafthübe unmittelbar aufeinander. Es wäre für die Regelmäßigkeit des Laufs der Maschine natürlich besser, wenn nicht immer zwei Krafthübe auf die Eine Umdrehung der Kurbelwelle und zwei Leerläufe auf die nächste Umdrehung fielen, sondern jede Umdrehung einen Krafthub hätte. Aber das ist, da die Vorgänge in beiden Zylinderseiten auf den gleichen Kolben wirken, nicht möglich. Der Kolben kann nicht gut auf der einen Seite ansaugen, während auf der anderen die Gase sich ausdehnen. Denn seine Laufrichtung paßt hierfür nicht. Trotzdem arbeiten Doppelt-Viertakt-Maschinen so regelmäßig, daß sie auch zum Antrieb von Lichtdynamos benutzt werden können.

Wenn zwei Doppelt-Viertakt-Zylinder in Reihen- oder Tandem-Anordnung (Bild 592 und 593) hintereinander gesetzt werden, so daß sie auf die gleiche Kolbenstange und die gleiche Kurbel arbeiten, so erhält man eine Eintakt-Maschine. Jeder Hub ist ein Krafthub. Die Tandem-Viertakt-Maschine ist der Großgasmotor der Gegenwart. Er wird auch in Zwillings-Anordnung ausgeführt, wobei die doppelt gekröpfte Kurbelwelle von vier in zwei Reihen stehenden Doppelt-Viertakt-Zylindern angetrieben wird. Jetzt fällt bereits auf jeden halben Hub ein Krafthub. Für Hochofengebläse werden solche Gasmaschineneinheiten mit einer Leistung von mehreren tausend Pferdestärken häufig angewendet.

Vielzylindrige Gasmaschinen mit mehr als 8000 Pferdestärken konnten wegen der vorhin geschilderten Schwierigkeiten bei der Kühlung bisher nicht entwickelt werden. Dagegen gibt die Kolben-Dampfmaschine bis zu 25 000 Pferdestärken her, ganz zu schweigen von den Dampfturbinen, die bereits 120 000 Pferdestärken in einer geschlossenen Einheit liefern. Dafür hat aber die Gas- und Ölmaschine den durchschlagenden Vorzug der besseren Wärmeausnutzung. Sie ist heute auch ausreichend einfach zu bedienen und verbraucht nicht mehr so viel Schmieröl wie einst. Das Anlassen ist, obgleich zusätzliche Anordnungen mit Druckluftgefäßen hierfür stets erforderlich sind (Seite 338), eigentlich einfacher als bei einer Groß-Kolbendampfmaschine, deren Zylinder stundenlang vorgewärmt werden müssen. Dagegen fällt bei der Verpuffungsmaschine die Fähigkeit fort, sich leicht umsteuern zu lassen, was die Kolbendampfmaschine in vortrefflichster Weise vermag. Zum Antrieb von Walzenstraßen, die ihre Drehrichtung fortwährend wechseln, kann die Groß-Gasmaschine daher nur bei Zwischenschaltung elektrischer Maschinen verwendet werden. Sie ist auch sehr empfindlich gegen wechselnde Belastungen. Der Wirkungsgrad sinkt rasch, viel geschwinder als bei der Dampfmaschine, wenn der Verpuffungs-Gasmotor nicht mit Vollast läuft.




599. Wärmestrom-Diagramm eines Diesel-Motors

Wir wissen, daß die Antriebmaschinen des Kraftwagens, des Luftschiffs, Flugzeugs und Motorboots Verpuffungsmotoren sind. Auch sie arbeiten im Eintakt, weil vier völlig selbständige Zylinder mit

versetzten Perioden die Kurbelwelle antreiben. Die Ausgestaltung der Verpuffungsmaschine hat heute einen gewissen Abschluß gefunden, da sie ihren Bereich von der Kraftlieferung für die riesenhaften Hochofengebläse bis zum Antrieb der Fahrzeuge erstreckt. Eine gewaltige Entwicklung hat sich in wenigen Jahrzehnten an den Otto-Motor angeschlossen. Er blieb Grundfeste und Vorbild, bis wiederum aus deutschen Händen eine neuartige Maschine hervorging, die eine noch bessere Nutzung der Wärme-Energie gestattet. Auch sie schließt eng an Ottos Gedanken an und ist heute der vollkommenste aller Wärme-Motoren.

*

„Als mein verehrter Lehrer, Professor Linde, am Polytechnikum in München 1878 seinen Zuhörern in der thermodynamischen Vorlesung erklärte, daß die Dampfmaschine nur 6—10 v. H. der disponiblen Wärme des Brennstoffs in effektive Arbeit umwandle, als er den Carnotschen Lehrsatz erläuterte und ausführte, daß bei der isothermischen Zustandsänderung eines Gases alle zugeführte Wärme in Arbeit verwandelt werde, da schrieb ich an den Rand meines Kollegienheftes: ‚Studieren, ob es nicht möglich ist, die Isotherme praktisch zu verwirklichen.'"

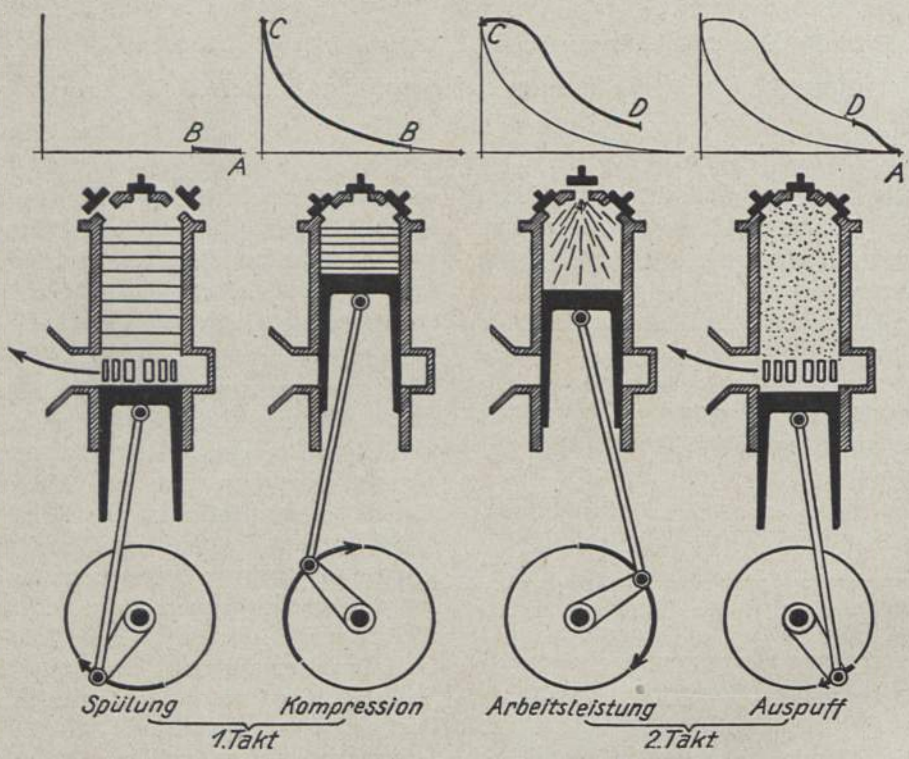
So berichtete Rudolf Diesel (Bild 594) in einem Vortrag über das erste Aufkeimen des Gedankens, der fortab sein Leben ausfüllen sollte. Er glaubte damals einen besonders günstig wirkenden Wärme-Motor schaffen zu können, wenn es ihm gelänge, die Zustandänderung des gasförmigen Betriebsstoffs im Zylinder so zu leiten, daß die Temperatur im Zylinder stets die gleiche bliebe (die Isotherme ist die Linie der Wärmegleichheit), indem jede sich entwickelnde Wärmemenge sogleich vollkommen in Arbeit umgewandelt würde.

„Ich verließ die Schule," so erzählte Diesel weiter, „ging in die Praxis, mußte mir meine Stellung im Leben erobern. Der Gedanke verfolgte mich unausgesetzt. Ich befestigte zunächst in den freien Momenten, welche mir blieben, meine thermo-dynamischen Kenntnisse nach allen Richtungen." Aber erst 14 Jahre später, 1893, veröffentlichte Diesel eine Schrift „Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors" und nahm zugleich das erste Patent.

Es gelang ihm bald darauf, die Maschinenfabrik Augsburg, die heute mit der Maschinenfabrik Nürnberg zu der berühmten Firma Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg vereinigt ist, sowie die Firma Fried. Krupp in Essen für die Unterstützung seiner Absichten zu gewinnen. Unter finanzieller Beihilfe von Krupp entstand in einem von Diesel eingerichteten und geleiteten Laboratorium der Maschinenfabrik Augsburg in den Jahren 1893—97 der erste Diesel-Motor (Bild 595). Diese Maschine von 26 Pferdestärken befindet sich heute im Deutschen Museum zu München als ein hervorragendes Denkmal deutscher wissenschaftlicher Ingenieur-Arbeit.

Dieses Museumsstück und alle anderen Diesel-Motoren, die sämtlich von ihm abstammen, sind nun nicht die „Verwirklichung der Isotherme". Im Verlauf seiner Arbeiten in Augsburg mußte Diesel einsehen, daß sein ursprünglicher Gedanke nicht den richtigen Weg wies. Es wurde notwendig, einen ganz anderen Weg zu beschreiten, von der Idee der gleichbleibenden Wärme zur gleichbleibenden Spannung überzugehen.

Der isothermische Motor hätte eine Maschine ohne Kühlung werden müssen. Denn eine Erhitzung der Zylinderwände wäre bei ihr nicht aufgetreten, weil sich jedes Wärmequantum darin ja sogleich in mechanische Arbeit umgesetzt hätte. Der Diesel-Motor aber, wie wir ihn tatsächlich besitzen, ist gerade so mit Wasserkühlung ausgerüstet wie jede Verpuffungsmaschine. Grundlegend geworden ist der Gedanke, den Brennstoff derart einzuführen, daß während seiner Verbrennung die Spannung im Zylinder sich nicht ändert, im Gegensatz zur Verpuffungsmaschine, bei der hierbei eine plötzliche sehr starke Druckerhöhung eintritt. (Siehe die Linie B—C auf Bild 559.) An die Stelle der Gleichtemperatur-Maschine ist die Gleichdruck-Maschine getreten.



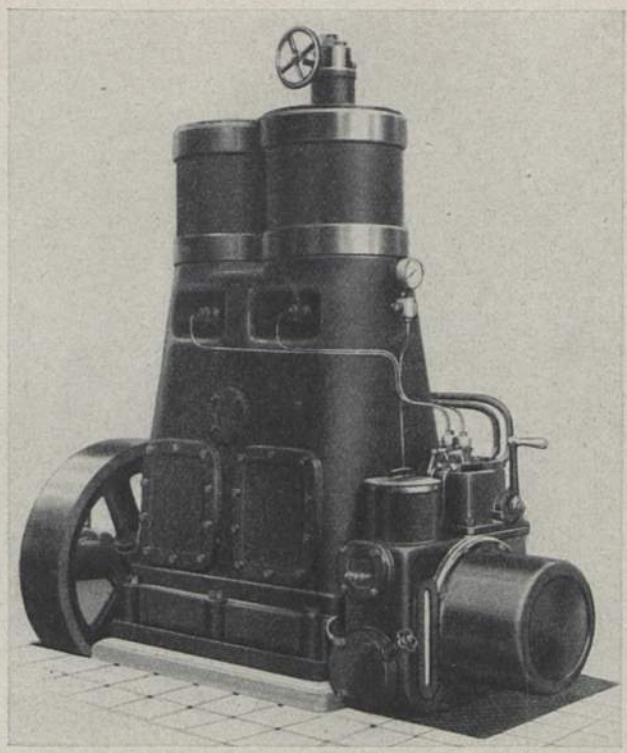

600. Arbeitsvorgänge in einem Zweitakt-Diesel-Motor

Weil Diesel vom Beginn seiner Arbeiten bis zu ihrem Abschluß keinen genau geradeaus gerichteten, sondern einen gezackten Weg gegangen ist, wird oft versucht, ihm die Erfinder-Eigenschaft abzusprechen. Dies geht so weit, daß die Bezeichnung „Diesel-Motor" in manchen Kreisen verpönt ist. Niemand kann jedoch leugnen, daß der neueste und günstigst arbeitende Wärme-Motor aus Diesels Händen hervorgegangen ist. Gewiß haben zahlreiche seiner Mitarbeiter in dem Augsburger Laboratorium erheblichen Anteil an dem Gelingen der Versuche. Der geistige Führer aber blieb in jedem Augenblick Rudolf Diesel, und sein Vertrauen zur Sache allein, seine Unermüdlichkeit, seine felsenharte Überzeugung trotz aller Fehlschläge, daß das Werk gelingen müsse, haben zu dem Endergebnis geführt, dessen Großartigkeit durch keine literarische Disputation weggeleugnet werden kann.

Der Diesel-Motor entstand in Augsburg durch ehrliche, ständig vorwärts gerichtete Arbeit. Nach welcher Kurve diese verlief, ist am Ende gleichgültig. Ja, es darf die Frage aufgeworfen werden, ob ein Mann, dem die Grundlage, auf der er ein Gebäude aufrichten will, unter den Füßen

wankt, und der das Haus dennoch nach dem Errichten eines neuen Fundaments unter Dach bringt, nicht größer genannt werden muß als ein anderer, dem das Glück beschieden ist, ohne jede Unterbrechung in Einem Zug aufbauen zu können. Watt, mit dem Diesel keineswegs verglichen werden soll, ging von dem Gedanken aus, die atmosphärische Dampfmaschine durch günstigere Anordnung der Kondensation zu verbessern, und er schuf die doppeltwirkende, den Atmosphärendruck gar nicht mehr in Anspruch nehmende Dampfmaschine. In seinem Wirken ist auch mancher Zick-Zack-Weg zu finden.

„An ihren Früchten sollt ihr sie erkennen!", ist ein schöner biblischer Spruch, und Dieselś Schaffen war in hohem Maß fruchttragend. So sind wir Deutschen durchaus berechtigt, diesen Mann den größten Erfindern auf dem Hochgebiet der Kraftmaschinen zuzuzählen, den vielbefeindeten Dr. Rudolf Diesel, den ein tragisches Geschick schon im sechsten Jahrzehnt seines Lebens, 1913, in den Tod riß. Er war 1858 in Paris als Sohn deutscher Eltern geboren.



601. Junkers-Doppeltkolbenmotor, Bauart 1921
Junkers-Motorenbau G. m. b. H., Dessau

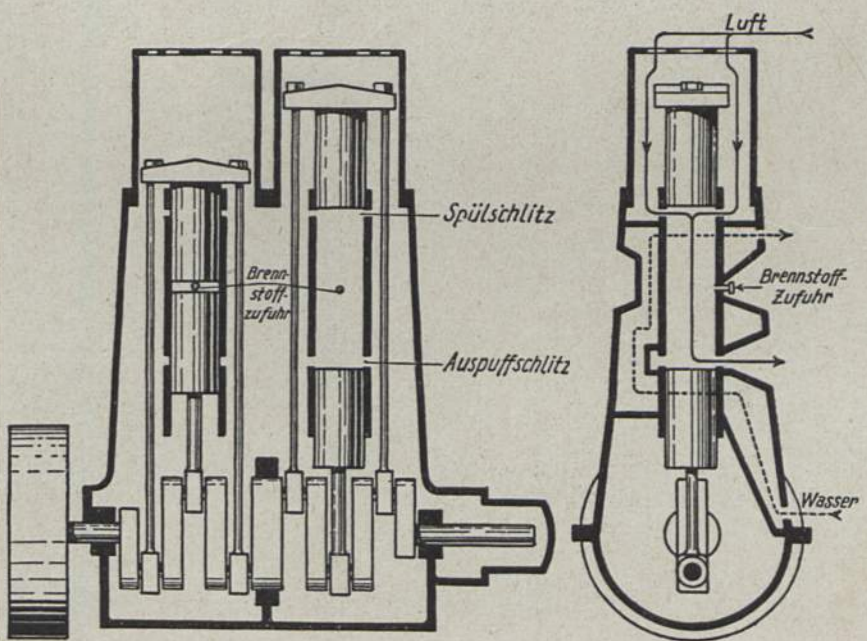
Hohe Anerkennung verdienen gleichfalls die leitenden Männer der Maschinenfabrik Augsburg und die Firma Krupp in Essen, die während vier schwerer Entwicklungsjahre trotz zahlreicher Fehlschläge und der sehr hohen Kosten, die dadurch entstanden, an dem einmal gefaßten Entschluß festhielten, den Erfinder zu unterstützen. Die Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg ist die Wiege und die hohe Schule des Dieselmotor-Baus gewesen, der nun, nachdem die Patente abgelaufen sind, an zahlreichen Stätten auf der ganzen Erde gepflegt wird. Es ist eine günstige Fügung des Schicksals, daß dieses deutsche Werk gerade der deutschen Kraftmaschinen-Technik zum besonderen Heil geworden ist, weil viele inländische Brennstoffe dafür verwendet werden können.

Der Erfinder selbst schrieb die folgenden Sätze: „Der Diesel-Motor ist diejenige Maschine, welche den Brennstoff ohne jeden vorherigen Umwandlungsprozeß unmittelbar im Zylinder in Arbeit verwandelt und so weit ausnutzt, wie der augenblickliche Stand der Wissenschaft überhaupt für möglich erklärt. Er ist demnach die einfachste und gleichzeitig die sparsamste Kraftmaschine. Der Erfolg liegt in dem neuen Prinzip der inneren Arbeitsvorgänge und nicht in konstruktiven Verbesserungen oder Veränderungen älterer Maschinensysteme."

Die Diesel-Maschine ist ein Ölmotor, der allein befähigt ist, die billigen Schweröle auszunutzen. In seinem Äußeren gleicht er der Verpuffungs-Gasmaschine vollkommen bis auf die Anordnung der Ventile und verschiedener Nebenanlagen. Während der ortfeste Gasmotor meist liegend gebaut wird, erhält der Diesel-Motor fast ausnahmslos stehende Zylinder.

Er arbeitet für gewöhnlich gleichfalls im Viertakt. Im Zylinder, der bei allen kleineren und mittleren Maschinen an der einen Seite offen ist, verbrennt auch hier ein Gemisch von Luft und Ölnebel. Die beiden Füllungsteile werden aber nicht gemeinschaftlich, sondern durchaus getrennt eingeführt. Nur die Luft wird verdichtet, und zwar bis zu einer sehr hohen Spannung. Eine besondere Zündeinrichtung fehlt.

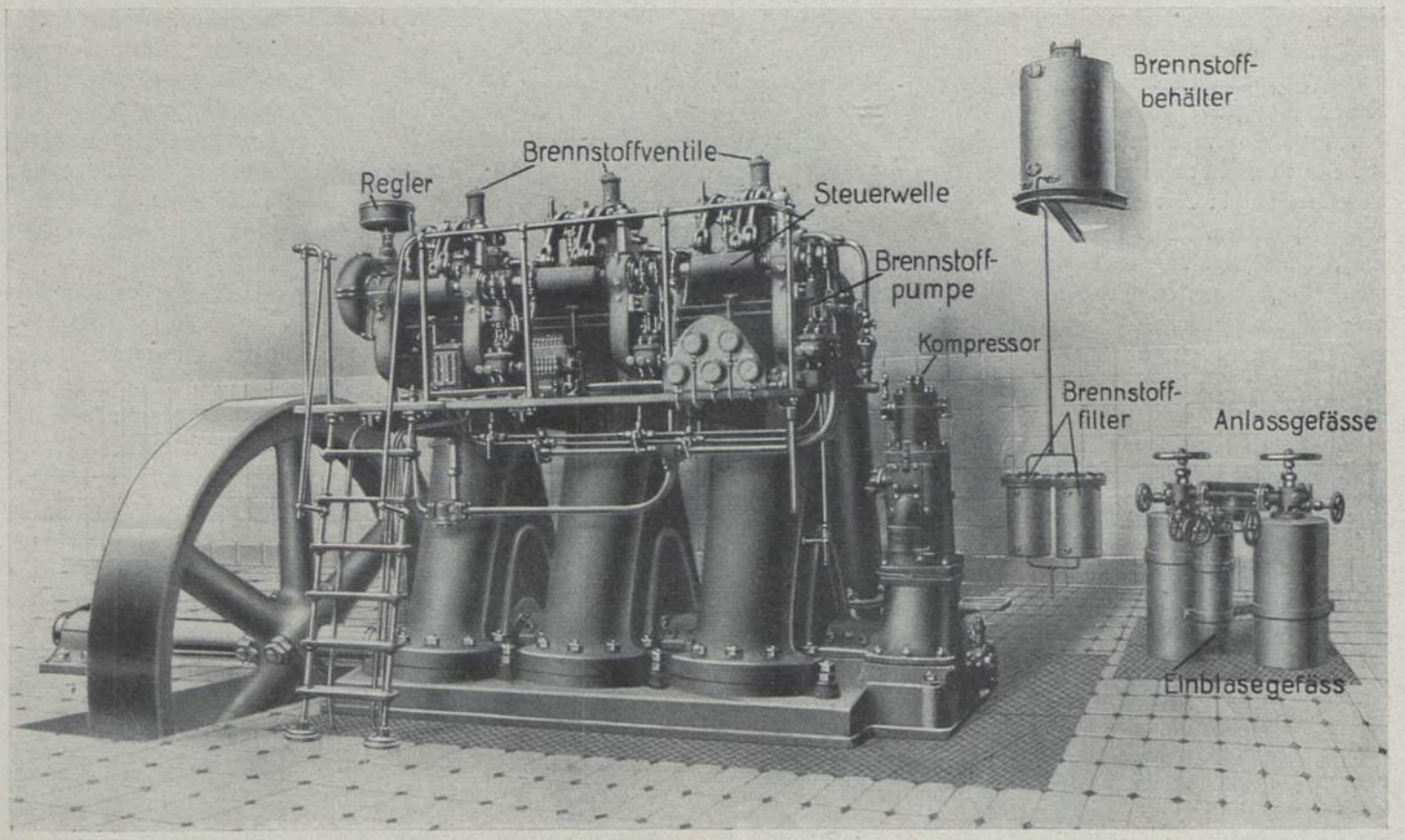
Die Verbrennung geschieht, entsprechend der Einführungsart des Brennstoffs, nicht plötzlich, sondern allmählich, und sie ist weit vollkommener als in der Verpuffungsmaschine. Aus diesem Grund und wegen des hohen Verdichtungsgrads ist der thermische Wirkungsgrad des Diesel-Motors unvergleichlich gut. 35 v. H. der zugeführten Wärme-Energie werden in mechanische Arbeit umgesetzt gegen 28 v. H. bei der Verpuffungsmaschine und 12 v. H. durchschnittlich bei der Dampfmaschine.



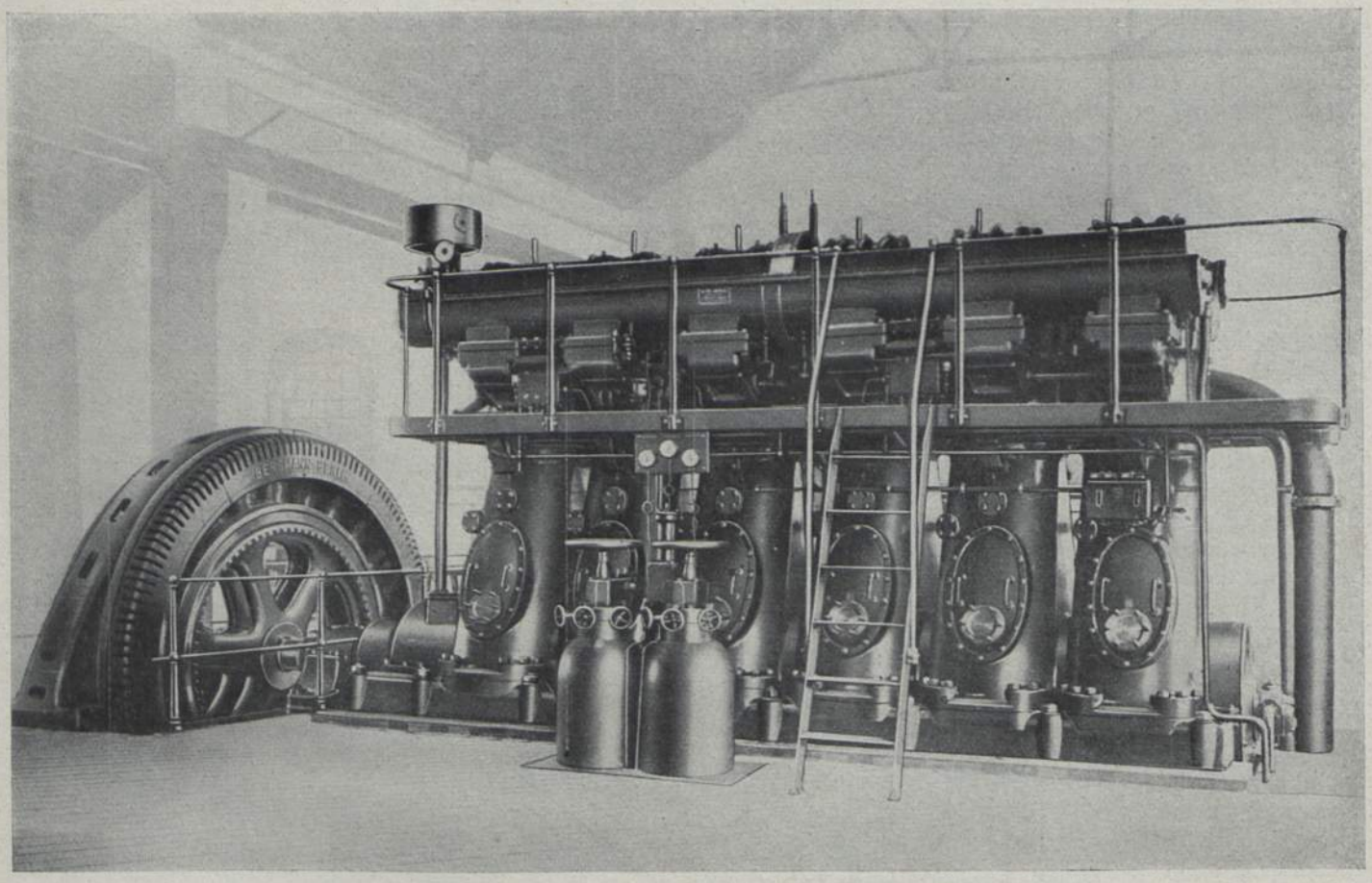

602. Schematischer Schnitt durch den Junkers-Doppeltkolbenmotor

Bild 597 gibt einen Schnitt durch einen einzylindrigen Diesel-Motor in rein schematischer Darstellung.

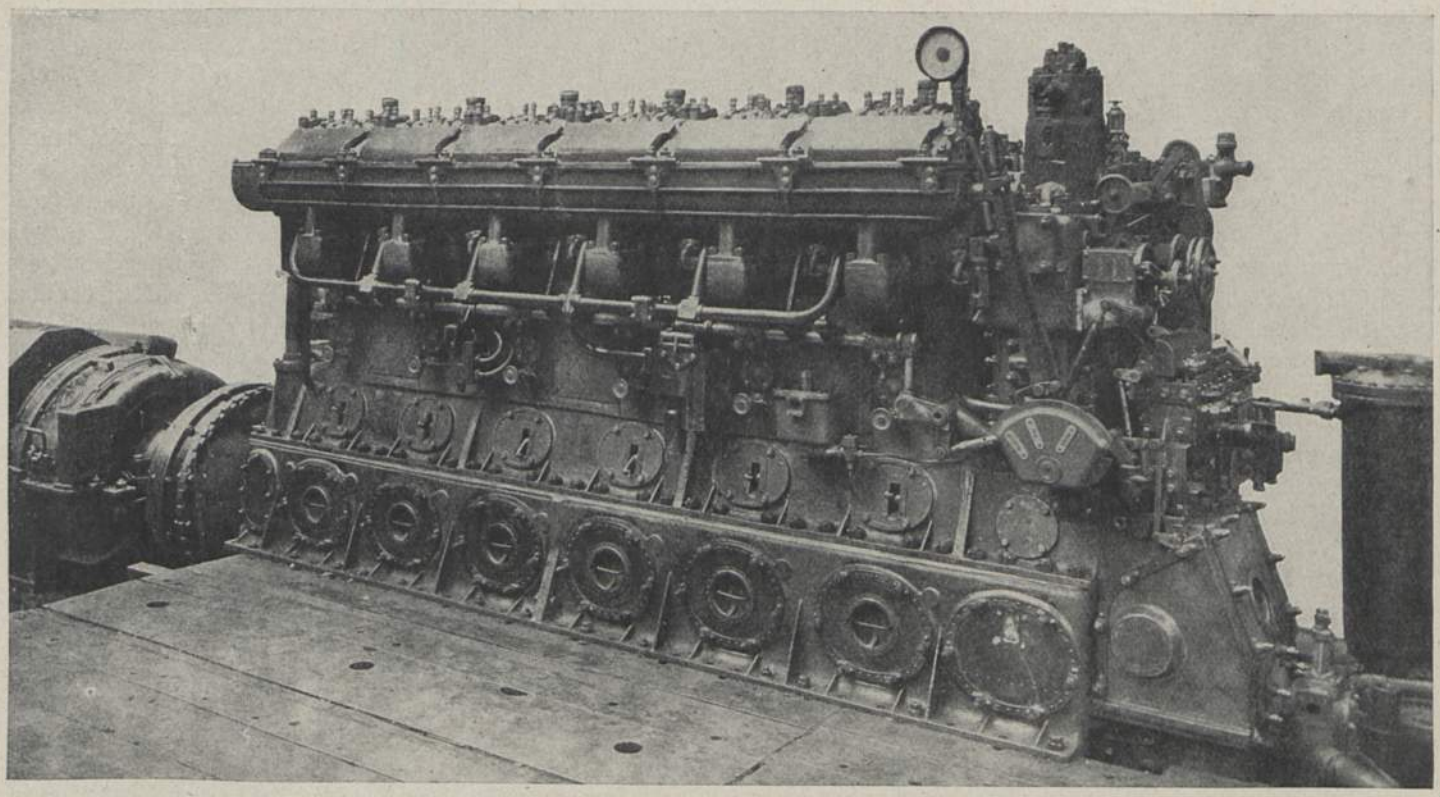
Die Steuerung öffnet, wenn der Kolben für den ersten Takt niederzugehen beginnt, das Ansaugeventil. Es wird atmosphärische, in einem Filter gereinigte Luft angesaugt. Während des zweiten Hubs sind alle Ventile zu. Die eingeschlossene Luft wird verdichtet, und zwar außerordentlich hoch, bis auf 35 Atmosphären. Sie erhitzt sich hierbei auf etwa 800 Grad. Im Totpunkt öffnet das



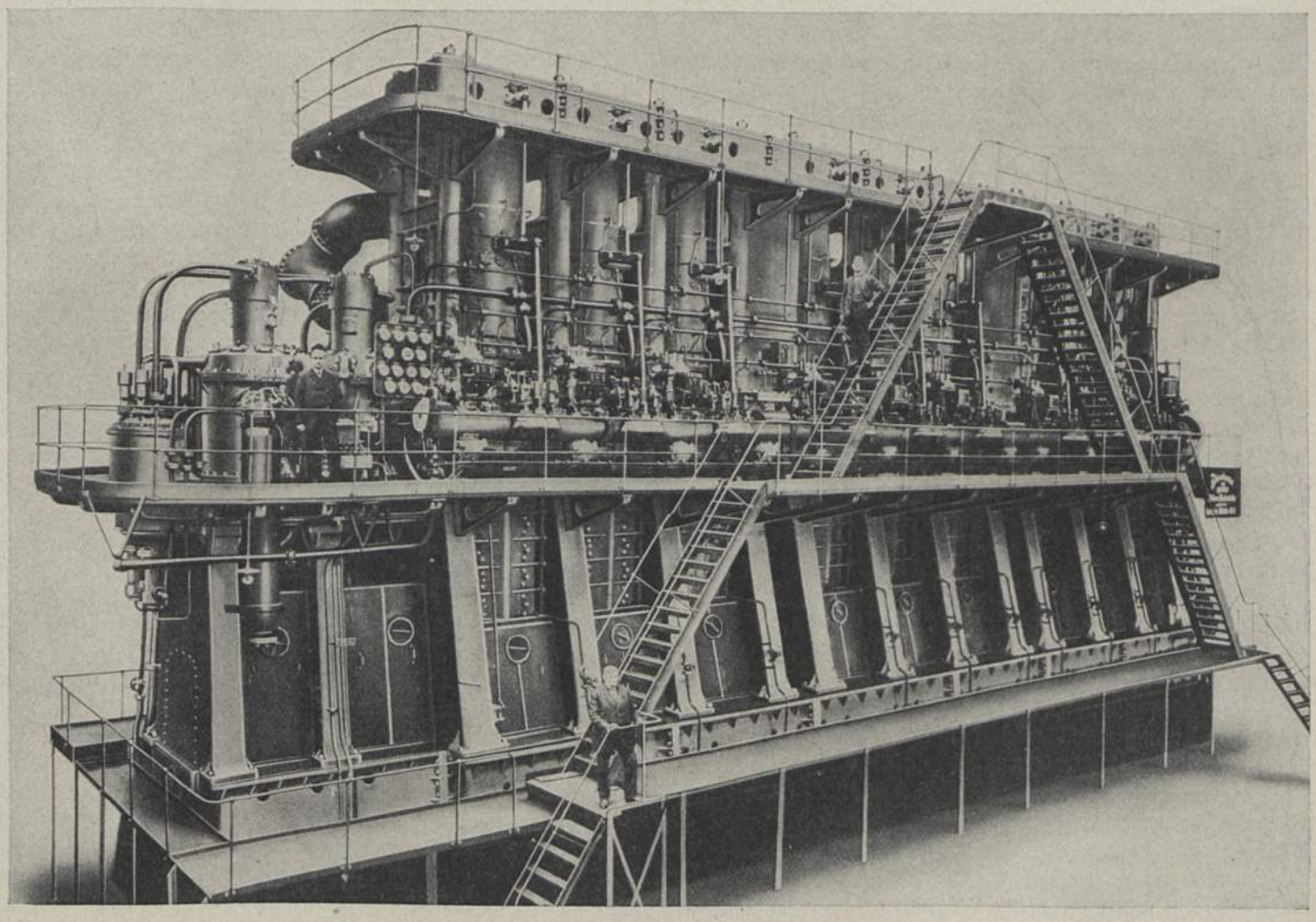

603. Stehender Diesel-Motor mit drei Zylindern
wird in Größen von 100 bis 1000 Pferdestärken-Leistung gebaut. Gasmotorenfabrik Deutz, Köln-Deutz



604. Kompressorloser Diesel-Motor von 750 Pferdestärken
Ausführung der Gebr. Körting A.-G., Hannover-Linden



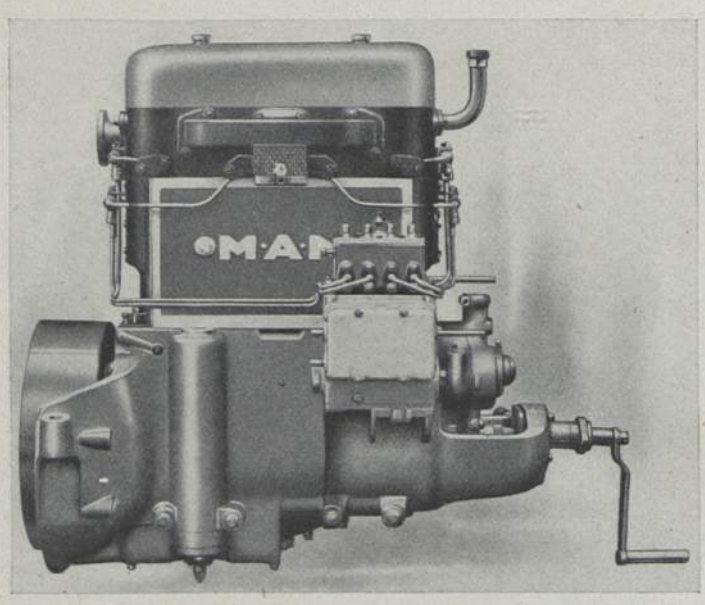
605. Diesel-Motor von 300 Pferdestärken für Unterseeboote
Gebr. Körting A.-G., Hannover-Linden



606. Der größte aller bisher gebauten Diesel-Motoren
Leistung: 15 000 Pferdestärken. Erbaut von Blohm & Voß in Hamburg für die Hamburgischen Elektrizitätswerke

Einblaseventil, und eine bestimmte Menge Brennstoff, die bereits vorher von der Brennstoff-Pumpe in das Ventilgehäuse gebracht ist, wird nun mittels Einblaseluft, die eine Pressung von 60 Atmosphären hat, gegen den Verdichtungsdruck fein zerstäubt in den Zylinder gedrängt. Der Ölnebel entzündet sich hier sogleich, weil die Temperatur der verdichteten Luft hoch über der Entzündungstemperatur des Öls liegt. Eine besondere Zündeinrichtung ist deshalb nicht notwendig.

Die Ölmenge wird nicht auf einmal, sondern allmählich eingebracht. Die Spannung im Zylinder bleibt für kurze Zeit gleich, weil die Verbrennung immer gerade so viel Energie nachliefert, daß die Vergrößerung des Verbrennungsraums, die durch den Niedergang des Kolbens entsteht, ausgeglichen wird. Bald aber, wenn der Kolben noch nicht ein Zehntel seines Hubwegs vollendet hat, schließt das Einblaseventil, und der Kolben wird über den Rest des dritten Hubs, des Arbeitshubs, durch die Ausdehnung der jetzt auf etwa 1500 Grad erhitzten Gase getrieben. Während des vierten Hubs, bei dem der Kolben wieder aufsteigt, werden die Rückstände durch das nun offene Auspuffventil hinausgedrängt. Ein viertes Ventil dient für das Anlassen der Maschine mittels Druckluft, die in einem besonderen Gefäß gespeichert wird; der Druck hierin ist weit geringer als in dem Behälter für die Einblaseluft.




607. Kompressorloser Vierzylinder-Fahrzeug-Dieselmotor der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg, wird in Größen von 45 bis 53 Pferdestärken bei 1000 bis 1100 Touren gebaut. Aus der Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Bd. 69, Nr. 35

Wir fassen die Vorgänge noch einmal an Hand des Viertakt-Schaubilds (Bild 598) zusammen, wobei wir zugleich das Diagramm entstehen lassen:

Erster Hub: Ansaugen von Luft mit Atmosphärenspannung.

Zweiter Hub: Verdichten der Luft.

Dritter Hub: Einführen und Verbrennen des Brennstoffs sowie Ausdehnung der heißen Gase bis in die Nähe der Atmosphärenspannung.

Vierter Hub: Hinausdrücken der Verbrennungsrückstände bei Atmosphärenspannung.

Wenn wir das Diagramm einer Verpuffungsmaschine mit dem eines Dieselmotors vergleichen, so sehen wir, daß dort der Höchstdruck durch die Verpuffung (D in Bild 561, 3), hier aber durch die Verdichtung reiner Luft (C in Bild 598, 2) erreicht wird. Es kann beim Diesel-Prozeß mit der Verdichtung sehr hoch gegangen werden, weil sich ja während dieses Vorgangs kein Brennstoff im Zylinder befindet, so daß eine Vorzündung unmöglich ist, die beim Hinauftreiben der Kompression bis auf 35 Atmosphären bei der älteren Maschine unbedingt stattfinden würde. Steigerung der Verdichtung aber bewirkt Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads. Die Linie des Arbeitshubs (CD in Bild 598, 3) liegt beim Diesel-Diagramm anfangs nahezu wagerecht als ein Zeichen dafür, daß die Verbrennung während des ersten Teils des Arbeitshubs allmählich vor sich geht; die Pressung im Zylinder steigt nicht über den Druck der verdichteten Luft hinaus. Die Verbrennung ist sehr vollkommen, weil der Brennstoff einen Luftüberschuß vorfindet, ohne daß dies bei der hohen Erhitzung der Luft störend wirkt.

Die Tatsache, daß Luft und Brennstoff getrennt eingeführt werden, gestattet zugleich eine sehr günstige Regelung des Diesel-Motors. Sie geschieht dadurch, daß bei wechselnder Belastung die im Einblaseventil aufgehäufte Brennstoffmenge sich verändert. Läuft die Maschine zu rasch, soll ihre Leistung hinuntergesetzt werden, so sorgt der Regler dafür, daß weniger Brennstoff in das Einblaseventil gelangt. Diese Drosselung geschieht nicht dadurch, daß die Fördermenge der Brennstoffpumpe verändert wird, weil diese auch bei regelmäßigem Gang bereits sehr gering ist. Der Regler sorgt vielmehr dafür, daß das Ansaugeventil der Pumpe auch während des Druckhubs mehr oder weniger lange geöffnet bleibt. Alsdann wird ein Teil der in den Zylinder der Pumpe gesaugten Brennstoffmenge wieder in den Behälter zurückbefördert, und nur der Rest geht in das Einblaseventil.

Bei der Verpuffungsmaschine sinkt bei geringerer Leistung der Wirkungsgrad sehr rasch, gleichgültig in welcher der auf Seite 336 ff. genannten Arten sie geregelt wird. Denn sowohl der Ausfall von Verpuffungen wie die Verarmung des Gemischs oder die Minderung seiner Menge läßt den Zylinder kälter werden, so daß die Wärme-Ausbeute der Verpuffung, die dem Kolben zugute kommt, geringer wird. Anders beim Diesel-Motor. Hier steigt der Wirkungsgrad bei verringerter Leistung zunächst sogar noch etwas an, weil bei verminderter Brennstoffzufuhr der Luftüberschuß größer, die Verbrennung also vollkommener wird. Die Hitze im Verbrennungsraum wird unter allen Umständen durch die verdichtete Luft hoch genug gehalten.

Bei dauernd sehr stark hinabgesetzter Leistung gibt auch der Diesel-Motor freilich nicht mehr den vollen Wirkungsgrad her, weil die immer gleichbleibende Reibung im Getriebe alsdann prozentual zu viel von der zur Verfügung stehenden Arbeitsmenge fortnimmt. Das sehr langsame Abfallen des Wirkungsgrads ist aber höchst wichtig, weil die Maschine hierdurch eine große Wirtschaftlichkeit auch bei verringerter Leistung erhält. Auch mit dieser Eigenschaft ist sie der Verpuffungsmaschine überlegen.

Der einfachwirkende, im Viertakt arbeitende Diesel-Motor braucht ein schweres Schwungrad, weil die verhältnismäßig langen Abstände zwischen den einzelnen Krafthüben sonst auch seinen Gang unregelmäßig machen würden. Zu seinem Bau gehört unbedingt die kleine Brennstoffpumpe, und noch vor wenigen Jahren mußte auch stets die Luftpumpe da sein. Dieser Kompressor hat recht erhebliche Abmessungen, da er ja Luft sehr hoher Pressung liefern muß. Meist geschieht die Verdichtung auf 60 Atmosphären nicht in Einem Zylinder, sondern in zwei oder drei aufeinander folgenden Stufen, damit die Wände des Pumpzylinders nicht zu hoch erhitzt und beansprucht werden.

Zum Anlaßbehälter führt eine Zweigleitung aus dem Rohr, das die Einblaseluft führt, und hier ist ein Druckminderungsventil eingeschaltet (Bild 597). Soll die Maschine nach Stillstand wieder angelassen werden, so wird der Kolben durch Drehen des Schwungrads auf Hub nach abwärts gestellt und ein Steuerungsnocken so eingerückt, daß er das Anlaßventil öffnet. Hat die Maschine durch Betrieb mit Druckluft eine ausreichend hohe Drehzahl erreicht, dann wird die Steuerung auf den Normalbetrieb umgeschaltet.

Die Maschine ist in der Anschaffung nicht billig, da sie eine sehr sorgfältige und genaue Herstellung aller Teile erfordert. Der Erfinder sagt darüber: „Der Diesel-Motor muß ausgezeichnet gearbeitet und aus bestem Material hergestellt sein, wenn er seine Aufgabe wirklich erfüllen soll; nur erstklassige und besteingerichtete Fabriken können ihn bauen. Es darf wohl ausgesprochen werden, daß durch ihn der Maschinenbau auf ein höheres Niveau gehoben wurde, in ähnlicher Weise, wie der Kleinmaschinen-Fabrikation durch den Automobil-Motor neue Wege gewiesen wurden. Der Diesel-Motor ist also keine billige Maschine, und ich möchte davor warnen, jemals den Versuch zu machen, ihn billig herstellen zu wollen. Diese Grundbedingung des Diesel-Motorbaus ist aber nicht ein Nachteil, wie man schon vielfach gesagt hat, sondern im Gegenteil, gerade darin liegt seine Stärke und die Gewähr für seinen Wert."

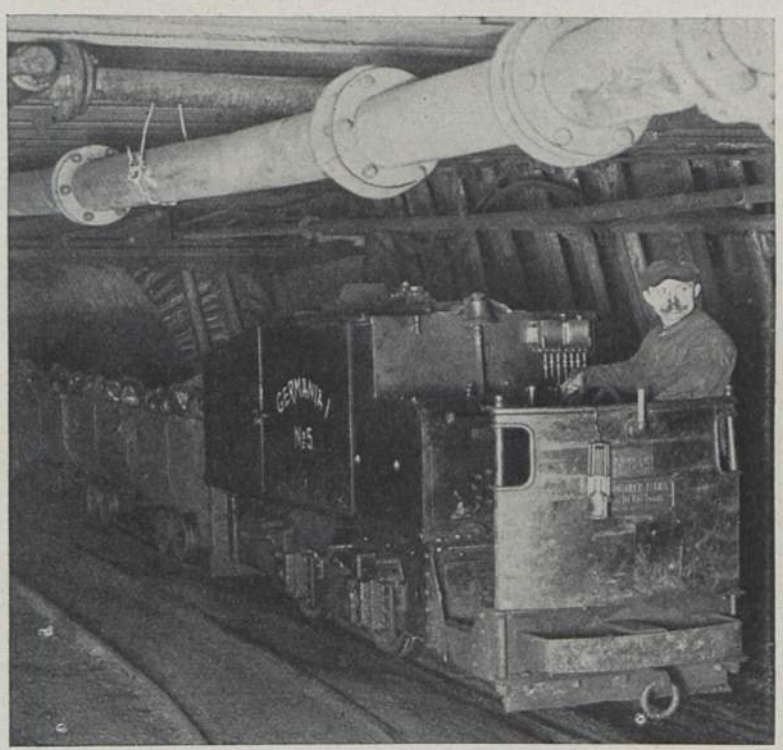
Unsorgfältige Herstellung würde sich bei dem sehr hohen Zylinderdruck bald rächen. Ein feinmechanischer Teil ist insbesondere das Einblase-Ventil mit der Nadel, welche die Eröffnung nach dem Zylinderinneren im richtigen Augenblick bewirkt (Bild 596). Das Ventil ist ein schlankes Rohr, in dem die unten kegelförmig angeschliffene Nadel einen Ringraum freiläßt. Dieser Ringraum steht immer unter dem Druck der Einblaseluft. Der Brennstoff wird von seiner Pumpe durch ein seitliches Rohr und eine daran anschließende Bohrung eingebracht, und zwar stets genau in solcher Menge, wie sie für die nächste Füllung notwendig ist. Daß der Regler diese Menge bestimmt, wurde bereits gesagt. Der Brennstoff verteilt sich auf den Platten, die im Grund des Ventilgehäuses angebracht und vielfach durchbohrt sind. Die Löcher sind gegeneinander versetzt, damit das Öl nicht ohne Widerstand durchgeblasen werden kann. Wenn die Nadel durch die Steuerung der Maschine angehoben wird, stäubt der Brennstoff unter dem Druck der Einblaseluft durch das mit Kanälen versehene kegelförmige Ansatzstück unter den Platten durch den Mund des Ventils in den Zylinder.

Das Fehlen der Zündvorrichtung gibt dem Diesel-Betrieb eine besondere Sicherheit. So wenig wie Vorzündungen gibt es bei ihm Fehlzündungen. Bei Anwendung stark teerhaltiger Brennstoffe pflegt die elektrische Zündeinrichtung von Verpuffungs-Maschinen zuerst den Dienst zu versagen, weil ihre Arbeit durch Verrußen gestört wird. Gerade aus diesem Grund ist es besonders wichtig, daß der Diesel-Motor ein so empfindliches Hilfswerkzeug nicht besitzt. Denn neben der guten Wärme-Ausnutzung ist die Fähigkeit, auch sehr schwere, stark rußende Öle als Brennstoff benutzen zu können, seine Haupttugend.

Gas vermag die Maschine als Betriebsstoff nicht zu verwenden, weil die Öffnungszeit des Einblaseventils nicht genügt, um ausreichende Mengen dieses allzu „dünnen" Stoffs einzuführen. Auch Benzin und Benzol eignen sich nicht, weil sie allzu heftig verpuffen würden. Die billigen Schweröle allein sind die geeignete Speise für die Maschine.

Bei seinen Versuchen in Augsburg ging Diesel vom Petroleum aus. Soll die Verpuffungsmaschine mit diesem Öl gespeist werden, dann muß der Vergaser geheizt werden, weil erst dann die Verdunstung des Petroleums beginnt. Wenn das Leuchtöl aber kalt aus dem Einblaseventil des Diesel-Motors in die hocherhitzte Luft im Zylinder gelangt, dann verbrennt es sofort. Und das gleiche geschieht bei der Einführung aller Schweröle, die aus dem Rohöl, dem Steinkohlen- und Braunkohlenteer, stammen. Sämtliche früher genannten Stoffe, Gasöl und Paraffinöl, Teeröl, das ungereinigte Rohöl und sein letzter Rückstand, das Masut, ja sogar der Teer selbst, nachdem er dünnflüssig gemacht worden ist, verbrennen im Zylinder des Diesel-Motors. Die hieraus bereiteten Nebel würden, mit der kalten Luft der Verpuffungsmaschine gemischt, ihre schweren, schmierigen Bestandteile auf Ventile und Zylinderwandung niederschlagen und rasch den Betrieb hindern.

Bei Anwendung der ganz schweren Öle und des Teers beim Diesel-Motor ist es freilich notwendig, ihnen jedesmal ein Tröpfchen Zündöl, zum Beispiel Gasöl, vorauszuschicken, wodurch die Verbrennung eingeleitet wird. Das macht aber gar keine Schwierigkeiten, wenn das Einlaßventil mit einer passenden Sonder-Einrichtung versehen ist.

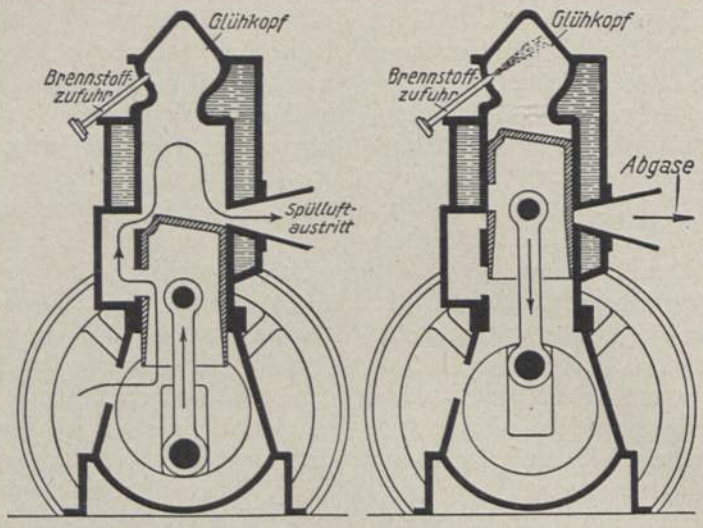



608. Grubenlokomotive mit Diesel-Motor
Gasmotorenfabrik Deutz, Köln-Deutz

Teeröle sind in Deutschland nun in sehr großer Menge zur Verfügung, da unser Land ja an Steinkohle und Braunkohle reich ist. Sie sind weit wohlfeiler zu haben als das Benzol, so daß der Diesel-Motor ganz besonders in deutschen Landen günstigste Arbeitsgelegenheit vorfindet.

Auch das aus deutschen Schiefern gewonnene Öl ist verwendbar und desgleichen Fett-Flüssigkeit, die aus Pflanzen und Tierkörpern stammt. Diesel-Motoren können auch mit Palmöl, Rizinusöl, Erdnußöl und selbst mit Fisch-

tran betrieben werden. Die Maschine hat also einen Speisebereich von unerhörter Breite. Volkstümlich ausgedrückt kann man sagen: sie frißt alles. „Teer und Teeröle werden", nach Diesel, „durch sie drei- bis fünfmal besser ausgenutzt als die Kohle in der Dampfmaschine, und so ergibt sich eine viel bessere, wirtschaftlichere Verwertung der Kohle, wenn man sie nicht unter Dampfkesseln auf Rosten in barbarischer Weise verbrennt, sondern zunächst durch Destillation in Koks und Teer verwandelt." Mit Recht führt der Diesel-Motor daher auch den Namen Schwerölmotor, während die Bezeichnung Rohölmotor, die sich leider bereits eingebürgert hat, zu wenig umfassend ist, weil die Technik mit dem Wort Rohöl ja immer nur die aus der Erde gewonnene, nicht auch eine aus Kohle bereitete Flüssigkeit versteht.




609. Schematischer Schnitt durch einen Glühkopf-Motor

Die Kraftöle, welche die Verpuffungsmaschine allermeist verwertet, Benzin und Benzol, sind höchst feuergefährlich. Sie dürfen daher in größeren Mengen nur mit polizeilicher Erlaubnis und in besonders gearteten Schutzbehältern gelagert werden; ihre Aufspeicherung unter bewohnten Räumen wird nicht zugelassen. Die Schweröle aber brennen noch nicht einmal an, wenn man ein entzündetes Streichholz hineinwirft, weshalb Mengen bis zu 10 000 Kilogramm ohne Anmeldung und ohne besondere Vorkehrung auch unter bewohnten Räumen gelagert werden können. Deshalb eignet sich der Diesel-Motor auch vorzüglich als Kraftmaschine, die in Kellerräumen von Theatern, Geschäfts- oder Bürohäusern die Dynamo-Maschine zur Erzeugung elektrischen Stroms dreht, und ganz besonders zum Antrieb von Schiffen. Daß die Öle sich weit leichter und bequemer in Eisenbahnwagen befördern lassen als Kohle, ist eine angenehme Begleiterscheinung.

Das Wärmestrom-Diagramm eines Diesel-Motors auf Bild 599 ist ohne weitere Erklärung verständlich.

Im ersten Abschnitt ihres Lebens war die Diesel-Maschine ein ortsfester Motor, der nicht mehr als 150 Pferdestärken zu leisten vermochte. Dann wurden mehrere einfachwirkende Zylinder nebeneinander gesetzt, und die Leistungsfähigkeit der Einheit wuchs auf einige hundert Pferdestärken (Bild 603). Jetzt entwickelt der Groß-Diesel-Motor, wenn er mit zweiseitig geschlossenen Zylindern im Doppelt-Viertakt und mit Kolben-Kühlung in ganz ähnlicher Weise wie die Hochleistungs-Verpuffungs-Maschine arbeitet, bis zu 1200 Pferdestärken in Einem Zylinder. Die wirkungskräftigsten der Diesel-Maschinen aber werden heute für Zweitakt, sowohl einfach- wie doppeltwirkend, gebaut. Die konstruktive Durchbildung ist nun sehr einfach, die Regelung der Drehzahl und die Umsteuerung sind sehr bequem.

Der Zweitakt-Betrieb bei Diesel-Motoren ist der entsprechenden Ausbildung der Verpuffungsmaschine gleichfalls sehr ähnlich (Bild 600). Wie dort zum Beispiel bei dem Körting-Motor wird für den Einlaß nach wie vor Ventilsteuerung, für den Auspuff ein Schlitzkranz verwendet, den der überschleifende Kolben öffnet und schließt.

Wir beginnen beim zweiten Takt, der während einer halben Umdrehung der Kurbelwelle abläuft. Es befindet sich bereits hochverdichtete Luft im Zylinder; durch das unverändert gebliebene Einblaseventil wird Brennstoff eingespritzt, die Verbrennung geht vor sich, der Kolben wird vorwärts getrieben. Nachdem er etwa $^6/_7$ seines Laufs zurückgelegt hat, werden die Auspuff-Schlitze geöffnet, die unverbrannten Gase stürzen hinaus. Nun öffnen sich beim Beginn des ersten Takts die Luftventile, aus denen Luft von geringem Überdruck einströmt, den Zylinder freispült und zugleich mit frischer Luft füllt. Zurückgehend verdichtet der Kolben die Luft auf 35 Atmosphären, und von neuem tritt nun das Einblaseventil in Tätigkeit.

Das Zweitakt-Verfahren kann sich hier mit viel günstigerer Wirkung abspielen als beim Verpuffungsmotor, weil nicht die Gefahr besteht, daß Brennstoff ungenutzt durch den Zylinder geht. Dort muß ja Gemisch eingelassen werden, wenn noch die Auspuffschlitze offen sind, hier aber strömt während der Spül- und der Ladeperiode, die zusammenfallen, ausschließlich Luft ein.

Freilich ist es notwendig, daß ein Zweitakt-Diesel-Motor drei Pumpen besitzt: neben dem Brennstoff-Förderer und dem Hochdruck-Kompressor für die Einblaseluft noch eine Pumpe, welche die Spül- und Ladeluft mit wenig Überdruck über die Atmosphäre liefert. Eine Doppelt-Zweitakt-, also Eintakt-Dieselmaschine sieht recht verwickelt aus, sie ist aber trotz ihrer zahlreichen Pumpen und den vielen Vorrichtungen für das Anlassen, Regeln und Umsteuern doch einfach genug, um bei aufmerksamer Bedienung ihren Dienst durchaus zuverlässig verrichten zu können.

Professor Junkers, der, wie wir wissen, bereits an der Oechelhäuser-Maschine mitarbeitete, hat einen Zweitakt-Dieselmotor (Bild 601) mit gegenläufigen Kolben geschaffen, dessen Bau sich sehr eng an jene heute veraltete Verpuffungsmaschine anlehnt.

Wir sehen auf Bild 602 wiederum den glatten, an beiden Seiten offenen Zylinder mit den Kolben, deren einer an der Mittelkurbel der Hauptwelle angreift, während der andere mittels Querhaupt und Treibstangen mit den beiden Seitenkurbeln in Verbindung gebracht ist. Bei Oechelhäuser waren drei Schlitzkränze vorhanden für Lufteinlaß, Gaseinlaß und Auspuff, die Junkers-Maschine hat nur zwei Schlitzkränze, dafür aber noch das ja unvermeidliche Einblase-Ventil. Wenn beide Kolben die innerste Stellung einnehmen, also den geringsten Abstand voneinander haben, wird der Brennstoff in die hochverdichtete Luft eingeblasen. Die Kolben gehen durch den Verbrennungsdruck auseinander, und der untere Kolben legt ein Stück vor Hubende den Auspuff-Schlitzkranz frei. Bald darauf öffnet der andere Kolben die Lufteinlaß-Schlitze, der Zylinder wird gespült und neu geladen.

Auch hier sind Brennstoff-Verluste nicht möglich. Die Maschine arbeitet mit sehr gutem Nutzeffekt, da der Verbrennungsraum eine besonders günstige Form besitzt. Der

Massenausgleich durch die entgegengesetzt laufenden Kolben mit ihren Gestängen ist wiederum vorteilhaft. Junkers-Maschinen werden auch in Tandem-Ausbildung und sowohl stehend wie liegend gebaut. Man braucht sie auch zum Antrieb von Schiffen, für welche die Diesel-Maschine immer größere Wichtigkeit gewinnt.

Da der Diesel-Motor heute gestattet, seine Umlaufzahl und damit die Drehzahl der Schiffsschraube in ausreichendem Umfang, wenn auch nicht so weit wie bei Dampfmaschinenbetrieb zu regeln, da er ferner umsteuerbar ist, so wird die Raumersparnis, die durch den Fortfall der Kesselanlage entsteht, gern ausgenutzt. Über den Diesel-Motor als Schiffsmaschine ist in Band III auf den Seiten 178 bis 181 bereits gesprochen worden. Es sei wiederholt, daß sehr große Diesel-Maschinen in den deutschen Unterseekreuzern (Bild 605) eingebaut waren; die Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg hat hierfür Einheiten bis zu 3000 Pferdestärken geliefert. Heute werden bereits Diesel-Motorschiffe gebaut, deren Maschinen 28 000 Pferdestärken in 4, ja sogar in 2 Einheiten entwickeln.

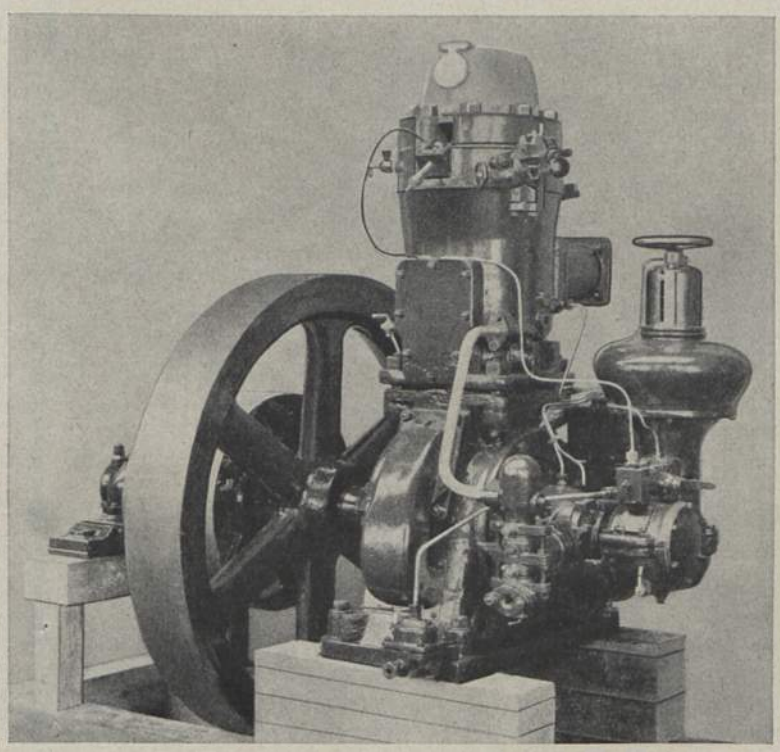
Für elektrische Großkraftwerke, in denen ja heute Riesenkräfte konzentriert sind, kann die Diesel-Maschine vorläufig längst nicht so mächtige Aggregate zur Verfügung stellen wie die Dampfmaschine. Eine Dampfturbinen-Einheit leistet, wie wir ja bereits öfter gehört haben, bis zu 100 000 Pferdestärken. Der größte aller bisher gebauten Diesel-Motoren gibt 15 000 Pferdestärken her (Bild 606). Er wurde von Blohm & Voß in Hamburg für die Hamburgischen Elektrizitätswerke hergestellt und arbeitet in deren Kraftwerk Neuhof. Die Maschine, die 23,4 Meter lang, 4,3 Meter breit und 11,8 Meter hoch ist, hat 9 Zylinder, die im doppeltwirkenden Zweitakt-Verfahren, also praktisch im Eintakt, betrieben werden. Der Zylinderdurchmesser beträgt 86 Zentimeter.

Der Diesel-Motor erfuhr eine sehr bedeutende, grundlegende Verbesserung, als es gelang, die Einspritzung des Brennstoffs ohne Druckluft zu bewirken. Der Kompressor mit seinem mehrstufigen Zylinder, dem Speichergefäß für die hochverdichtete Luft und deren Leitungen, bedeutete stets eine Erschwerung des Betriebs. Der kompressorlose Diesel-Motor (Bild 604) ist leichter an Gewicht, einfacher in der Konstruktion und verlangt weniger Anlagekosten. Neben dem mechanischen Wirkungsgrad ist bei ihm aber auch der thermische Wirkungsgrad verbessert, da das Eindringen der kalten Luft beim Einspritzen in den Zylinder vermieden und damit der Treibölverbrauch verringert wird.

Das Einspritzen des Brennstoffs, der selbstverständlich nach wie vor durch eine Pumpe eingebracht werden muß, geschieht hauptsächlich auf drei verschiedene Arten. Es gelingt, den Brennstoff mit sehr hohem Druck seiner Förderpumpe ohne Luftzusatz so in den besonders geformten Verbrennungsraum einzubringen, daß er ausreichend zerstäubt. Beim Vorkammer-Verfahren gelangt das Öl zunächst in einen besonderen Zylinderraum, die Vorkammer, in dem sich während der Füllungszeit stets eine ganz bestimmte Menge verdichteter Luft befindet. Sie reicht nur aus, um einer geringen Ölmenge das Verbrennen zu gestatten, und durch die hierbei sich entwickelnden hochgespannten Gase wird die restliche Brennstoffmenge in den Hauptzylinderraum geschleudert, wobei das Öl beim Durchdringen von Düsen fein zerstäubt. Ein drittes Verfahren nutzt die Bewegungs-Energie von Brennstoff-Strahlen aus. Man läßt zwei aus entgegengesetzten Richtungen kommende Strahlen mit sehr erheblichen Geschwindigkeiten aufeinanderprallen und an der Berührungsstelle, wo die Geschwindigkeiten sich summieren, durch Düsenkanäle in den Verbrennungsraum ausstoßen.

Der kompressorlose Diesel-Motor kann die schwersten Öle verbrennen, da bei ihm die Zündung ganz besonders sicher vor sich geht. In der Einfachheit des Baus und der Zuverlässigkeit des Betriebs nähert sich der Schweröl-Motor in dieser Ausführung der Dampfmaschine.

Die luftlose Einspritzung hat dem Diesel-Motor ferner ein ganz neues Gebiet erschlossen, nämlich den Bezirk des Antriebs rascher Fahrzeuge. Man kann nach dem verbesserten Diesel-Verfahren sehr leichte, schnellaufende Maschinen herstellen, die mit den Verpuffungsmotoren in gefährlichen Wettbewerb treten. Bei nur unwesentlich erhöhtem Eigengewicht können die Diesel-Fahrzeug-Maschinen (Bild 607) Petroleum, Gasöl, Paraffinöl, Teeröle jeglicher Art verbrennen. Der Preis der Schweröle beträgt aber nur etwa ein Viertel dessen, was man für Leichtöle, wie Benzin und Benzol, bezahlen muß. Die Bedienung ist ausreichend einfach. Der Dieselbetrieb wird gerade im Bezirk der raschen Fahrzeug-Motoren wahrscheinlich sehr bald große Eroberungen machen. Für schwere Fahrzeuge, Lokomotiven, Lokomobilen, Schlepper, wird er schon seit langem angewendet (Bild 608).



610. Glühkopf-Motor von 28/38 Pferdestärken bei 400 Touren
AEG, Berlin

Bevor der kompressorlose Diesel-Motor zur Verfügung stand, verwendete man für Kleinanlagen Maschinen, die zwar einen höheren Brennstoffbedarf für die Leistungseinheit hatten, aber sehr einfach konstruiert und deshalb billig zu erwerben waren. Sie eignen sich ganz besonders für die Wartung durch Ungeschulte und sind deshalb auch heute noch vielfach in Gebrauch.

Der Glühhauben- oder Glühkopf-Motor arbeitet mit geringer Luftverdichtung im Zweitakt-Verfahren (Bild 609). Der sehr schwache Überdruck, mit dem die Spül- und Ladeluft einströmt, wird in sehr eigenartiger Weise durch

den Arbeitskolben selbst erzeugt, so daß auch diese Maschine keinen besonderen Kompressor, sondern nur eine Brennstoff-Einspritzpumpe braucht. Über dem Zylinder befindet sich eine Haube, die vor Inbetriebsetzung der Maschine durch die Stichflamme einer besonderen Lampe von außen her angewärmt werden muß. Nach dem Anlassen spielt sich alsdann folgendes ab:

Die eingesaugte Luft ist auf höchstens 10 Atmosphären verdichtet. Ihre Erhitzung würde nicht ausreichen, das Öl, das nun eingespritzt wird, zu entzünden. Deshalb wird es gegen die heiße Wand der Glühhaube geschleudert und die Verbrennung hierdurch zuverlässig eingeleitet. Der niedergehende Kolben legt gegen Hubende zunächst den Auspuffschlitz frei, alsdann den Lufteinströmungskanal, aus dem nun Spül- und Ladeluft eindringt, die infolge der eigenartigen Formung des Kolbenkopfs die Abgase sicher verdrängt.

Während des Verdichtungshubs hat der Arbeitskolben in dem allseitig geschlossenen Kurbelgehäuse einen Unterdruck hervorgebracht, so daß durch das Rückschlagventil atmosphärische Luft in das Kurbelgehäuse eingedrungen war. Diese ist beim Niedergang des Kolbens auf 1,3 Atmosphären verdichtet worden, und mit diesem Überdruck gelangt sie in das Zylinderinnere.

Der Nutzeffekt der Glühkopfmaschine ist nicht so gut wie das wirtschaftliche Ergebnis beim echten Diesel-Motor, da die Verdichtung so sehr viel geringer ist. Es muß auch in Kauf genommen werden, daß vor der Inbetriebnahme die Haube 10 bis 15 Minuten lang anzuwärmen ist, bis ihre Wände rotwarm werden. Alsdann kann man die Lampe löschen, da die Haube während des Betriebs von selbst heiß genug bleibt. Hingegen entfällt das Einblasen des Brennstoffs gegen sehr hohen Druck im Zylinderinneren.

Die Glühkopf-Motoren werden mit Leistungen von 5 bis 120 Pferdestärken gebaut (Bild 610). Es können sämtliche für die Diesel-Maschine verwendbaren Öle zu ihrer Speisung verwendet werden.

In übersichtlicher Weise hat Gercke, Oberingenieur der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg, die Vorzüge und Nachteile der Dampfkraftanlagen im allgemeinen und der Dampfturbinen im besonderen gegenüber den Vorzügen und Nachteilen der Dieselmaschinen-Anlagen zusammengestellt.

„Vorzüge der Dampfkraft-Anlagen sind:

Unbeschränkte Größe der Einheiten
Geringe Anlagekosten, bezogen auf die Leistungseinheit
Große Überlastbarkeit
Einfachheit der Bedienung und Instandhaltung
Verwendbarkeit aller vorkommenden (festen) Brennstoffe, auch der minderwertigsten. (Es gibt Überlandzentralen mit Rohbraunkohle- und Torffeuerung.)

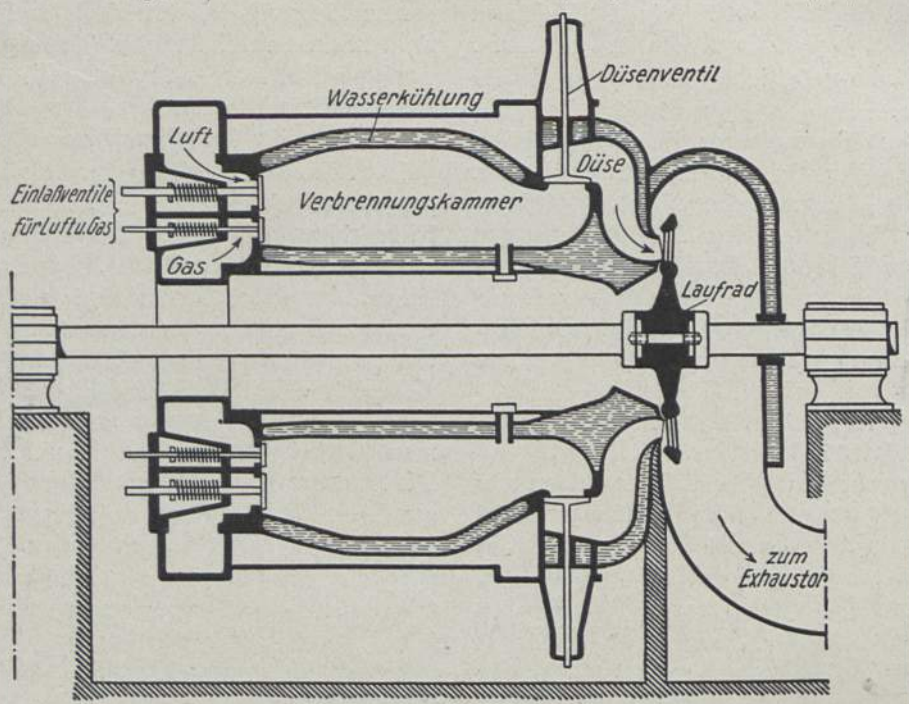
An Nachteilen stehen gegenüber:

Größere Abhängigkeit des Wärmeverbrauchs für die Leistungseinheit von der Sorgfalt der Bedienung und Instandhaltung
Gefahren und Übelstände des Kesselbetriebs, wie Kesselreinigung und -revision, Aschenabfuhr, Flugaschen- und Rauchbelästigung, Brennstoffverluste durch Kesselwechsel (Anheizen und Abbrand)
Großer Kühlwasserverbrauch der Kondensationsanlagen, deren Betriebsverhältnisse von ausschlaggebender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Betriebs sind.

Die Vorteile der Diesel-Maschinen sind:

Hoher thermischer Wirkungsgrad und von der Größe der Maschine und von der Wartung nahezu unabhängiger Wärmeverbrauch für die Leistungseinheit
Rauch- und Geruchlosigkeit
Sofortige Betriebsbereitschaft
Keine Brennstoffverluste durch Anheizen und Abbrand
Keine Flugaschenbelästigung und keine Aschenabfuhr
Anfuhr wesentlich geringerer Mengen von Betriebsmitteln in Tankwagen
Geringer Kühlwasserverbrauch.

Als Nachteile der Diesel-Maschine können eigentlich nur die allgemeinen den Kolbenmaschinen eigentümlichen Eigenschaften angeführt werden, zum Beispiel die Beanspruchung des Fundaments durch die Massenkräfte."

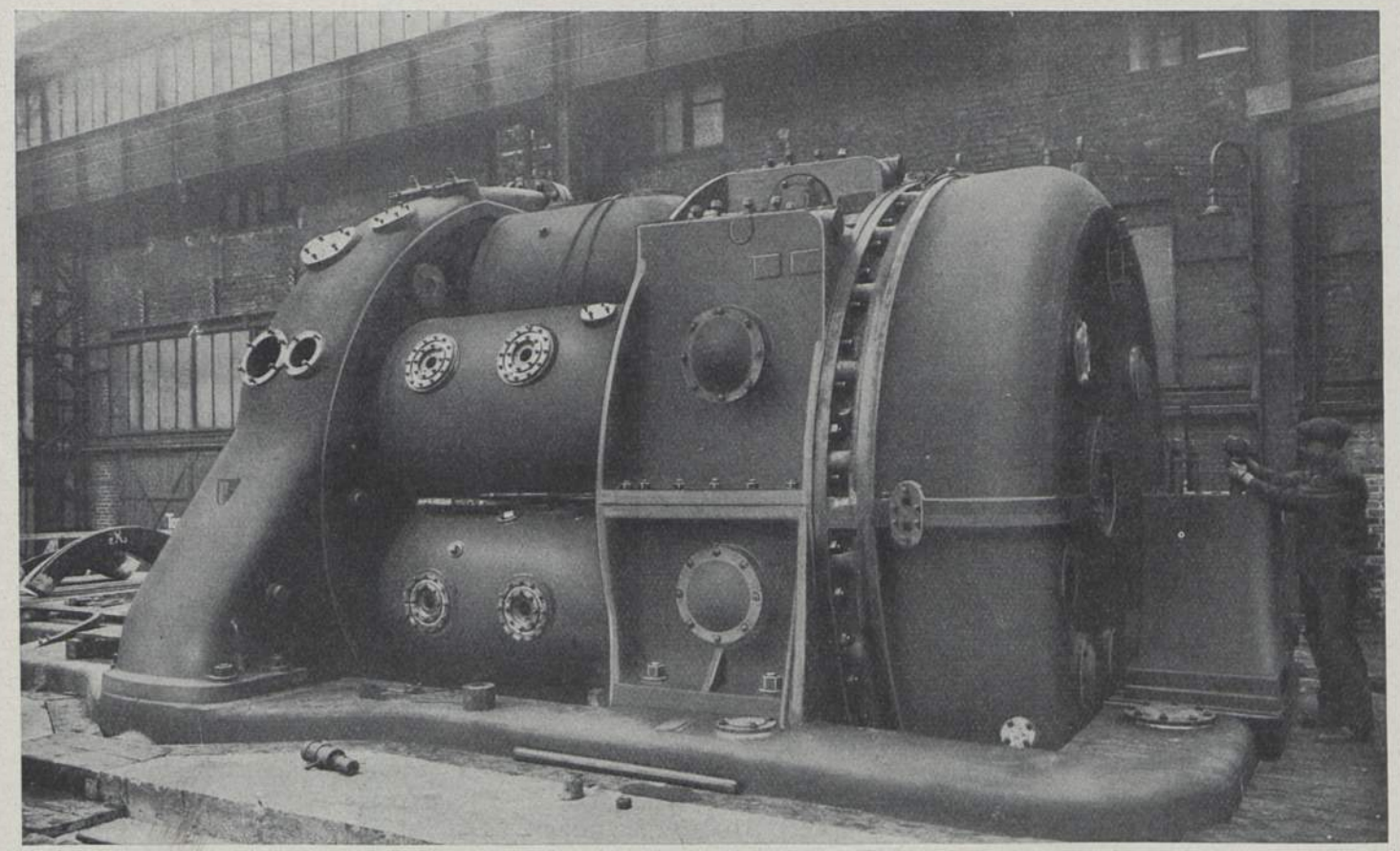


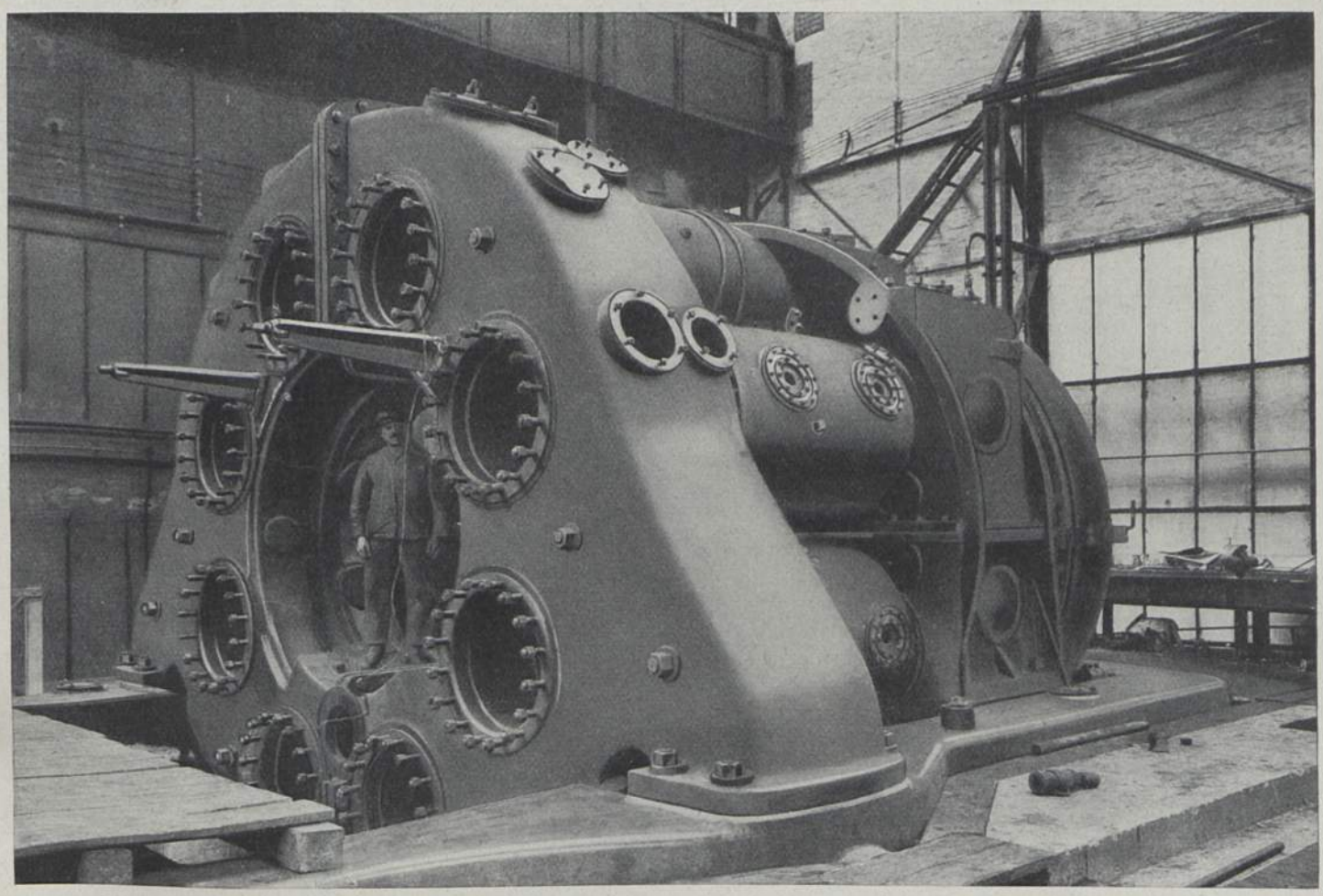

611. Schematischer Schnitt durch eine liegende Holzwarth-Gasturbine

Wir stehen am Ende unserer Betrachtungen über die Maschinen, die bestimmt und geeignet sind, den Krafthunger der Menschheit zu stillen. Der Tisch, der seiner Befriedigung dient, ist nicht sehr reich gedeckt. Nur vier Schüsseln stehen darauf, die eine noch dazu gefüllt mit einer Speise, die den Gaumen wenig reizt.

Wir fanden, daß es als Kraftlieferer nur die Windmotoren, die Wasserkraftmaschinen, die Dampfmaschine und die Gas- und Ölmotoren gibt. Die erste Gattung ist zwar in beträchtlichem Maß freizügig, aber auf das Wehen des Winds kann man sich nicht verlassen, die Einrichtungen solcher Art können nicht dauernd in Betrieb gehalten werden. Die Wasserkräfte sind an bestimmte Orte, an günstige Bildungen der Erdoberfläche gebunden, wo entweder die Natur Wassermassen niedergehen läßt, oder künstliche Stauung ohne Aufwand allzu großer Mittel vorgenommen werden kann. Die Möglichkeit des Einfrierens wirkt hier weiter hemmend. Jederzeit und an jedem beliebigen Ort verwendbar sind nur die Dampf-, die Gas- und Ölmaschinen.

Der großartigste, in gewaltigsten Einheiten ausführbare Kraftlieferer ist heute immer noch die Dampfmaschine in

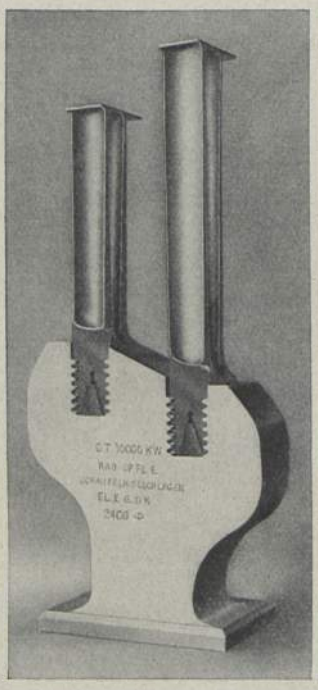




612. Gehäuse einer liegenden Gasturbine von 6800 Pferdestärken bei 1500 Touren
Auf dem unteren Bilde sind sehr deutlich die Öffnungen für die Ventile zu den 8 kranzförmig angeordneten Verbrennungskammern zu sehen.
Holzwarth Gas Turbine Co. of America, Mülheim (Ruhr)

der neuen Form der Turbine. Diese arbeitet besonders günstig, weil das Kraftmittel von ihr in einer Anlage ausgenutzt wird, die sogleich drehende Bewegung hergibt. Diese Tatsache ist seit langem ein Stachel für die Ingenieure, die an der Weiterentwicklung der Gas- und Ölmaschine arbeiten. Da die Kolbenmaschine Vorbild für den Bau dieser Motoren gewesen ist, so lag der Gedanke nahe, auch an die Entwicklung einer Gas- und Ölturbine heranzutreten.

Hier liegt eine der großartigsten Aufgaben für die Technik der Gegenwart. Es handelt sich nicht, wie noch vor fünfzehn Jahren, um ein Zukunftsproblem, denn in allen Ländern wird bereits an der Schaffung einer solchen Maschine gearbeitet, und greifbare, sehr gute Ergebnisse liegen heute schon vor. Auch in diesem Bereich der Kraftbereitung aus Gas und Öl hat Deutschland durchaus die Führung. Überall sind einschlägige Patente in großer Zahl genommen und auch Ausführungen versucht worden. Eine wirklich laufende, mit gutem Nutzeffekt arbeitende und für die Massenausführung geeignete Gasturbine — wie wir fortab der Kürze halber sagen wollen — gibt es aber augenblicklich nur auf deutschem Boden.



613. Laufradschaufeln
für die Holzwarth-Gasturbine

Die Gasturbine ist vorläufig, da die Technik nicht die Art hat, nach den Sternen zu greifen, das Ideal einer Kraftmaschine. Sie allein gibt die Möglichkeit, die aus der Wärme entbundene Kraft so zu führen, daß sie ohne jeden Zeitverlust, ohne Zwischenweg unmittelbar einen Maschinenteil in Drehung versetzt. Ein Turbinenrad, dessen Schaufeln geradeswegs von den Feuerstrahlen beaufschlagt werden — das ist das Höchste, wonach heute vernünftigerweise gestrebt werden kann.

Für den Betrieb einer Dampfturbine muß fernab vom Maschinenkörper Wasser erhitzt werden als ein Zwischenträger, der die Wirkung der Wärme vom Kessel hinüberschafft. Das geschieht nicht umsonst; hoher Lohn muß in Form von Kraftverlust gezahlt werden. Bei der Gasturbine wird die Wärme in der Maschine selbst erzeugt und, kaum entstanden, erreicht die frisch entbundene Kraft sogleich die Radschaufeln. Damit dieser Vorgang sich dauernd und ohne Störung abzuspielen vermag, sind aber Schwierigkeiten zu überwinden, mit denen verglichen die Mühen bei jedem anderen Kraftmaschinenbau ein Spiel sind.

Der Grundgedanke für die Konstruktion der Gasturbinen ist folgender (Bild 611).

In Kammern, die als Kranz vor dem Turbinenrad angeordnet sind, wird ein Gemisch von Gas und Luft (oder von Ölnebel und Luft) eingeführt, von je einer Zündvorrichtung in Brand gesetzt, worauf die hochgespannten Gase durch Düsen ausströmen und ihre bedeutende Geschwindigkeit an die Schaufeln des unmittelbar vor den Düsenmündungen angeordneten Rads abgeben. Dieses ist gerade so gebaut und grundsätzlich ebenso beschaufelt wie das Rad einer Curtis-Turbine. (Siehe zum Beispiel Bild 467 auf Seite 270.)

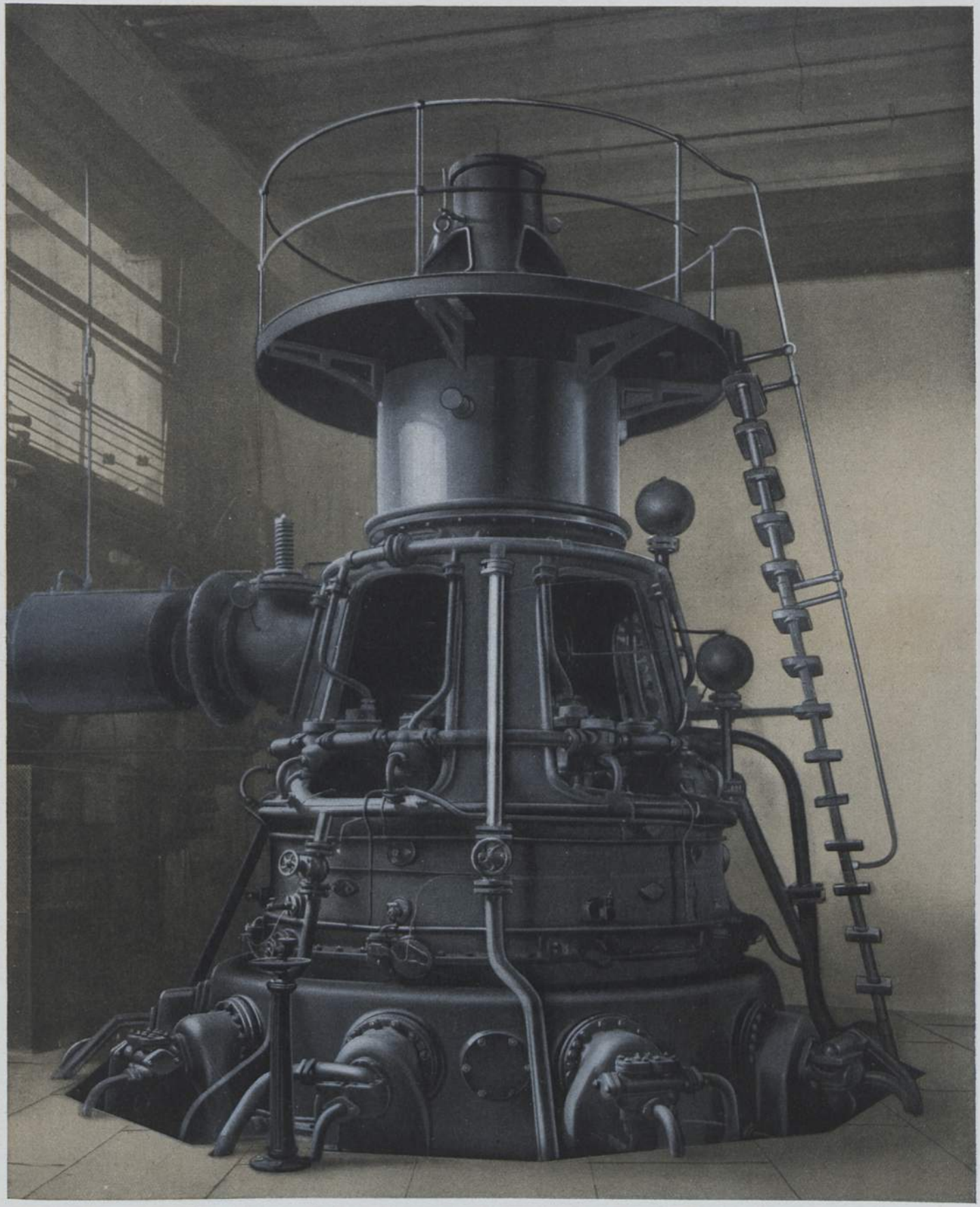
Es sei hier sogleich bemerkt, daß Druckstufen bei der Gasturbine nicht ausführbar sind (ebensowenig wie Verbundwirkung bei der Gas-Kolbenmaschine), wohl aber können Geschwindigkeitsstufen angewendet werden. Das Rad trägt also zur mehrfachen Ausnutzung der Strömungsgeschwindigkeit, welche die aus den Düsen hervorbrechenden Gasströme besitzen, zwei oder drei Laufschaufelkränze (Bild 613), die durch feststehende Leitschaufelkränze voneinander getrennt sind. An Stelle des Kondensators befindet sich an der abgekehrten Seite der Gasturbine ein Exhaustor, der die Abgase aus dem Gehäuse saugt.

Am schönsten wäre es nun, wenn die Gase aus jeder Düse dauernd strömten, also eine ununterbrochene Beaufschlagung bewirkten, wie das bei der Dampfturbine der Fall ist. Eine solche Bauart ist vielfach angestrebt worden und wird auch heute noch versucht. Die erwünschte Wirkung wäre dadurch zu erreichen, daß man in jede Kammer dauernd Luft und Gas im richtigen Verhältnis einströmen ließe, für fortwährende Verbrennung sorgte und so immer gleichen Druck in der Düse aufrecht erhielte. Die Gleichdruck-Verbrennung, die in den Diesel-Maschinen absatzweis während des Bruchteils eines Hubs auftritt, wäre damit in eine Dauererscheinung verwandelt. Bis heute ist es aber noch niemandem gelungen, dieses höllische Verfahren durchzuführen.

Es muß so genannt werden, weil dabei in jeder Kammer ständig eine Temperatur von 1500 bis 2000 Grad herrschen würde. „Es ist nicht zuviel gesagt," führt Schüle in einem Vortrag aus, „wenn man einen Verbrennungsraum mit einer solchen Dauertemperatur in naher Verbindung mit einer umlaufenden Maschine als ein mit den heutigen Mitteln kaum befriedigend lösbares technisches Problem kennzeichnet. Ein solcher Raum wäre nichts anderes als eine Gas- oder Ölfeuerung, die unter dem hohen Druck von 10 bis 15 Atmosphären arbeiten müßte." Bei der Kolbenmaschine dürfen so hohe Hitzegrade unbedenklich angewendet werden, weil sie ja nur immer für kurze Zeit auftreten, ständig mit weit niedrigeren Temperaturen abwechseln. Alsdann genügt Wasserkühlung der Wände, um Formänderungen zu verhüten.

Damit ist aber auch der Weg gegeben, der zur Erkenntnis führt, welcher Prozeß mit guter Aussicht auf Erfolg in den Kammern einer Gasturbine angewendet werden kann. Auf den Gleichdruck muß verzichtet werden; es sind Einzelverpuffungen anzuwenden. Auf jede Verbrennung, die Hochhitze liefert, muß immer wieder eine kühlere Periode folgen. Alsdann halten die Kammerwände, die sich auf eine mittlere Temperatur einstellen, bei Anwendung von Wasserkühlung stand. Die Kühlhaltung der Düsen bleibt auch jetzt noch schwierig, und die Radschaufeln müssen mit größter Sorgfalt hergestellt sein. Sind sie doch hier einem weit böseren Hitze-Ansturm ausgesetzt als in der Dampfturbine. Sie kommen aber, bei nicht dauernder Beaufschlagung, indem sie sich drehen, immer wieder in kühlere Räume, so daß auch sie die ihnen bei der Herstellung gegebene Form trotz hoher Anstrengung dauernd zu bewahren vermögen.

Seit langen Jahren arbeitet Holzwarth in der Holzwarth Gas Turbine Co. of America zu Mülheim a. d. Ruhr an der Entwicklung der Gasturbine. Seinen bedeutenden konstruktiven Fähigkeiten stehen hier alle Mittel der heutigen Technik zur Verfügung. Beträchtliche Zeit bereits läuft eine Holzwarth-Turbine in Mülheim, die vorläufig noch kein Handelsgegenstand ist, sondern immer weiter ver-



Stehende Versuchs-Gasturbine für 1000 Pferdestärken bei 3000 Touren
Holzwarth Gas Turbine Co. of America, Mühlheim (Ruhr)

POLITECHNIKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA

vollkommnet wird. Sie hat eine stehende Welle, die angetriebene Dynamo-Maschine liegt also senkrecht über dem Kraftbereiter (Tafel XXI). Bei 3000 minutlichen Umdrehungen leistet die Maschine 1000 Pferdestärken. Eine liegende Maschine, deren Leistung halb so groß ist, befindet sich gleichfalls im Betrieb. An Hand der Schnittzeichnung einer solchen Maschine und zweier Ansichten (Bilder 611 und 612) betrachten wir die Betriebsvorgänge.

Im hinteren Teil der Turbine sind acht Verbrennungskammern von ziemlich langgestreckter Form angeordnet. Eine Luft- und eine Gaspumpe können durch zwei getrennte Einlässe jede einzelne Kammer beschicken. Eine Steuerungseinrichtung sorgt dafür, daß in jeder Sekunde einmal Füllung jeder Kammer mit einem Gemisch erfolgt, das auf 3 bis $3\frac{1}{2}$ Atmosphären vorverdichtet ist. Während der Füllung bleibt das Einlaßventil, das zwischen jedem Kammermund und der zugehörigen Düse angeordnet ist, geschlossen. Sobald aber das Gemisch durch mehrere tief in den Raum hineinreichende Hochspannungskerzen gezündet ist, wird das Ventil durch die Steuerung aufgestoßen, die hochgespannten Gase strömen zur Düse, setzen die ihnen innewohnende Energie dort in Geschwindigkeit um und beaufschlagen die Radschaufeln. Die Steuerung hält alsdann das Ventil noch weiter offen, so daß kalte Spülluft durch Kammer und Düse gehen und auch die Radschaufeln kühlen kann.

Die Verpuffung, bei der eine Temperatur von annähernd 2000 Grad entsteht, dauert nur $^2/_{10}$ Sekunden. Für Spülen und Füllen mit kaltem Gemisch stehen also bei jedem Spiel $^8/_{10}$ Sekunde zur Verfügung, und hierdurch wird bewirkt, daß die Durchschnittemperatur in der Kammer nicht mehr als 400 bis 500 Grad beträgt. Die Anwendung einer Luftspülung ist Ursache, daß das Kühlwasser, welches durch die Ummantelung der Kammern fließt, nur einen geringen Teil der Verpuffungswärme fortzunehmen braucht. Diese kommt also zu fast völliger Auswirkung auf die Radschaufeln. Die Luftspülung verursacht keinen Wärmeverlust, da sie ja erst nach der Auswirkung der Verpuffung einsetzt.

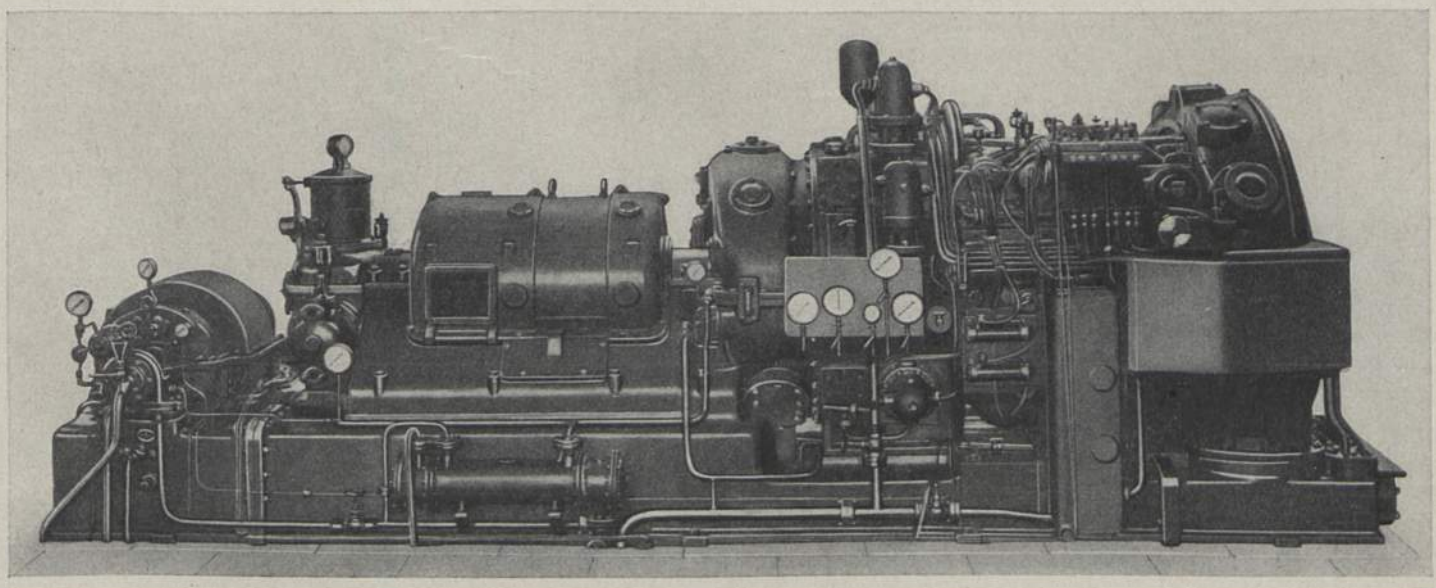
Die Zeitpunkte der Gemischzündungen in den acht Kammern sind gegeneinander versetzt, das Laufrad erhält also nahezu dauernd Kraftanstöße. Seine durch die Feuerstrahlen hart beanspruchten Schaufeln (Bild 613) sind kräftig aus weichem Eisen ausgeführt, das sich gut bewährt hat.

Der thermische Wirkungsgrad der im Betrieb erprobten kleineren Holzwarth-Turbine mit senkrechter Achse ist, trotz sehr geringer Gemisch-Verdichtung, heute schon fast so gut wie bei einer Gas-Kolbenmaschine. Der mechanische Wirkungsgrad ist trotz der Notwendigkeit des Betriebs besonderer Ladepumpen günstiger. Über das Erreichte sagt Schüle:

„Nach den von mir vorgenommenen Versuchen hat die Holzwarth-Gasturbine hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Energie-Erzeugung das Gebiet der Dampfturbine erreicht. Die im Gang befindlichen Versuchsarbeiten zeigen eine aufsteigende Entwicklung, und die Zeit, wo die Gasturbine die höchste Stufe der Dampfturbine erreichen und überschreiten und somit eine Mittelstellung zwischen der Dampfturbine und Gas-Kolbenmaschine einnehmen wird, dürfte nicht mehr fern sein. Seitens der Maschinenfabrik Thyssen wird jedenfalls alles darangesetzt, um die Holzwarthsche Gasturbine zu einer betriebssicheren Kraftmaschine von höchster Wirtschaftlichkeit zu entwickeln, und damit ein neues, mächtiges Glied in die Energiewirtschaft einzufügen, ein Erzeugnis rein deutscher technischer Arbeit, von dem wir hoffen, daß es der Welt und insbesondere unserem deutschen Vaterland zum Segen gereichen wird."

Alle Brennstoffe, die zum Betrieb der Gas- und Ölmaschinen mit Kolben dienen, also Leuchtgas, Generatorgas, Leichtöle und Schweröle können auch zur Speisung der Holzwarth-Turbine benutzt werden. Die ungeheuren Schwierigkeiten, die bei ihrer Entwicklung bisher überwunden worden sind und für die weitere Ausbildung noch bewältigt werden müssen, konnten in unseren Ausführungen nur angedeutet werden. Bild 614 zeigt eine Ölturbine mit Dynamo auf dem Versuchsstand.

Die Grundlage, auf der das gewaltige Gebäude der heutigen Kraftmaschinentechnik in der Hauptsache errichtet ist, wird durch die Kohle und das Rohöl gebildet; sie allein gestatten den Betrieb freizügiger Kraftmaschinen. Diese Bodenschätze aber sind nicht unerschöpflich, sie werden, wenn der Abbau in so starkem Maß weiter steigt wie in den letzten Jahrzehnten, vielleicht schon in den nächsten Jahr-



614. Öl-Turbodynamo auf dem Versuchsstand
Holzwarth Gas Turbine Co. of America, Mülheim (Ruhr)

hunderten erschöpft sein. Neubildung kann nicht stattfinden, da hierzu geologische Zeitabschnitte von unabsehbarer Dauer notwendig sind, hunderttausende, ja vielleicht sogar Millionen Jahre.

Diese Tatsache ist erschreckend. Aber ein Hoffnungsstrahl blitzt auf.

Auf Seite 355 wurde nur so ganz nebenher erwähnt, daß Diesel-Maschinen auch mit pflanzlichen und tierischen Ölen gespeist werden können. Dadurch aber erwächst die Möglichkeit für die Menschheit, kraftliefernde Stoffe alljährlich in großen Mengen neu erstehen zu lassen. Es braucht nur der Anbau fettliefernder Pflanzen und die Zucht von Tieren betrieben zu werden, deren Körper geeignete Fette enthalten. Dieser Gedanke enthält einen großen Trost. Die krafthungrige Menschheit wird sich immer wieder an einen vollbesetzten Tisch setzen können, so lange, bis sie den Weg zu ihm nicht mehr notwendig hat!

Das Rohöl und die Kohle sind letzten Endes aufgespeicherte Sonnenwärme. Einstmals aber werden unsere Nachkommen imstande sein, an Stelle der konservierten Wirkung des hohen, lebenspendenden Sterns seine frisch niedergehende Strahlung unmittelbar auszunutzen. Die Kraftmaschinen der Zukunft werden durch die Sonne selbst unter Ausschaltung jedes Zwischenträgers gespeist werden!

# Der elektrische Starkstrom

Von

Ingenieur Hans Dominik

# 31. Die Entwicklung der Starkstromtechnik

Das anbrechende 19. Jahrhundert traf die europäischen Physiker bei emsiger Arbeit, auf den grundlegenden Entdeckungen der beiden Italiener Luigi Galvani und Alessandro Volta weiterzubauen. Fast jedes Universitätslaboratorium verfügte ja über jene zuerst von Volta angegebene, aus Kupfer- und Zinkplatten zusammengesetzte Säule, aus der sich wenigstens für kurze Zeit starke galvanische Ströme gewinnen ließen. Mit tausend Mitteln und Mittelchen versuchte man es allerorten, die Leistungsdauer dieser primitiven Stromquelle weiter zu verbessern und von der wenig konstanten Säule allmählich zu konstanten, d. h. einer Dauerleistung fähigen galvanischen Elementen zu gelangen.

Schon waren die Erfolge, die man mit diesen Stromquellen auf thermischem und chemischem Gebiete erzielte, recht bedeutend. Schon hatte der englische Physiker Sir Humphry Davy den blendenden, zwischen zwei Kohlenspitzen übergehenden elektrischen Lichtbogen entdeckt. Schon war es mit Hilfe dieser Säulen und Batterien gelungen, die sogenannten Erden, wie Kalk, Kali und Natron, die bis dahin als einfache Stoffe galten, in ihre Metalle Kalzium, Kalium, Natrium und in Sauerstoff zu zerlegen. So wenig man auch bisher noch über das eigentliche Wesen dieser neuentdeckten galvanischen Elektrizität wußte, um so mannigfacher waren doch bereits die Wirkungen, die man mit ihr erzielen konnte.

In diese Lage der Dinge platzte im Jahre 1820 eine kleine Schrift des Kopenhagener Physikprofessors Hans Christian Oerstedt hinein, die den Titel trug: „Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam“ (Versuche über den Einfluß des elektrischen Stromes auf die Magnetnadel). Durch einen glücklichen Zufall hatte Oersted den Elektromagnetismus entdeckt, der in seinen praktischen Auswirkungen dem nächsten Jahrhundert das Gepräge geben sollte. Oersted wollte die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des elektrischen Stromes in einem Drahte messen und hatte den Draht zufälligerweise auch über eine im Laboratorium befindliche Magnetbussole gelegt. Mit Verwunderung sah er, daß die Magnetnadel jedesmal in Bewegung geriet und sich senkrecht zum Drahte stellte, wenn er den Strom schloß. Von dieser Beobachtung bis zu einer genauen Erforschung des Einflusses, den ein stromdurchflossener Leiter auf eine frei schwebende Magnetnadel ausübt, war es bei einem Naturforscher vom Range Oersteds begreiflicherweise nur ein Schritt, und die vorstehend zitierte Schrift teilte diese Entdeckungen der Öffentlichkeit mit. Sie wirkte revolutionierend. Zwischen der neuen geheimnisvollen Naturkraft der galvanischen Elektrizität und zwischen dem seit Jahrtausenden bekannten, aber immer noch geheimnisvollen Magnetismus bestanden also enge Zusammenhänge! Sie weiter zu erforschen und völlig zu klären, wurde die Aufgabe der nächsten Forschergeneration.

615. Hans Christian Oersted
Der Entdecker des Elektromagnetismus. (1777—1851)

Zwei Namen müssen vornehmlich genannt werden, wenn wir diese Arbeiten weiterverfolgen, Ampère und Faraday. André Marie Ampère hatte nach einer leidvollen Jugend Trost in der reinen Wissenschaft gesucht und gefunden. Er war seelisch zusammengebrochen, als man seinen Vater während der französischen Revolution guillotinierte. Erst auf den Rat Rousseaus raffte er sich zusammen und warf sich mit aller Kraft auf das Studium der Mathematik und Physik. Als Oersteds Schrift in die Welt flog, war er Professor am Collège de France. Schon 1822 erschien seine erste Veröffentlichung „Receuil d'observation électrodynamique“. Zum erstenmal treffen wir hier auf das Wort elektrodynamisch, das, aus den griechischen Stämmen ἤλεκτρον und δύναμις (die Macht, die Kraft) gebildet, die von elektrischen Strömen nach außen hin ausgeübten Kraftwirkungen bezeichnet. Das Gesamtergebnis der Arbeiten Ampères auf dem Gebiete der Elektrodynamik ist in seinem großen Werk „La Théorie des

Phénomènes électrodynamiques" enthalten, das 1830 erschien und auch heute noch als ein mustergültiges Beispiel experimenteller und theoretischer Untersuchungen gelten darf. Ampère starb 1836, aber er wird unsterblich sein, solange es eine Elektrotechnik gibt, denn sein Name wurde ja für die Bezeichnung der Stromeinheit von dieser Technik übernommen.

Getreu den Anschauungen der damaligen französischen Schule ließ sich Ampère bei seinen theoretischen Untersuchungen durchaus von der Fernwirkungstheorie leiten. Er nahm also an, daß irgendein stromdurchflossener Leiter oder ein bewegter Magnet momentan in der Ferne Wirkungen ausüben kann, ohne den dazwischenliegenden Raum irgendwie zu beeinflussen. Diese Anschauung ist heute zugunsten der zuerst von Faraday aufgestellten und weiter von Maxwell begründeten Nahwirkungstheorie verlassen worden. Aber die Erscheinungen der Elektrodynamik selbst hat Ampère kristallklar erforscht und beschrieben.

Michael Faraday, geboren 1791 zu Newington Butts bei London, war seines Zeichens ein Buchbinder. In seinen Freistunden beschäftigte er sich eifrig mit dem Studium chemischer und physikalischer Werke, wurde 1813 Gehilfe des bereits genannten Sir Humphry Davy und 1827 selbst Professor der Chemie an der Royal Institution in London. Das Ergebnis seiner Arbeiten auf elektromagnetischem Gebiete findet sich in seinem zweibändigen Werk „Experimental researches in electricity", das sich würdig neben das große Werk Ampères stellt.

Der Bildungsgang Faradays brachte es mit sich, daß ihm die reine Mathematik weniger geläufig war. Dafür aber verfügte er über eine geradezu plastische Vorstellungskraft und über den Seherblick des Forschers von Gottes Gnaden, der das innerste Wesen der Dinge erschaut und darzustellen vermag. Von ihm stammen die Begriffe der magnetischen und elektrischen Kraftlinien und Kraftfelder und die genauen Vorstellungen über die wechselseitigen Beeinflussungen dieser Größen. Ohne eine einzige mathematische Formel zu verwenden, hat er die Beziehungen zwischen magnetischen und elektrischen Kräften und die Gesetze der elektromagnetischen Induktion in seinem Werke beschrieben. Weil aber diese Darstellung so ganz anders war als die damals in allen physikalischen Werken gebräuchliche mathematisch-analytische Behandlungsweise, und weil sie überdies an den Fundamenten der zu jener Zeit als unfehlbar geltenden Fernwirkungstheorie zu rütteln wagte, stieß Faraday zunächst auf vielfachen und heftigen Widerspruch. Erst nach seinem Tode erfuhr sein Werk eine glänzende Rechtfertigung. Auch sein Name wurde unsterblich. Ist doch das Farad die Maßeinheit der elektrischen Kapazität geworden.

Sein Landsmann James Clerk Maxwell war es, der den Forschungen Faradays wenige Jahre nach dessen Tode das mathematische Gewand gab. Maxwell, Professor der Physik in London und später in Cambridge, neben Thomson der bedeutendste englische Mathematiker und Physiker des 19. Jahrhunderts, trat vorurteilslos an die Forschungsergebnisse Faradays heran und fand, daß alles das, was dieser in Worten und Sätzen beschrieben hatte, sich leicht und glatt in zwei mathematische Formeln zusammenfassen ließ. So entstanden die beiden Maxwellschen Gleichungen, die das gesamte Gebiet der elektromagnetischen Erscheinungen erschöpfen und umschließen. Jene beiden Gleichungen, die unseren großen deutschen Physiker Helmholtz zu den Worten des Faust begeisterten: „War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?" Jene beiden Gleichungen, auf die man wohl auch das Bibelwort anwandte: „In diesen beiden Geboten hanget das ganze Gesetz und alle Propheten."

Im Jahre 1873 erschien zu Oxford das Werk Maxwells „A Treatise on electricity and magnetism", das heute noch das klassische Lehrbuch für jeden Elektriker ist. Faraday hatte eine zeitliche Ausbreitung der elektromagnetischen Wirkungen im Raume gefordert. Die Theorie Maxwells ging noch einen Schritt weiter. Sie führte den mathematischen Beweis, daß diese Wirkungen sich mit der Geschwindigkeit des Lichtes im Raume ausbreiteten, und daß elektromagnetische und optische Erscheinungen letzten Endes wesensgleich sein müßten. Nicht nur die beiden Naturkräfte der Elektrizität und des Magnetismus erschienen jetzt eng verbunden. Auch jede Lichtquelle konnte nach dieser elektromagnetischen Lichttheorie nichts anderes sein als ein elektromagnetisches Störungszentrum im Raum, von dem elektrische und magnetische Kraftfelder ausgingen. Nicht zu Unrecht sagte man wohl schon damals, daß die Maxwellsche Theorie einen schimmernden Brückenbogen vom elektromagnetischen zum optischen Pfeiler der physikalischen Wissenschaft schlüge.

Aber noch fehlte der letzte experimentelle Beweis für die Wahrheit dieser Theorie, der Nachweis, daß die von elektromagnetischen Strahlern ausgehenden Wellen sich wirklich mit der Geschwindigkeit der Lichtwellen ausbreiteten und den optischen Gesetzen der Brechung und Spiegelung gehorchten. Es war ein Deutscher, Heinrich Hertz, Professor an der Technischen Hochschule zu Charlottenburg, der um das Jahr 1890 diesen Beweis durch eine Reihe glänzender und geistvoller Experimente erbrachte. Er baute als erster einen elektromagnetischen Strahler und zeigte, daß die von diesem ausgehenden elektromagnetischen Wellen sich wirklich in jeder Beziehung wie Lichtwellen verhielten. Im besten Mannesalter riß ihn eine tückische Krankheit von seinen Arbeiten hinweg. Seine Entdeckungen aber bildeten nicht nur den Schlußstein für die Maxwellsche elektromagnetische Lichttheorie. Sie lieferten gleichzeitig auch das Fundament für eine neue große Technik, die Technik des drahtlosen Verkehrs. Auch der Name dieses deutschen Forschers wird weiterleben. Das „Hertz" ist die Maßeinheit für die Frequenz elektrischer Schwingungen.

Betrachten wir nun die Gesetze selbst, welche durch die Arbeiten der vorstehend genannten Forscher ergründet wurden. Nach Faraday befindet sich die Umgebung sowohl eines Magneten wie auch diejenige eines stromdurchflossenen Leiters in einem gewissen Spannungszustande. Es herrschen in ihr magnetische Kräfte, die sich nach Stärke und Richtung zwar von Punkt zu Punkt ändern, aber den ganzen Raum erfüllen. Solche von Kräften durchsetzten Räume bezeichnet man in der Physik als Kraftfelder.

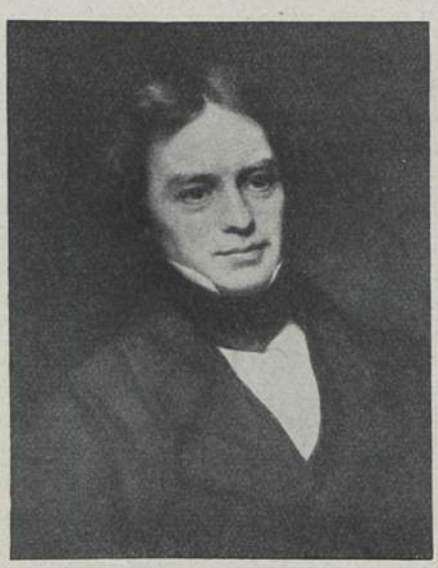
Experimentell läßt sich dieser von Faraday angenommene Spannungszustand mit einfachen Mitteln sichtbar machen. Man legt beispielsweise auf einen Stahlmagneten eine Glasplatte oder einen Karton und streut dann feine Eisenfeilspäne darauf. Unter dem Einfluß des magnetischen Kraftfeldes ordnen sich diese Späne in der Weise, wie die Bilder 620 und 621 es erkennen lassen. In gleicher Weise gelingt der Nachweis in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters, dessen auf diese Weise gewonnenes Kraftlinienbild Bild 623 darstellt.

Faraday hatte in seiner bildhaften Sprache von den Kraftlinien gesagt: Die magnetischen Kraftlinien sind „zyklische Konfigurationen" (in sich geschlossene Linien), die wie gespannte Gummibänder das Bestreben haben, sich zusammenzuziehen, und die sich dort, wo sie in gleicher Richtung nebeneinander

verlaufen, gegenseitig abzustoßen versuchen. Das Treffende dieses Bildes wird wohl klar, wenn man die in Bild 620 gegebene Darstellung des Kraftlinienflusses eines Stabmagneten betrachtet. Da scheinen sich diese Kraftlinien, die ja doch letzten Endes nur gedachte oder mathematische Linien sind, wirklich so körperhaft zu verhalten. Da scheint ihr Verlauf in der Tat durch die beiden einander widerstreitenden Bestreben bestimmt zu sein, einerseits auf dem kürzesten Wege zum Ziele zu kommen und sich andererseits doch möglichst weit von den Nachbarlinien zu entfernen. Da es geschlossene Linien sind, so setzen sie ihren Weg natürlich im Eisen des Stabmagneten selbst fort. Sie verlassen den Stab am Nordpol und kehren am Südpol in ihn zurück. Überall, sagt Faraday, wo eine Kraftlinie das Eisen verläßt, entsteht ein Nordpol, überall, wo sie in das Eisen eintritt, ein Südpol.

616. André Marie Ampère
Der Schöpfer der Elektrodynamik (1775—1836)
Nach dem Stich von Tardieu

617. Heinrich Hertz
bewies experimentell die Richtigkeit der Marwellschen Theorie. (1857—1890)
Phot. Adolf Plesser, Bonn



618. Michael Faraday
Der Erforscher der elektrischen und elektromagnetischen Induktion. (1791—1867)
Nach dem Gemälde von Thomas Phillips

619. James Clerk Marwell
Der Begründer einer mathematischen Elektrizitätstheorie. (1831—1879)
Nach dem Gemälde von Dickinson

Aus dem Corpus Imaginum der Photographischen Gesellschaft, Berlin

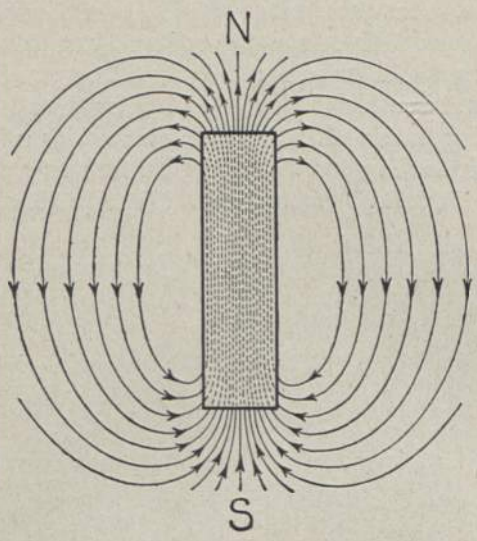
Das Kraftlinienfeld eines stromdurchflossenen Leiters ist wesentlich anders gebaut als dasjenige eines Stahlmagneten. Hier umgeben die Kraftlinien den Leiter in Form konzentrischer in sich selbst geschlossener Kreise. Nirgends treten sie dabei in Eisen ein oder verlassen dasselbe, so daß das Auftreten freier Magnetpole nicht zu erwarten ist.

Nun winden wir den stromdurchflossenen Leiter zu einer Spirale, einem sogenannten Solenoid, Bild 624, zusammen, und im Augenblick können die Kraftlinien ihrer inneren Gummibandnatur folgen. Viele kleine Kreise vereinigen sich zu einem größeren Kreis, die gegenseitige Abstoßung gleichgerichteter Linien kommt hinzu, und so ergibt sich für das stromdurchflossene Solenoid das gleiche Kraftlinienbild wie für den Stabmagneten (Bild 625). Dicht zusammengedrängt durchströmen die Linien das Innere des Solenoids ebenso wie das Innere des Magnetstabes, auf weiten und weiteren Wegen schließen sie sich außen herum. Schiebt man einen Weicheisenstab in diese stromdurchflossene Spule, so müssen die Kraftlinien in ihr diesen Stab der Länge nach durchsetzen, sie müssen an ihm dort, wo sie austreten, einen Nordpol, dort, wo sie wieder eintreten, einen Südpol erzeugen, d. h. dieser Eisenstab muß unter der Wirkung des Solenoids selbst ein kräftiger Magnet, ein Elektromagnet werden. Stellt sich ein Beschauer dabei so, daß von seinem Standpunkt aus der elektrische Strom um den Eisenstab im Sinne des Uhrzeigers fließt, so ist das auf ihn zugerichtete Ende des Elektromagneten der Südpol.

Wir setzen unser Experiment in Gedanken fort und biegen den eisernen Stab mitsamt dem ihn umgebenden Solenoid zu einem in sich geschlossenen Ring zusammen. Jetzt verlaufen die Kraftlinien natürlich vollkommen innerhalb des Eisens. Nirgends treten sie ein oder aus, und nirgends tritt infolgedessen auch ein freier magnetischer Pol auf. Obwohl wir gerade jetzt, wie sich auf verschiedenen Wegen zeigen läßt, einen ganz besonders starken elektromagnetischen Kraftlinienfluß haben, wirkt der so magnetisierte Eisenring nach außen hin doch scheinbar vollkommen unmagnetisch.

Wir gehen nun einen Schritt weiter und schneiden aus unserem magnetisierten Ring ein kurzes schlitzartiges Stück heraus. Jetzt müssen die Kraftlinien das Eisen an der einen Schnittfläche verlassen, an der anderen wieder hineintreten, es wird also zwei freie Pole geben. Aber bei dieser Gestaltung der Dinge wirkt das Streben der Kraftlinien nach einem kürzesten Weg doch wesentlich stärker als ihre gegenseitige Abstoßung. Sie verlaufen auf diesem kurzen Luftwege fast genau so wie im Eisen selbst, d. h. unter sich parallel gerichtet und gleichmäßig über die Schnittfläche verteilt. Ein derartiges magnetisches Kraftfeld wird homogenes Feld genannt (Bild 626). In der Elektrotechnik spielen solche homogenen Felder eine ganz besondere Rolle.

Bild 627 zeigt ein homogenes magnetisches Kraftfeld, in dem sich ein wagerechter Draht AB befindet, der senkrecht zu sich selber in der Richtung des doppelt gefiederten Pfeiles bewegt werde. Dann entsteht in diesem Draht während der Bewegung eine elektromotorische Kraft, und wenn man die beiden Enden AB des Drahtes durch einen zweiten Draht CD leitend verbindet, ein elektrischer Strom. Faraday sagt darüber: Denkt man sich derart in das magnetische Feld gelegt, daß die Kraftlinien zu den Füßen ein- und zum Kopf heraustreten, und sieht in der Richtung der Bewegung, so ist der in dem Draht fließende Strom stets nach rechts gerichtet. Das ist das Gesetz der elektromagnetischen Induktion. Die Größe der hierbei in dem bewegten Draht induzierten elektromotorischen Kraft ist proportional der Zahl der in der Zeiteinheit von dem Draht geschnittenen Kraftlinien. Sie wird also sowohl der Dichte der Kraftlinien, d. h. der Stärke des magnetischen Feldes, wie auch der Länge des Drahts und der Schnelligkeit der Drahtbewegung proportional sein.

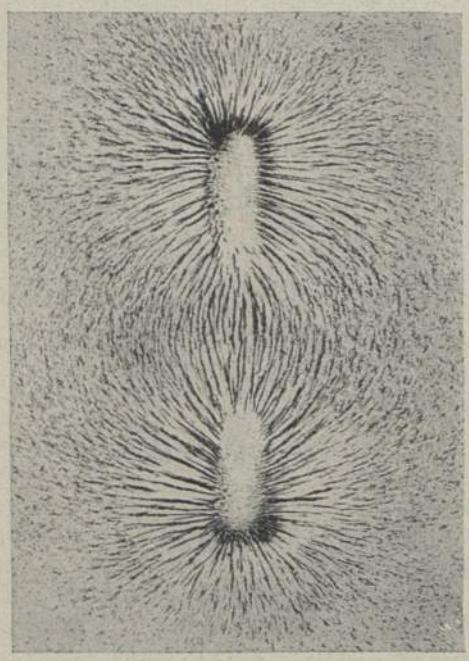



620. Kraftlinienverlauf bei einem Stabmagneten
Die Kraftlinien treten am Südpol in das Eisen hinein, am Nordpol wieder heraus

Jeder elektrische Strom, der in einem Stromkreise fließt, bedeutet eine gewisse Leistung, d. h. die Lieferung einer gewissen Arbeitsmenge in der Zeiteinheit. Die Frage bleibt zu beantworten, woher die Energie des bei unseren Versuchen entstehenden Stromes stammt. Denn das ist ja nach dem Grundgesetz von der Erhaltung der Energie ohne weiteres klar, daß sie nicht aus dem Nichts entsteht, sondern von irgendwoher in das System hineingebracht werden muß. Unser Experiment gibt uns sofort die Antwort auf diese Frage. Solange wir nur den einfachen Draht AB durch das magnetische Feld bewegen, spüren wir keinerlei Widerstand; sobald wir seine Enden durch den Draht ABCD schließen, merken wir dagegen bei seiner Bewegung einen gar nicht unbeträchtlichen Widerstand. Die Erklärung dafür ist leicht gegeben. In dem einfachen Draht entsteht durch die elektromagnetische Induktion zwar auch eine elektromotorische Kraft, aber da der Draht keinen geschlossenen Stromkreis bildet, kann kein Strom fließen, es wird keine elektrische Arbeit geleistet, und infolgedessen braucht man bei der Bewegung des Drahts auch keine mechanische Arbeit in Form von Überwindung eines Widerstandes über eine Wegstrecke aufzuwenden.

Ist der Stromkreis aber geschlossen, dann wird Arbeit geleistet, und dann macht sich das in Form des Widerstandes bemerkbar. Die Bewegung eines zweckmäßig geformten Stromkreises in einem magnetischen Feld gibt uns also die Möglichkeit, durch einfachen Aufwand von mechanischer Arbeit elektrische Arbeit in Form elektrischer Ströme zu gewinnen. Diese aus den Arbeiten Ampères und Faradays entspringende Erkenntnis bedeutete aber nicht nur eine große Vertiefung der Naturerkenntnis, sondern auch eine gewaltige Verstärkung der praktischen Hilfsmittel. Bis dahin war man für die Erzeugung elektrischer Ströme ausschließlich auf den chemischen Weg, auf die Benutzung kostspieliger und wenig leistungsfähiger galvanischer Batterien angewiesen. Jetzt sah man einen neuen, aussichtsreicheren Weg, solche Ströme auf elektromagnetischem Wege unmittelbar aus mechanischer Arbeit zu gewinnen.

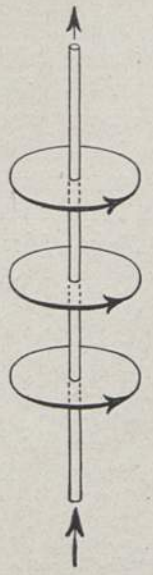
Bevor wir die Entwicklung verfolgen, welche die Technik unter dem Einfluß dieser Entdeckung nahm, wollen wir unser Experiment erst weiter ausbauen. Wir haben wieder unseren Draht über ABCD geschlossen in einem magnetischen Kraftfelde. Jetzt aber schneiden wir den Draht zwischen C und D auf und schalten eine Batterie an, so daß nun ein Batteriestrom von A nach B durch den Draht fließt. In dem Augenblick, in dem der Strom geschlossen wird, spürt die Hand, die den Draht im Felde hält, einen Ruck. Der Draht zeigt jetzt unter dem Einfluß des ihn durchfließenden Stromes das Streben, sich von selbst zu bewegen. Aber die Bewegung vollzieht sich jetzt in umgekehrter Richtung wie bei dem ersten Versuch. Der Draht bewegt sich nicht in die Bildebene hinein, sondern aus ihr hinaus auf den Beschauer zu, in einer Richtung also, in der im stromlosen und von Hand bewegten Draht ein gegen den Batteriestrom gerichteter Strom induziert werden würde. Hier haben wir die vollkommene Umkehrung der Erscheinungen des ersten Experimentes. Es wird elektrische Arbeit in Form des Batteriestromes in den Draht hineingegeben, und es wird mechanische Arbeit in Form einer Bewegung des Drahts gewonnen. Die elektromagnetische Induktion gibt also nicht nur das Mittel, aus mechanischer Arbeit elektrische Arbeit zu gewinnen, sondern umgekehrt auch noch die Möglichkeit, mechanische Arbeit unter dem gleichzeitigen Verbrauch elektrischer Energie zu erzeugen. Die praktische Nutzbarmachung des bei den ersten Versuchen wirksamen Gesetzes führte zur Schaffung der elektromagnetischen Stromerzeuger, der Elektrogeneratoren unserer Tage, diejenige des zweiten Versuches zur Schaffung der mannigfachen Elektromotoren, ohne die unser ganzes heutiges Leben kaum noch denkbar wäre.



621. Kraftlinien eines Stabmagneten, sichtbar gemacht durch auf eine Platte aufgestäubtes Eisenpulver

Die geschichtliche Entwicklung vollzog sich in der Weise, daß die Physiker jener Tage, die in den galvanischen Batterien ja immerhin über Stromquellen von einer gewissen Ergiebigkeit verfügten, zunächst einmal versuchten, die elektrische Energie in mechanische Arbeit umzusetzen, also Motoren zu bauen. Wohl als der erste gab ein Professor Jedlicka schon 1829 eine solche Anordnung an. Bekannter sind die Erfolge des russischen Professors Jakobi, des Erfinders der

Galvanoplastik, geworden, der sogar ein kleines Boot auf der Newa mit Hilfe seines durch eine starke galvanische Batterie gespeisten Elektromotors in Bewegung zu setzen und zu kurzen Fahrten zu verwenden vermochte. In deutschen Laboratorien fand besonders die von Ritchie 1837 angegebene Konstruktion Verbreitung, die Bild 628 darstellt. Das permanente magnetische Kraftfeld wird hier von einer Gruppe hufeisenförmiger Stahlmagneten erzeugt, welche die beiden freien Pole nach oben kehren. Über diesen Polen befindet sich, an einer senkrechten, leicht drehbaren Achse befestigt, ein Weicheisenstück, dessen beide Endflächen dicht über die Pole des Stabmagneten hinstreifen können. Normalerweise würde sich dies Eisenstück unter dem Einfluß der Stabmagnete so einstellen, daß seine Endflächen über den Polen derselben stehen, daß also die von Pol zu Pol gehenden Kraftlinien dieses Magneten den größten Teil ihres Weges durch das Weicheisen zurücklegen können, das ihnen einen besonders bequemen Weg bietet. Nun ist aber das Weicheisenstück mit isoliertem Kupferdraht umwickelt. Die beiden Enden der Wicklung sind zu zwei kupfernen Halbkreissegmenten geleitet, denen durch zwei Schleiffedern ein Batteriestrom zugeführt wird. Dabei ist die Anordnung so getroffen, daß jedes Weicheisenende in dem Augenblick, in dem es über den Nordpol des Stahlmagneten hinweggleitet, durch die magnetisierende Wirkung der stromdurchflossenen Spule selbst ein Nordpol wird, das andere Ende, das über den Südpol fährt, ein Südpol. Gleichnamige Magnetpole stoßen sich aber bekanntlich ab, und so setzt dieser drehbare Elektromagnet, den man als Motoranker zu bezeichnen pflegt, seine Bewegung im Sinne des Uhrzeigers fort, wird im Augenblick, in dem sein Nordpol über dem Südpol des Stahlmagneten steht, wiederum ummagnetisiert und rotiert ständig weiter.

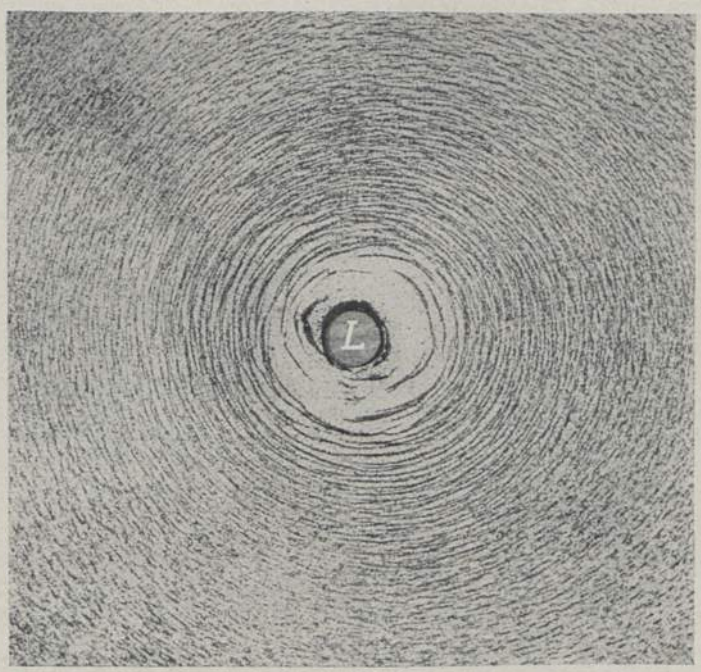


622. Verlauf der elektromagnetischen Kraftlinien eines stromdurchflossenen Leiters

Elektromotoren dieser Art wurden in den physikalischen Kabinetten zum Antriebe von Zentrifugalmaschinen, Farbkreiseln, Tonsirenen und ähnlichen Apparaten benutzt, wo es sich stets um einen äußerst geringen Energieverbrauch und um die Erzeugung einer recht schnellen und innerhalb weiterer Grenzen regulierbaren Drehbewegung handelte.

Diese Anordnung ließ sich aber auch bereits im umgekehrten Sinne benutzen. Es war möglich, den Weicheisenanker mittels eines Schnurtriebes schnell zu drehen und dann aus den Schleiffedern einen Strom abzunehmen. Dieser Strom war freilich kein reiner Gleichstrom, sondern pulsierte bei jeder Drehung des Ankers zweimal zwischen einem Höchst- und Niederstwert hin und her. Es war also ein pulsierender Gleichstrom. Man konnte aber auch bei der Verwendung des Apparates als Stromerzeuger auf die für seine Benutzung als Motor unentbehrlichen kupfernen Halbkreissegmente ganz verzichten und die beiden Enden der Wicklung zu zwei voneinander isolierten Kupferschleifringen führen, auf denen dann die beiden Stromabnahmefedern liefen. Eine Ausführung dieser Art, die namentlich für medizinische Zwecke vielfach zur Anwendung kam, wurde in den vierziger Jahren von dem Leipziger Mechaniker Emil Stöhrer hergestellt. Wie Bild 629 zeigt, befinden sich hier drei aufrecht stehende Hufeisenstahlmagnete, über deren Pole sechs, an einer drehbaren Eisenscheibe befestigte und mit isoliertem Kupferdraht bewickelte Weicheisenkerne hinweggleiten. Die Wirkung der elektromagnetischen Induktion war bei dieser Maschine bereits recht beträchtlich. Wurden die Drahtwicklungen auf den Weicheisenkernen aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes hergestellt, so erhielt man Ströme von einer derartigen Spannung, daß sie den menschlichen Körper ganz gehörig zu erschüttern vermochten, ein Erfolg, dem man in jenen Anfangstagen der Elektrizitätswissenschaft noch unbedenklich eine Heilwirkung gegen alle möglichen Leiden zuschrieb. Wurden dagegen Spulen aus wenigen Windungen eines genügend starken Kupferdrahtes benutzt, so lieferte die Maschine Ströme, die zwar in der Spannung geringer, aber in ihrer Stärke, d. h. der in jeder Sekunde durch den Draht fließenden Elektrizitätsmenge, so bedeutend waren, daß man damit sogar den Davyschen Lichtbogen (siehe S. 379 u. 380) zeigen konnte.

An dieser Stelle teilt sich die Entwicklungsgeschichte der magnetelektrischen Maschinen nun in zwei Linien, die durch die beiden Worte Alliancemaschine und Zylinderinduktor gekennzeichnet sind und erst viel später wieder zusammenkommen. Man hatte inzwischen die vorzügliche Verwendbarkeit des elektrischen Bogenlichtes für Leuchtturmfeuer erkannt. Die Erzeugung dieses Lichtes mit Hilfe starker galvanischer Batterien war nun wohl zur Not technisch möglich, aber umständlich und recht kostspielig. Sollte jedoch ein Betrieb der Leuchtfeuer mit elektrischem Bogenlicht auch nur einigermaßen wirtschaftlich durchgeführt werden, so konnte nur eine Erzeugung der dafür benötigten Ströme mit Hilfe magnetelektrischer Maschinen in Frage kommen. Diesen Zweck erreichte die Alliance-Gesellschaft in Paris durch die Konstruktion einer magnetelektrischen Maschine (Bild 630), die im Grunde nur eine systematische Weiterbildung der von Stöhrer angegebenen Anordnung war. Die Stahlmagnete waren sternförmig um das mit Spulen besetzte Laufrad angeordnet, und zwar in der Weise, daß die Spulen in die Zwischenräume jeder Magnetreihe eintauchten.




623. Elektromagnetische Kraftlinien um einen stromdurchflossenen Leiter

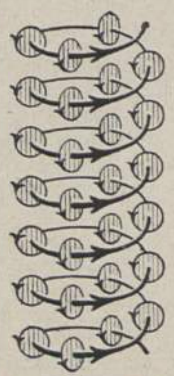
sichtbar gemacht durch auf einen Karton gestäubtes Eisenpulver. Die Kraftlinien fließen für einen mit dem elektrischen Strom schwimmenden Beobachter in der Richtung des Uhrzeigers. Der Leiter (L) tritt senkrecht durch den Karton und führt einen Strom von 550 Ampere

Der Antrieb dieser Maschinen erfolgte naturgemäß nicht mehr von Hand, sondern von einer Dampfmaschine aus mittels Treibriemens. Es handelte sich hier ja um die Erzeugung eines Lichtbogens, der mit einer elektrischen Spannung von etwa 50 Volt und einer Stromstärke von etwa 25 Ampere zu brennen hatte, also einen Energieverbrauch von $50 \times 25 = 1250$ Watt benötigte. Nun entsprechen aber 736 Watt der Leistung einer Pferdestärke, so daß allein der elektrische Verbrauch der Lampen fast zwei Pferdestärken betrug. Berücksichtigt man weiter, daß diese ersten Maschinen noch einen recht geringen Wirkungsgrad hatten, so waren also bereits Dampfmaschinen von drei bis vier Pferdestärken für den Antrieb dieser ersten magnetelektrischen Maschinen notwendig.

Mit der Alliance-Maschine tritt die junge Elektrotechnik zum ersten Male aus dem Laboratorium hinaus in das praktische Leben, und darum hat diese Maschine auch heut noch eine geschichtliche Bedeutung. Die technischen Erfahrungen, die man mit ihr machte, waren nicht gerade erfreulich. Es zeigte sich nämlich, daß der Magnetismus der Stahlmagnete überraschend schnell nachließ, und zwar bis zu solchem Grade, daß eine hinreichende Stromerzeugung und ein ordentliches Funktionieren der Bogenlampe unmöglich wurde. Heut kennen wir den Grund für diese Erscheinung. Der in den Spulen erzeugte elektrische Strom ruft ja selbst ein recht kräftiges magnetisches Feld hervor, welches demjenigen der Stahlmagnete in jedem Augenblick entgegengerichtet ist, also das Bestreben zeigt, es zu schwächen, die Stahlmagnete zu entmagnetisieren. In jenen Anfangsjahren freilich hatte man noch keine Erklärung dafür und suchte sich schlecht und recht in der Weise zu helfen, daß für jede dieser magnetelektrischen Maschinen sofort mehrere komplette Sätze von Stahlmagneten mitgeliefert und im Bedarfsfalle schnell umgewechselt wurden.

Etwas besser wurden die Verhältnisse erst, als man einen technischen Umweg benutzte und die magnetelektrische Maschine zu einer elektromagnetelektrischen entwickelte. An und für sich mußten ja Elektromagnete in der Alliance-Maschine dieselben Dienste leisten können wie die Stahlmagnete. Ja, es ließ sich sogar noch mehr von ihnen erwarten, da ihre magnetische Kraft viel stärker als diejenige gleich großer Stahlmagnete war, wenn man sie nur genügend stark erregte, d. h. einen genügend kräftigen Strom durch ihre Wicklung schickte. So kam man denn zu einer Anordnung, bei der die eigentliche Lichtmaschine mit Elektromagneten ausgerüstet war, die ihrerseits von einer zweiten kleineren magnetelektrischen Maschine gespeist wurden. In der Entwicklungsreihe folgt also auf die magnetelektrische Maschine mit Stahlmagneten die elektromagnetelektrische Maschine, deren Feldmagnete Elektromagnete waren. Aber für die Erregung dieser Magnete brauchte man immer noch eine kleinere magnetelektrische Maschine.

Der andere Zweig der Entwicklung führt über den von Werner Siemens angegebenen Zylinderinduktor, den Bild 633 veranschaulicht. Hier ist zwischen den Polen eines Systems kräftiger Hufeisenstahlmagnete ein Weicheisenzylinder drehbar gelagert. Dieser Zylinder trägt auf seinem Mantel zwei einander gegenüberstehende ausgefräste Nuten, durch die sein ursprünglich kreisförmiger Querschnitt die Gestalt eines I oder eines Doppel-T erhält (Bild 631). Der Zylinder trägt eine Kupferdrahtwicklung, die zum Teil in den Nuten liegt, zum anderen Teil über die beiden Endflächen des Zylinders geht. Die Enden der Wicklung sind zu zwei auf der Drehachse befestigten Kupferringen geführt, von denen der erzeugte Strom durch Schleiffedern abgenommen werden kann.



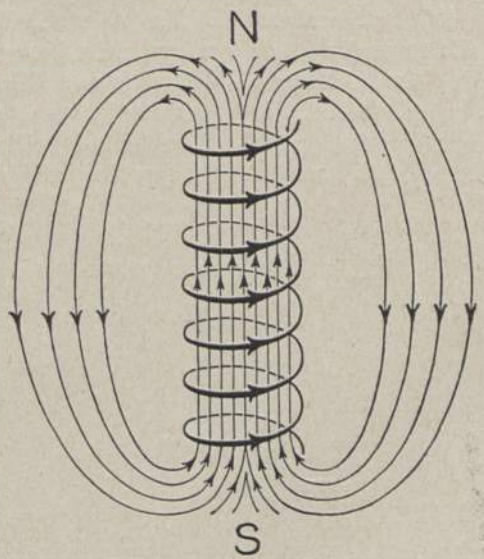
624. Kraftlinien eines stromdurchflossenen Solenoides

zunächst noch wie bei einem einfachen gestreckten Leiter gezeichnet

Wird dieser Doppel-T-Anker gedreht, so liefert er Wechselstrom, und zwar gibt jede ganze Drehung einen vollkommenen Stromwechsel, d. h. einen Stromstoß in einer Richtung und danach einen zweiten in der entgegengesetzten. Ersetzt man die beiden Schleifringe durch einen geteilten Ring, so wird auch hier der Wechselstrom in einen pulsierenden Gleichstrom verwandelt.

Der Zylinderinduktor war noch bis vor 20 Jahren in Hunderttausenden von Exemplaren im Telephonbetrieb in Gebrauch. Er fand sich, mit der bekannten Kurbel ausgerüstet, in jedem Teilnehmerapparat und lieferte den Weckerstrom, mit dem der Teilnehmer sein Amt anläutete.

Bei den Versuchen, den Zylinderinduktor in größerem Maßstabe auszuführen, ihn ebenfalls zu einer Lichtmaschine auszubauen, mußte der Gedanke naheliegen, sich nicht auf zwei Nuten zu beschränken, sondern auf dem Umfange des entsprechend vergrößerten Zylinders mehrere Nuten auszufräsen und dementsprechend mehrere Wicklungen darauf zu legen. Das Ergebnis einer solchen Maßnahme wäre ein sogenannter Zahnanker gewesen. Aber in Wirklichkeit ging die Entwicklung anders, und der heut ganz allgemein gebräuchliche Zahn- oder Nutenanker wurde erst viele Jahre später erfunden. Vorläufig kehrte man zu einem einfachen eisernen Zylinder mit kreisrundem Querschnitt zurück und bewickelte diesen über seinen ganzen Umfang mit dem isolierten Kupferdraht, wie Bild 632 es zeigt. Diese Konstruktion stellt den von v. Hefner-Alteneck erfundenen Trommelanker dar, der seinen Namen deswegen erhielt, weil er mit seiner gleichmäßig verteilten Bewicklung ungefähr das Aussehen einer runden Trommel hat.

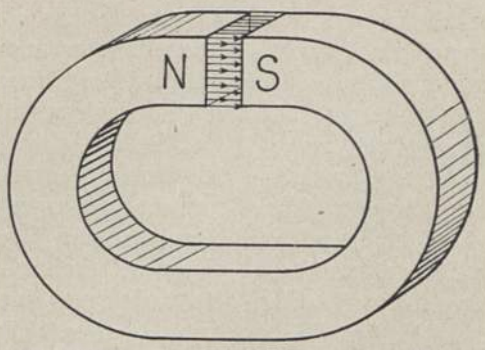



625. Kraftlinien eines stromdurchflossenen Solenoides

wie sie sich aus dem Zusammenfluß der in Bild 624 gezeigten Linien wirklich ergeben. Ein Beschauer, für den der Strom im Sinne des Uhrzeigers kreist, blickt auf den Südpol des Solenoides

Man konnte nun die beiden Enden dieser Trommelwicklung einfach zu zwei Halbkreissegmenten führen und erhielt dann durch zwei Schleiffedern pulsierenden Gleichstrom. Es bestand aber auch die andere Möglichkeit, die Trommelwicklung zu schließen und an mehreren Stellen anzuzapfen und von den Zapfstellen Drähte zu entsprechend vielen Kupfersegmenten oder Lamellen zu führen, wie Bild 632 zeigt. Man gewann dadurch den Vorteil, daß die Pulsationen oder Zuckungen des durch Schleiffedern von den Segmenten abgenommenen Stromes viel geringer wurden, daß mit Hilfe des Trommelankers wirklich Gleichstrom erzeugt werden konnte.

Das Ergebnis aller dieser Bestrebungen und Fortschritte wird durch die in Bild 634 dargestellte magnetelektrische Maschine von Siemens & Halske veranschaulicht. Das magnetische Feld wird hier durch fünfzig kräftige stählerne Hufeisenmagnete geliefert, die zu einem sogenannten magnetischen Magazin vereinigt sind. Rechts in Bild 634 ist deutlich die Anordnung der einzelnen Kupfersegmente zu erkennen, aus denen sich im Laufe der Jahrzehnte der Kollektor unserer heutigen Gleichstrommaschinen entwickelt hat. In einer alten Preisliste von Siemens & Halske wird über diese Maschine folgendes mitgeteilt:




626. Stählerner Stabmagnet zum Ringmagneten zusammengebogen

Die Kraftlinien verlaufen fast ausschließlich im Eisen. In dem Schlitzraum bilden sie ein homogenes Kraftlinienfeld

„Die beschriebene Maschine liefert, mit einer Mannskraft betrieben, einen Strom von der elektromotorischen Kraft von acht Bunsen-Elementen und hat nur 0,5 Siem.-Einh. inneren Widerstand; sie eignet sich daher für physikalische Laboratorien als Ersatz einer galvanischen Batterie für die Mehrzahl der Experimente. Von zwei bis vier Mann betrieben, reicht sie hin, um elektrisches Bogenlicht zu erzeugen."

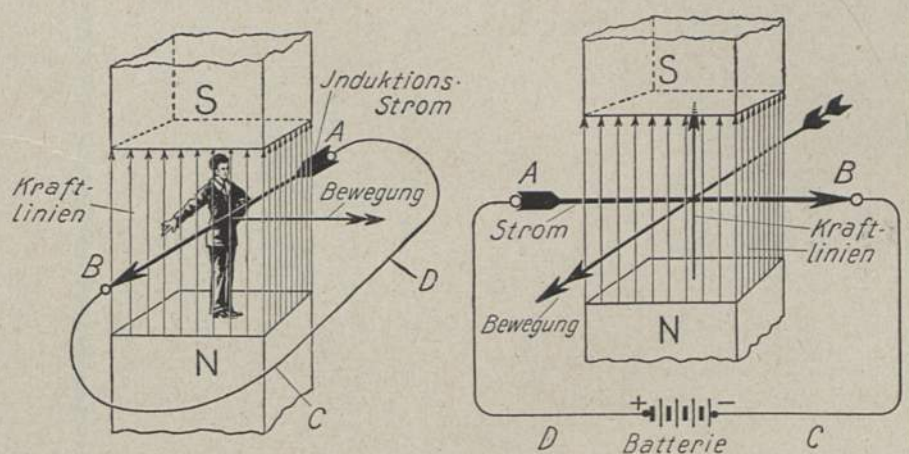
Begreiflicherweise zeigten aber auch diese auf dem Wege über den Zylinderinduktor entwickelten magnetelektrischen Maschinen im Betriebe die gleichen Schwächen wie die Alliance-Maschinen. Wohl erkannte man jetzt vollkommen klar die wertvolle Möglichkeit, mit Hilfe der elektromagnetischen Induktion mechanische Arbeit in elektrische Energie umzuwandeln, aber die technische Ausführung dieses Gedankens stieß auf unvorhergesehene Schwierigkeiten. Fast ein halbes Jahrhundert mußte nach der grundlegenden Entdeckung Oersteds verfließen, bevor es dem Genie Werner Siemens glückte, diese Schwierigkeiten zu überwinden.

*

In der zweiten Hälfte des Jahres 1866 beschäftigte sich Werner Siemens intensiv mit dem Problem, die unzulänglichen Leistungen der damaligen magnetelektrischen Maschinen grundlegend zu verbessern. Von Anfang an stand dabei für ihn fest, daß leistungsfähige Maschinen nur geschaffen werden konnten, wenn man die zu vielen Anständen Veranlassung gebenden Stahlmagnete durch Elektromagnete ersetzte. Offen war die Frage, mit welchen Stromquellen die Elektromagnete erregt werden sollten.

Werner Siemens führte auch diese Versuche mit der bekannten wissenschaftlichen Gründlichkeit durch, die ihm schon bei früheren Gelegenheiten von englischer Seite den Vorwurf des scientific humbug eingetragen hatte, und der er doch letzten Endes alle seine großen Erfolge verdankte. Zunächst stellte er sich eine Schaltung her, bei der die Magnetwicklungen seiner Versuchsmaschine, die Wicklungen des Zylinderinduktors und eine galvanische Batterie in Reihe geschaltet waren. Der von der Batterie gelieferte Strom mußte also hintereinander die Magnetwicklungen und Ankerwicklungen durchlaufen. Sich selbst überlassen, mußte die Maschine dabei als Elektromotor arbeiten. Ihr Anker mußte sich drehen, während die Batterie die Arbeit für diese Drehung hergab. Dabei hatte Werner Siemens Gelegenheit, die elektromotorische Gegenkraft eines laufenden Motorankers kennenzulernen, die der elektromotorischen Kraft der treibenden Stromquelle, in diesem Falle also derjenigen der galvanischen Batterie, entgegengerichtet ist und bei genügend schnellem Lauf des Ankers bald eine solche Größe erreicht, daß die Batterie kaum noch Strom in den Motor hineinzugeben vermag.

Nun kam die Umkehr des Versuches. Man ließ den Anker der Versuchsmaschine bei angeschalteter Batterie nicht mehr laufen, wie er wollte, sondern drehte ihn mittels Zahnradkurbel in entgegengesetzter Richtung. Auch jetzt mußten in den Windungen des in einem starken magnetischen Felde gedrehten Ankers natürlich elektromotorische Kräfte und Ströme induziert werden. Aber jetzt waren sie der Richtung des Batteriestromes nicht mehr entgegengerichtet, sondern liefen in gleicher Richtung und zeigten die Neigung, den Batteriestrom noch zu verstärken. Sehr bald wurde dabei eine Drehgeschwindigkeit erreicht, bei welcher der vom Anker gelieferte Strom bedeutender war als der von der Batterie kommende, und nun kam ein kritischer Moment. Während die Drehung des Ankers unverändert fortgesetzt wurde, schloß man die Batterie kurz und schaltete sie dann ganz von der Maschine ab. Es zeigte sich, daß die Stromerzeugung der Maschine dadurch nicht berührt wurde. Sie erregte ihre Elektromagnete jetzt mit dem eigenen Ankerstrom und arbeitete nach wie vor weiter. Der erste Schritt auf dem Wege zu einer großen Entdeckung war damit getan.




627. Das Gesetz der elektromagnetischen Induktion

Links: In einem durch ein elektromagnetisches Kraftlinienfeld bewegten Leiter wird eine elektromotorische Kraft induziert. Die Größe dieser Kraft ist proportional der Anzahl der in der Zeiteinheit von dem Leiter geschnittenen Kraftlinien (Prinzip aller Elektrogeneratoren). Rechts: Ein stromdurchflossener Leiter in einem elektromagnetischen Kraftlinienfeld bewegt sich mit einer Kraft, die proportional der magnetischen Feldstärke und der im Leiter fließenden Stromstärke ist (Prinzip aller Elektromotoren)

Der zweite blieb noch zu tun übrig. Es wäre natürlich in der Praxis recht umständlich und kostspielig geworden, wenn man die Maschine bei der jedesmaligen Inbetriebsetzung erst hätte an eine kräftige Batterie schalten müssen. Aber Werner Siemens schlußfolgerte so: In jedem Eisen, das einmal magnetisiert war, bleibt auch nach dem Aufhören

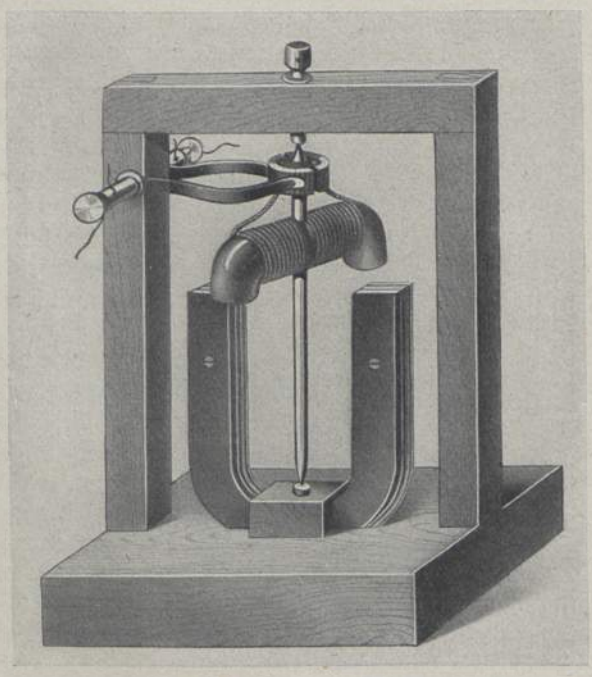
der magnetisierenden Kraft eine geringe Spur von Magnetismus, der sogenannte remanente Magnetismus, zurück. Beginnt man nun also den Anker der Versuchsmaschine, bei der jetzt einfach nur die Wicklungen der Feldmagnete und des Ankers ohne jede Batterie hintereinander geschaltet sind, zu drehen, so wird der geringfügige Restmagnetismus der Feldmagnete zunächst einen ganz winzigen Strom erzeugen. Aber dieser Strom durchläuft ja die Wicklungen der Feldmagnete in solcher Richtung, daß er verstärkend auf den Magnetismus derselben wirken muß. Der verstärkte Feldmagnetismus hat aber wiederum verstärkte Stromerzeugung im Anker zur Folge, der verstärkte Ankerstrom verstärkt weiter den Feldmagnetismus, und so muß es in ständigem Wechselspiel weitergehen, bis nach wenigen Minuten die volle Sättigung der Feldmagnete erreicht ist und die Maschine den höchstmöglichen Strom liefert.

Werner Siemens führte diese klassischen Arbeiten in der Hauptsache an der kleinen, in Bild 635 dargestellten Versuchsmaschine durch. Man darf dabei nicht vergessen, daß es sich hier um die ersten Versuche handelte, ein neues elektrisches Prinzip zu ergründen, und daß daher manches anders verlief, als es sich der einfache Alltagsverstand der an diesen Versuchen beteiligten Mechaniker vorstellte. Praktisch war ja das, was hier entstand, eine elektrische Hauptstrommaschine, bei welcher die erzeugte elektrische Energie nur die Magnetwindungen zu durchfließen und keinerlei weitere Arbeit in elektrischen Lampen oder sonstigen Energieverbrauchern zu leisten hatte. Der Strom in ihr konnte daher sehr gewaltig ansteigen. So gewaltig, daß schließlich die Isolation der Anker- und Magnetdrähte verkohlte. So stark auch, daß man die Maschine mit Hilfe des kleinen Kurbelantriebes kaum noch zu drehen vermochte. Alle diese Erscheinungen mußten auftreten und traten natürlich auch auf. Dann gerieten die Mechaniker begreiflicherweise in Unruhe und fürchteten allerlei versehen zu haben. Die schwere Drehbarkeit suchten sie durch schlechte oder festgefressene Lager zu erklären, das Verkohlen der Isolation durch irgendwelche anderen Kunstfehler. Aber zu ihrer Verwunderung wurde der Veranstalter dieser Versuche über diese Dinge durchaus nicht ungehalten, sondern schien sich im Gegenteil darüber zu freuen.

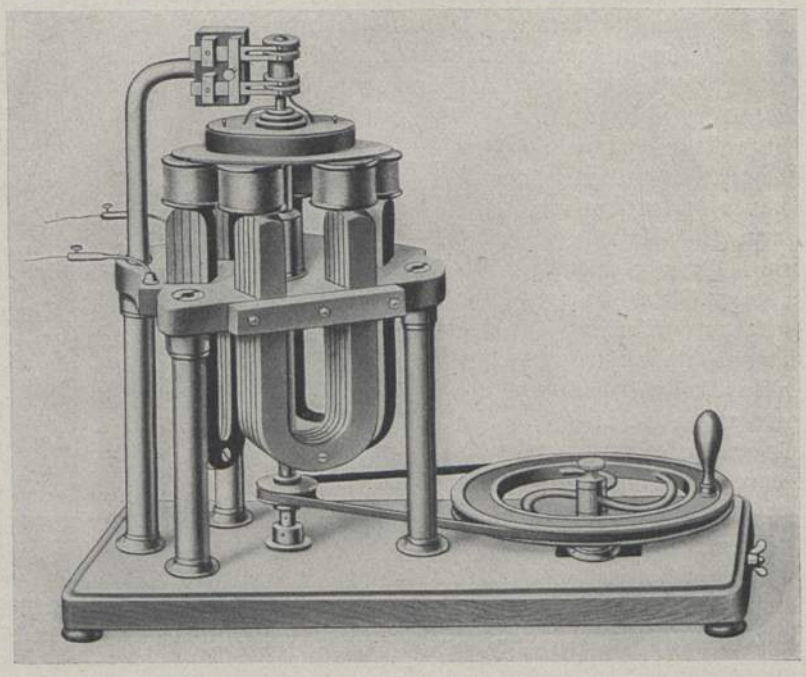
Und dann reichte Werner Siemens der Berliner Akademie der Wissenschaften eine Arbeit ein, die den Titel trug: „Über die Umwandlung von Arbeitskraft in elektrischen Strom ohne permanente Magnete", und die im Monatsbericht der Akademie vom 17. Januar veröffentlicht wurde. Will man einen bestimmten Termin annehmen, so muß man den 17. Januar 1867 als den Geburtstag der modernen Starkstromtechnik festlegen, denn an diesem Tage wurde die Erfindung der dynamoelektrischen Maschine der wissenschaftlichen Welt bekanntgegeben.

Den Namen Dynamomaschine wählte Werner Siemens dafür nach dem griechischen Worte δύναμις, die Macht oder Kraft, weil hier eben Arbeitskraft ohne die Zuhilfenahme von Stahlmagneten unmittelbar in elektrische Energie verwandelt wurde. In jener Veröffentlichung selbst, die im ersten Bande seiner wissenschaftlichen und technischen Arbeiten abgedruckt ist, sagt er u. a. folgendes:

„Mit Hilfe einer derartig eingerichteten Maschine kann man, wenn die Verhältnisse der einzelnen Teile richtig bestimmt sind und der Kommutator richtig eingestellt ist, bei hinlänglich schneller Drehung in geschlossenen Leitungskreisen von geringem außerwesentlichem Widerstande, Ströme von solcher Stärke erzeugen, daß die Umwindungsdrähte der Elektromagnete durch sie in kurzer Zeit bis zu einer Temperatur erwärmt werden, bei welcher die Umspinnung der Drähte verkohlt. Bei anhaltender Benutzung der Maschine muß diese Gefahr durch Einschaltung von Widerständen oder durch Mäßigung der Drehungsgeschwindigkeit vermieden werden. Während die Leistung der magnetelektrischen Induktoren nicht in gleichem Verhältnisse mit der Vergrößerung ihrer Dimensionen zunimmt, findet bei der Dynamo das umgekehrte Verhältnis statt. Es hat dies darin seinen Grund, daß die Kraft der Stahlmagnete in weit geringerem Verhältnis zunimmt, als die Maße des zu ihrer Herstellung verwendeten Stahls,



628. Motor von Ritchie
Erste Anwendung des Elektromagnetismus zur Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit

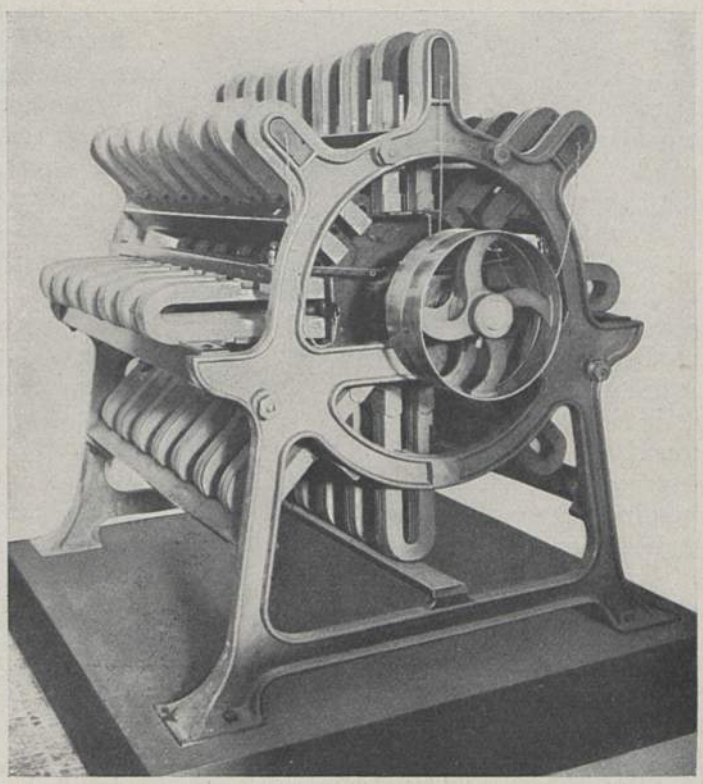


629. Magnetelektrische Maschine des Mechanikers Emil Stöhrer
Eine der ersten Anwendungen der elektromagnetischen Induktion zur Gewinnung elektrischer Ströme aus mechanischer Energie

und daß sich die magnetische Kraft einer großen Anzahl kleiner Stahlmagnete nicht auf eine kleine Polfläche konzentrieren läßt, ohne die Wirkung sämtlicher Magnete bedeutend zu schwächen oder sie selbst zum Teil ganz zu entmagnetisieren. Magnetinduktoren mit Stahlmagneten sind daher nicht geeignet, wo es sich um Erzeugung sehr starker andauernder Ströme handelt. Man hat es zwar schon mehrfach versucht, solche kräftigen magnetelektrischen Induktoren herzustellen und auch so kräftige Ströme mit ihnen erzeugt, daß sie ein intensives elektrisches Licht gaben, doch mußten diese Maschinen kolossale Dimensionen erhalten, wodurch sie sehr kostbar wurden. Die Stahlmagnete verloren ferner bald den größten Teil ihres Magnetismus und die Maschine ihre anfängliche Kraft."

Und er schließt diese Veröffentlichung mit den prophetischen Worten:

„Der Technik sind gegenwärtig die Mittel gegeben, elektrische Ströme von unbegrenzter Stärke auf billige und bequeme Weise überall da zu erzeugen, wo Arbeitskraft disponibel ist. Diese Tatsache wird auf mehreren Gebieten derselben von wesentlicher Bedeutung werden."



630. Große magnetelektrische Maschine der Compagnie l'Alliance aus dem Jahre 1859

Im Prinzip mit dem Induktor von Stöhrer identisch. Diese Maschinen wurden durch Dampfmaschinen angetrieben und speisten die ersten großen Bogenlampen auf französischen Leuchttürmen

Die Dynamomaschine war erfunden. Aber von der primitiven Form der kleinen Versuchsmaschine, in der sie das Siemenssche Laboratorium verließ, bis zu großen, wirklich einem Dauerbetriebe gewachsenen Maschinen war noch ein langer und dornenvoller Weg. Als man wirklich daran ging, größere Maschinen zu bauen, machte man zunächst die unangenehme Erfahrung, daß ihre Anker unheimlich heiß wurden. Diese Erhitzung trat nicht in den Ankerwindungen, sondern in dem eisernen Ankerkörper selbst auf, genügte aber vollkommen, um auch die Isolation der Ankerdrähte in kürzester Zeit zu verkohlen.

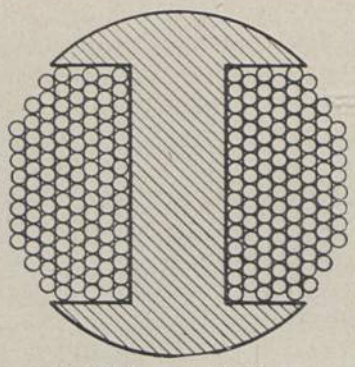
Die Erklärung für diese Erscheinung wurde schnell gefunden. Es waren die schon um die Mitte des Jahrhunderts von dem französischen Physiker Foucault entdeckten Wirbelströme, die in jedem massiven, in einem Magnetfelde bewegten Metallkörper auftreten und starke Erwärmung bewirken. Selbstverständlich gelten die Gesetze der elektromagnetischen Induktion ja nicht nur für die Kupferdrähte, sondern ebenso für den eisernen Körper, der sie umgibt. Auch diesen durchzucken elektromotorische Kräfte, und wenn diese einen geschlossenen leitenden Weg finden, werden elektrische Ströme fließen. Solchen Weg aber bietet der zylindrische massive Eisenanker in vorzüglicher Form. In seiner einen Mantelhälfte wird etwa eine von vorn nach hinten gerichtete elektromotorische Kraft induziert, in seiner anderen Hälfte eine von hinten nach vorn gerichtete, und über die beiden Zylinderenden hin können sich die Strömungen bequem ausgleichen.

Zwei Möglichkeiten gab es, die Entstehung dieser Wirbelströme zu verhindern. Man konnte den eisernen Teil des Ankers ruhen lassen und nur die Ankerwicklung bewegen, oder man mußte das Ankereisen in der Längsrichtung des Ankerzylinders möglichst häufig isolierend unterteilen, um den Wirbelströmen jeden brauchbaren Weg zu verlegen. Man versuchte zunächst, es auf die erstgenannte Weise zu machen, und es entstanden tatsächlich in den Siemens-Werkstätten Maschinen, bei denen die feststehende Ankertrommel von einem rotierenden, dünnwandigen Messingzylinder umgeben war, der die eigentliche Ankerwicklung trug. Aber sehr bald gab man diesen Weg auf und wählte das andere noch heut ganz allgemein gebräuchliche Verfahren, bei dem die aktive, d. h. im magnetischen Kraftfeld liegende Eisenmasse des Ankers aus dünnen und auf der einen Seite lackierten oder mit Papier beklebten Eisenblechscheiben aufgebaut wird. Durch diese Unterteilung war naturgemäß den im Anker selbst auftretenden elektromotorischen Kräften jede Möglichkeit zur Strombildung verlegt und diese eine Schwierigkeit endgültig überwunden. Aber es blieben noch genügend viel andere übrig.

Noch stand man ja erst am Anfange der neuen Technik und tastete sich mühsam Schritt für Schritt in dem noch so wenig bekannten Gebiet vorwärts. Man hatte noch keine allgemein anerkannten und gebräuchlichen elektrischen Maßeinheiten und nur höchst primitive Meßinstrumente. Die Gesetze der elektrischen Stromverteilung waren zwar durch die klassischen Arbeiten der deutschen Physiker Ohm, Lenz und Kirchhoff ziemlich geklärt. Aber von den Gesetzen des magnetischen Flusses und von magnetomotorischen Kräften und magnetischen Widerständen hatte man noch kaum eine Ahnung. Das Verhalten der verschiedenen Eisensorten unter dem Einfluß magnetisierender Kräfte war noch vollkommen unergründet. Man befand sich noch in dem gleichen Stadium wie etwa die Dampfmaschinentechnik 70 Jahre vorher, man war auf fortwährendes Probieren angewiesen und mußte sich bei jeder Gelegenheit auf das berühmte „technische Gefühl" verlassen, das recht oft in die Irre führte.

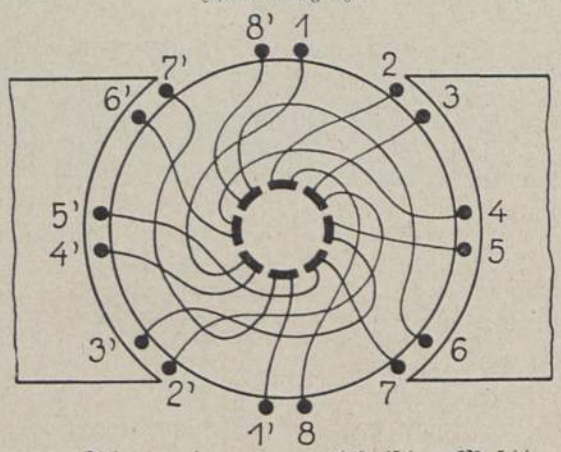
Als Beispiel für den Gang der Dinge in diesen Jahren mögen die beiden in Bild 637 und 638 dargestellten Maschinen dienen, die Siemens-Gleichstrommaschine DO aus dem Jahre 1878 und die Gleichstrommaschine H 17 aus dem Jahre 1885. Das Magnetsystem der ersteren Maschine erinnert noch einigermaßen an den Aufbau der Stahlmagnete bei der in Bild 634 gezeigten magnetelektrischen Maschine. Von oben und von unten her sind hufeisenförmige Elektromagnete angeordnet, die so übereinanderstehen, daß ein Nordpol gegen einen Nordpol

und ein Südpol gegen einen Südpol stößt. Bis man dann, als die Gesetze des magnetischen Flusses etwas besser bekannt waren, merkte, daß das eine dieser Hufeisen vollkommen überflüssig sei. Man schnitt das obere entschlossen ab, halbierte also gewissermaßen das Feldsystem, und so entstand die Type H, die ihren Namen von dieser Halbierung erhielt. Eine Vergleichung der in Bild 637 und 638 gezeigten Maschinen läßt den wesentlichen Fortschritt vom physikalischen Apparat zur wirklichen Maschine erkennen. Die Gleichstrommaschine H 17 war bereits so gut gelungen, daß einige Exemplare davon noch heut in einzelnen Betrieben laufen. Es ist nicht uninteressant, zu hören, was einer der Veteranen der Elektrotechnik, der heut noch bei Siemens-Schuckert tätige Oberingenieur Hermann Meyer, über die damaligen Erfahrungen in seinem Buche „Fünfzig Jahre bei Siemens" mitteilt. Er sagt: „An der Vervollkommnung der Lichtmaschine wurde dauernd gearbeitet. Allmählich hatten sich auch gewisse Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Maschinenabmessungen eingebürgert, während man früher nur auf Schätzungen angewiesen war. Es war damit schon möglich, brauchbare Werte über die zu verwendenden Eisenmassen und Kupferdrahtwindungen zu erhalten. Die besten zahlenmäßigen Werte hatte Karl Hoffmann erfahrungsgemäß zusammengestellt. Die hiernach gebauten Maschinen stimmten in ihren Leistungen immer am besten. Die Eisenquerschnitte wurden reichlich gewählt, nur die Drahtquerschnitte auf Anker- und Feldmagneten waren häufig etwas knapp. Die Erwärmung stieg deshalb oft über die zulässige Grenze. Als noch zulässige Erwärmung galt es, wenn ein an die Drahtwindungen angelegtes Thermometer Temperaturen bis 90 Grad Celsius zeigte."



631. Ankerquerschnitt des Siemens-Induktors (Doppel-T-Anker)

Ein Weicheisenzylinder ist derart ausgefräst, daß nur ein Querschnitt in Form eines Doppel-T übrigbleibt. Durch die aufgebrachte Wicklung wird der Ankerkörper wieder zum Zylinder ergänzt




632. Schema einer magnetelektrischen Maschine mit einem Kommutator oder Gleichrichter

Der Doppel-T-Anker ist hier zum Trommelanker weiterentwickelt. Die auf dem Ankerumfang gezeichneten schwarzen Kreise bedeuten die auf dem Anker liegenden Leitungen. Auf der dem Beschauer zugewandten Ankerstirnfläche sind die Verbindungen dieser Leitungen mit den einzelnen Kommutatorsegmenten dargestellt. Auf der abgewandten Ankerfläche muß man sich gleichzahlige Leitungen verbunden denken, also 1 mit 1' usw.

Weiter schreibt er über die Herstellung der Kollektoren:

„Große Schwierigkeiten machte stets die Herstellung der Kommutatoren. Je größer der Durchmesser und die Zahl der Segmente waren, desto schwieriger war es, sie zusammenzuhalten. Beim Lauf sowie nach eingetretener Erwärmung arbeitete der Kommutator, und die Stege nahmen nicht mehr ihre ursprüngliche Lage ein. Nach solchen Veränderungen trat heftiges Bürstenfeuer auf. Manche Maschine wurde zurückgewiesen, ohne daß der Grund des Feuerns erkannt worden wäre. Diese Erscheinungen wurden größtenteils der Maschine selbst zur Last gelegt. Auch einen geeigneten Isolierstoff zu beschaffen, der den Erfordernissen entsprach, war schwer. Es wurde allgemein Preßspan und später Vulkanfiber verwendet. Gegen Temperaturveränderungen waren Preßspan sowie Vulkanfiber wenig empfindlich, wenn der Wärmegrad unter 100 Grad war. Trat aber starkes Bürstenfeuer auf, so entstanden Brandstellen zwischen den Segmenten, und häufig entwickelten sich zwischen ihnen Kurzschlüsse. Die Folge war, daß die entsprechenden Drahtwindungen des Ankers, die durch die zusammengeschmorten Segmente kurzgeschlossen waren, glühend wurden, die Baumwollumspinnung verbrannte und die Isolationszwischenlagen Schaden litten."

Heut verlangt man von einer brauchbaren Gleichstromdynamo, daß sie keinerlei merkliche Funkenbildung am Kollektor zeigt. Auch in der Elektrotechnik sind heut die Zeiten der Unvollkommenheit vorbei, in denen man, wie Riedler so treffend sagt, die dämonischen Erscheinungen an Maschinen (Feuer, Rauch, Geräusch) als etwas Selbstverständliches, ja Notwendiges mit in Kauf nahm. Zu jener Zeit dachte man noch anders darüber. Meyer sagt darüber in seinen Erinnerungen:

„Das an den Kommutatoren auftretende Funken störte noch nicht, im Gegenteil, man betrachtete dies als notwendige Beigabe, galt doch das Kommutatorenfeuer als Kennzeichen, daß die Maschinen Strom gaben, und so alles in Ordnung war. Die Protokolle führten zum Teil noch die Bemerkungen ‚Kommutatorenfeuer schön und glänzend' oder ‚Maschine funkt gut'."

Die einfachen Messingfedern, welche die Stromabnahme bei den physikalischen Apparaten vergangener Jahre besorgten, waren inzwischen durch die sogenannten Kupferbürsten ersetzt worden. Es waren dies Pakete von feinen Kupferblechen, wobei das einzelne Blech noch vielfach geschlitzt wurde, so daß das ganze Paket mit vielen feinen federnden Kupferzungen auf den laufenden Kollektor drückte und eine erträgliche Stromabnahme bewirkte. Diese Schleifbürsten haben in den ersten Jahrzehnten der Starkstromtechnik im großen Publikum zu zahllosen Irrtümern Veranlassung gegeben. Jeder hatte ja wohl einmal auf der Schule etwas von der Reibungselektrizität und den auf der Glasscheibe der Elektrisiermaschine schleifenden Reibkissen gehört, aber nur die allerwenigsten waren bis zur Kenntnis der elektromagnetischen Induktion vorgedrungen. So konnte man wieder und immer wieder die berühmte Volkstheorie der Dynamomaschine zu hören bekommen: Die Kupferbürsten schleifen auf dem Kollektor, und das gibt dann die Elektrizität. Das damals noch unvermeidliche Funkenspiel an den Bürsten war natürlich besonders geeignet, das große Publikum in diesem Irrtum zu bestärken.

Neben dem Kollektor waren die Lager der Maschine und die allgemeine Festigkeit der rotierenden Teile noch lange Schmerzenskinder. Die ersten Dynamomaschinen waren ja ausgesprochene Schnelläufer, mußten es ihrer ganzen Abmessung nach sein. Sie wurden ausschließlich durch Riemen angetrieben, die von der sehr großen Riemenscheibe der Antriebsmaschine zu einer möglichst kleinen Riemenscheibe der Dynamomaschine führten. Die Anker der Dynamomaschinen selbst machten tausend und mehr Umdrehungen in der Minute, und dabei traten Fliehkräfte auf, deren Beherrschung bisweilen noch zu

wünschen ließ. So berichtet Oberingenieur Meyer über eine der ersten Anlagen aus jener Zeit:

„So ganz vollkommen in bezug auf mechanische Ausführung waren die Wechselstrommaschinen auch noch nicht. Es kam manchmal vor, daß die Ankerspulen beim Laufen der Maschine herausflogen, wie man sagte, infolge zu hoher Drehzahl. Der erste Fall ereignete sich an einer im Admiralsgartenbad in Berlin aufgestellten Maschine. Dort lagen plötzlich eines Abends während des Betriebes einige Überbleibsel der Maschine samt dem Fensterkreuz des Maschinenraumes in dem damals noch bestehenden benachbarten Stichkanal der Spree. An der Dampfmaschine waren keine Anzeichen zu bemerken, die auf ein Durchgehen hätten schließen lassen. So blieb das Vorkommnis unaufgeklärt. Es wurde schnell eine neue Maschine hingestellt und die verbogene Transmissionswelle wieder gerade gerichtet."

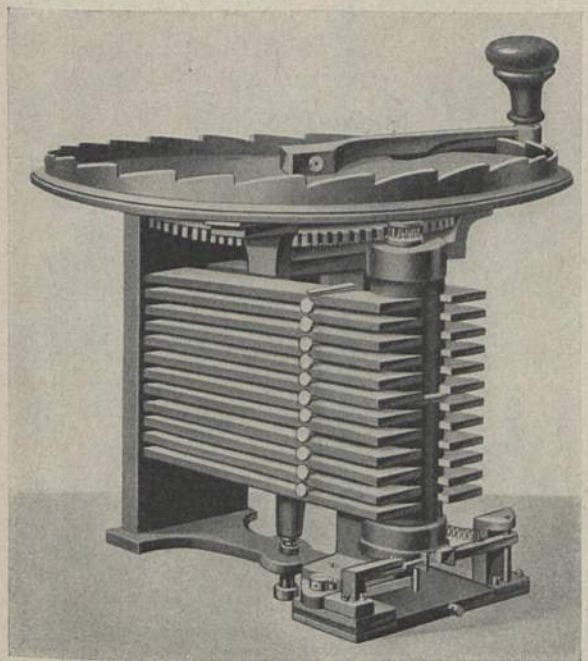
Was die Lager anbelangt, so machten sie ebenfalls noch mehrere Jahre hindurch recht erhebliche Schwierigkeiten. Immer wieder zeigten sie eine bedauerliche Neigung, sich während des Betriebes heißzulaufen. Die Ursache dafür ist in dem Umstande zu suchen, daß man sie in jenen Anfangsjahren der Starkstromtechnik viel zu schwach dimensionierte. Man übernahm die im allgemeinen Maschinenbau für ähnliche Leistungen üblichen Abmessungen, ohne zu berücksichtigen, daß in der Dynamomaschine schon bei ganz geringfügigen Lagerabnutzungen und dadurch bedingten Veränderungen der Ankerlage elektromagnetische Kräfte zwischen dem Anker und den Polschuhen auftraten, welche die Lager mit ganz gewaltigen Zusatzkräften beanspruchen.

So hatte die junge Technik noch mit zahlreichen Kinderkrankheiten zu kämpfen. Aber da sie von einem an sich richtigen Prinzip, eben jenem von Werner Siemens entdeckten Dynamoprinzip ausging, so wurden auch diese Krankheiten im Laufe der Zeit allmählich überwunden. Wo immer sich eine neue Schwierigkeit zeigte, ging man ihr energisch zu Leibe. Oberingenieur Hermann Meyer sagt darüber:

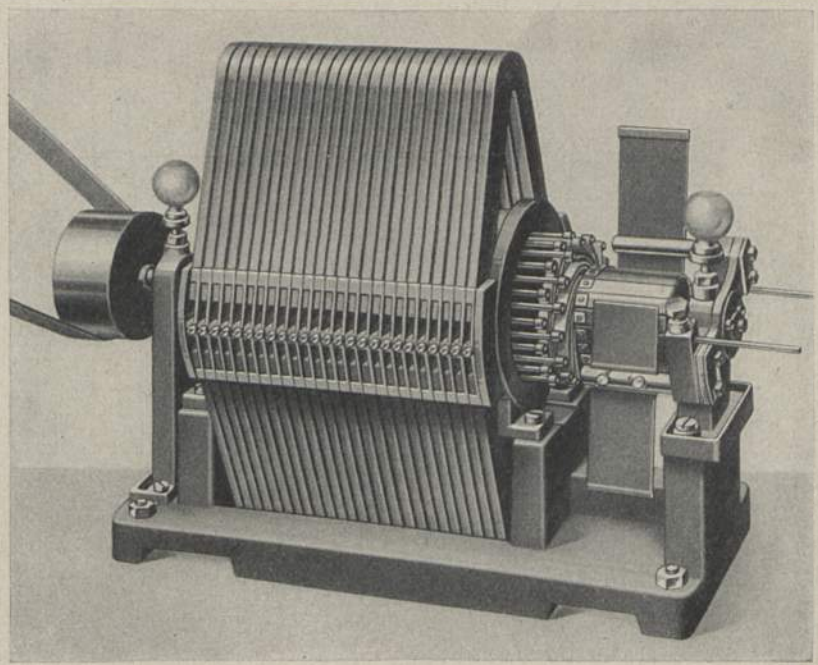
„Die Ansicht ‚das geht nicht' gab es ebensowenig bei Herrn Dr. Werner Siemens wie bei Herrn Scholz. Die bekannte Redensart ‚bei Gott und den Mechanikern' oder ‚bei Siemens und Halske ist kein Ding unmöglich' hörte man damals sehr oft in den Werkstätten." Einstweilen waren es noch Mechaniker, aber bald wurden es Maschinenbauer. Man erkannte, daß die Dynamomaschine nicht mehr in das Arbeitsgebiet der Feinmechanik fiel, sondern in dasjenige des regelrechten Maschinenbaues.

Um die notwendigen elektromotorischen Kräfte in den Ankerdrähten zu erzeugen, mußte die mit den Drahtwindungen belegte Ankerfläche mit einer bestimmten ziemlich hohen Geschwindigkeit in dem Magnetfelde rotieren, denn nur dann konnte ja in der Zeiteinheit die erforderliche Anzahl von Kraftlinien geschnitten werden. Wollte man nun diese Umfangsgeschwindigkeit mit einem Anker von verhältnismäßig kleinem Durchmesser erreichen, so mußte man ihn mit einer hohen Umdrehungszahl laufen lassen. Wählte man den Ankerdurchmesser dagegen größer, so mußte der Anker die gleiche Umfangsgeschwindigkeit auch bei einer geringeren Tourenzahl aufweisen. Aber der Gedanke, nun etwa die Dynamomaschine in der bisherigen Anordnung einfach in allen ihren Teilen zu vergrößern, wäre natürlich unwirtschaftlich gewesen. Siemens und Halske kamen daher auf eine andere recht geistreiche Lösung. Sie kehrten das ganze System einfach um, derart, daß sich das erregende Magnetfeld in Form eines Polrades d. h. eines mit Elektromagnetpolen besetzten Rades im Inneren befand und von dem Anker, dessen Trommelform in diejenige eines weiten Ringes aufgelöst wurde, umgeben war. Da hier die Magnetpole innen lagen, führten diese Maschinen (siehe Bild 639) die Bezeichnung Innenpolmaschinen im Gegensatz zu der früheren Type der Außenpolmaschinen.

Der Gedanke, an Stelle eines zylinder- oder trommelförmigen einen ringförmigen Anker zu benutzen, war schon früher aufgetaucht und hat eine eigenartige Geschichte gehabt. Bereits 1860 hatte der italienische Physiker Antonio Pacinotti

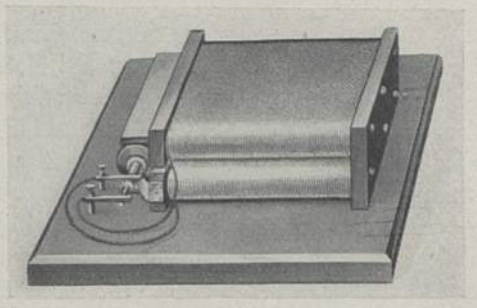


633. Zylinder-Induktor von Siemens & Halske
Eine andere Anwendungsform der magnetelektrischen Induktion zur Gewinnung elektrischer Ströme aus mechanischer Arbeit



634. Magnetelektrische Maschine
des vorigen Jahrhunderts von Siemens & Halske aus der ersten Hälfte der sechziger Jahre

in Florenz eine elektromagnetische Maschine mit einem Ringanker erfunden und ausführlich beschrieben. Aber diese Erfindung war vollkommen in Vergessenheit geraten, und der Ringanker (Bilder 640 und 643) wurde im Jahre 1871 noch einmal vollkommen unabhängig von dem Belgier Zénobe Téophile Gramme erfunden, der damals als Mechaniker bei der Alliance-Gesellschaft beschäftigt war.



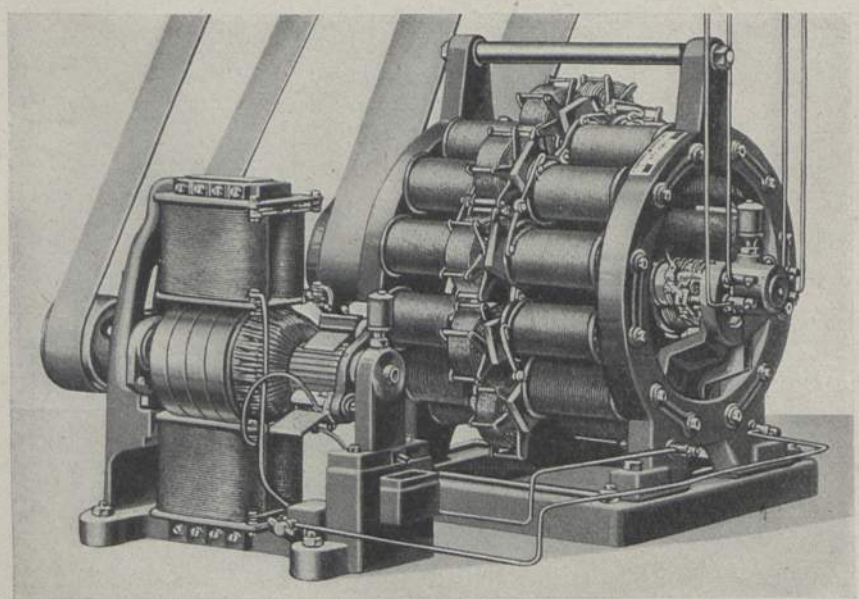
635. Erste Versuchsmaschine aus dem Jahre 1866,
mit der Werner Siemens das Dynamoprinzip demonstrierte

Die Bilder 641 und 642 stellen den magnetischen Kraftfluß eines zweipoligen magnetischen Feldes einmal in einem Trommelanker und das andere Mal in einem Ringanker dar. Eine Betrachtung dieser Abbildungen zeigt sofort, daß die Ausnutzung der Kupferwindungen auf dem Trommelanker eine wesentlich bessere ist als auf dem Ringanker. Bei dem Trommelanker werden in sämtlichen auf dem Zylindermantel liegenden Drähten nützliche elektromotorische Kräfte induziert, und nur die über den beiden Zylinderenden liegenden Wicklungsteile bleiben ungenutzt. Beim Ringanker dagegen werden nur die äußeren Windungsteile nutzbringend induziert, während die auf seinen Seitenflächen und seinem Innenmantel liegenden Drahtmengen ungenutzt bleiben. Der Ringanker erfordert also bei gleicher Leistung eine größere Kupfermenge als der Trommelanker und ist deswegen vollkommen verschwunden.

In jenen Anfangsjahren der Elektrotechnik aber bot er in der Konstruktion der Innenpolmaschine ein wertvolles Hilfsmittel, um verhältnismäßig langsam laufende Maschinen mit hinreichender Spannung und Leistung zu bauen. Das war aber damals in Hinblick auf die dadurch gewonnene größere Betriebssicherheit viel wichtiger als der damit verbundene Mehraufwand an Kupferdraht für den Anker. Während bei einer Außenpolmaschine mit Ringanker die äußeren Ringwicklungen die wirksamen sind und die inneren totliegen, ist es bei einer Innenpolmaschine naturgemäß umgekehrt. Man machte daher beim Bau der ersten Innenpolmaschinen aus der Not eine Tugend, indem man diese äußeren an sich totliegenden Ringwindungen zum Teil direkt als blanke Kollektorlamellen ausbildete und die Stromabnehmerbürsten auf ihnen schleifen ließ (Bild 639).

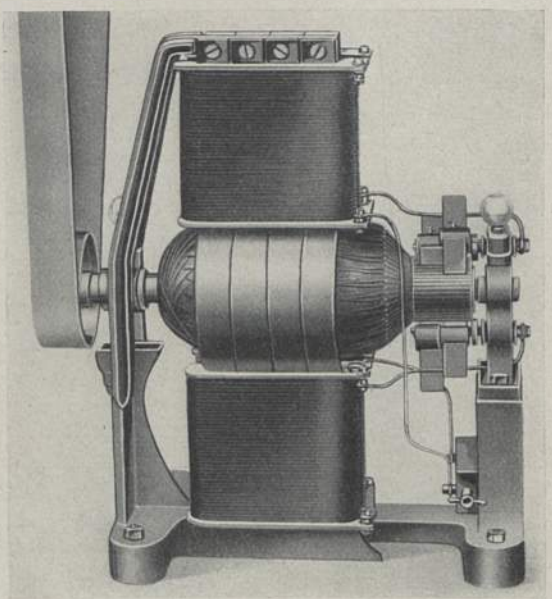
Eine andere eigenartige Anwendung fand der Ringanker aber während der ersten Jahre der Starkstromtechnik in der besonders von Schuckert ausgebildeten Flachringmaschine, deren Anordnung Bild 644 zeigt. Hier ist die Breite des Ringes möglichst klein gehalten, seine Abmessung in achsialer Richtung hingegen möglichst groß, und die sich an den beiden flachen Seiten des Ringes gegenüberstehenden Pole sind jedesmal gleichnamig. Bei dieser Anordnung werden nur in den auf den langen Seiten des Ringes liegenden Drahtteilen elektromotorische Kräfte induziert, die sich nutzbringend addieren, und nur die Drahtlängen der beiden Schmalseiten bleiben ungenutzt. In dieser Form wird also ein Hauptnachteil des Ringankers glücklich vermieden, und die Flachringmaschine (Bild 645) hat sich ziemlich lange in der Technik gehalten, bis auch sie neueren besseren Konstruktionen weichen mußte.

Betrachten wir nun einen einfachen Trommelanker, auf dessen glattem Mantel die Ankerwindungen einfach aufgewickelt sind. Schon bei unseren ersten Versuchen mit einem stromdurchflossenen Leiter in einem elektromagnetischen Felde machten wir die Erfahrung, daß er seiner Bewegung in einer die Kraftlinien schneidenden Richtung einen merklichen Widerstand entgegensetzt. Es treten elektrodynamische Kräfte auf, die bestrebt sind, ihn an dieser Bewegung zu hindern, an seiner Stelle im Raum festzuhalten. Das gleiche muß naturgemäß auch für die gesamte Bewicklung eines Trommelankers gelten. Sie wird auf dem Trommelumfang rutschen, und zwar in dem



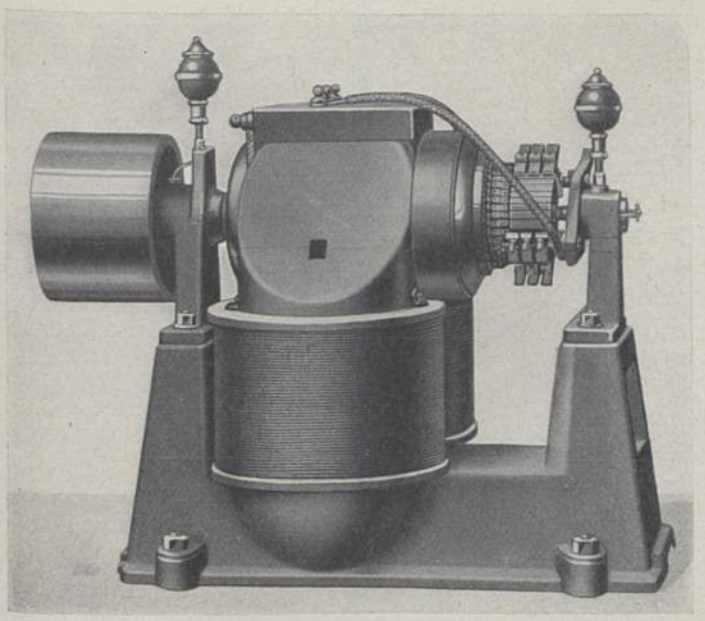
636. Wechselstrom-Dynamomaschine von Siemens & Halske aus dem Jahre 1878

Auf Holzkerne gewickelte Kupferdrahtspulen kreisen zwischen den Polen kräftiger Elektromagnete. Die Erregung dieser Elektromagnete erfolgt durch eine kleinere, links sichtbare Gleichstrom-Dynamomaschine

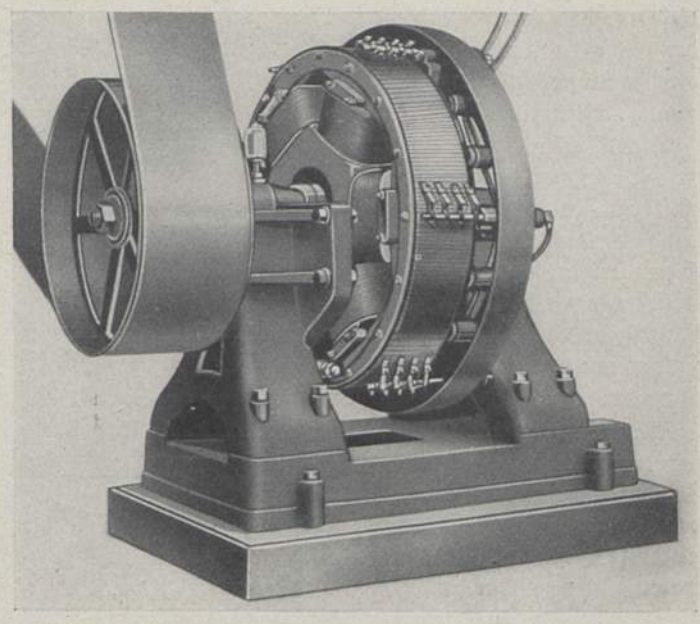


637. Gleichstromdynamo DO von Siemens & Halske aus dem Jahre 1878

Ein Trommelanker rotiert zwischen den Polen starker, vom Anker selbst erregter Elektromagnete. Der mechanische Teil ist noch wenig entwickelt. Vgl. Bild 638



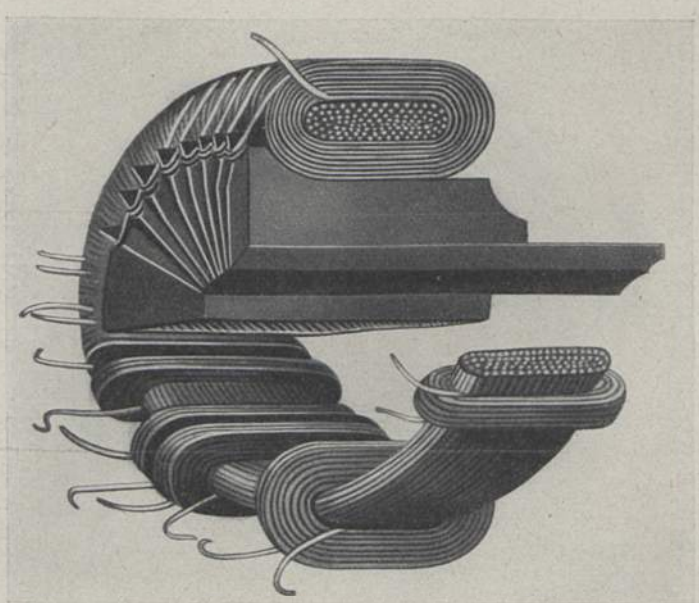
638. Gleichstromdynamo H 17 von Siemens & Halske
Die Maschine ist durch Halbierung des Magnetkörpers der in Bild 637 dargestellten Maschine entstanden. Bei wesentlich geringeren Ausmaßen hat sie die gleiche Leistung wie diese



639. Innenpolmaschine von Siemens & Halske
Der rotierende Anker umgibt kranzförmig den feststehenden Polstern. Die äußeren Ringwindungen des Ankers sind zum Teil als Kollektorlamellen ausgebildet, auf denen Stromabnehmerbürsten schleifen

Sinne, daß sie hinter der Ankerbewegung so zurückbleibt, als ob sie von den Feldpolen festgehalten würde, wenn man sie nicht mit besonderer Sorgfalt und sehr zuverlässig auf dem Ankerumfange befestigt. In den Anfangstagen der Starkstromtechnik versuchte man das durch Umlegen starker Stahldrahtbandagen um die bewickelte Ankertrommel herum zu erreichen. Doch sehr bald sah man die Unzulänglichkeit dieses Verfahrens ein und ging dazu über, den Ankerwindungen im Anker selbst einen Halt zu geben.

Dafür gibt es mehrere Ausführungsmöglichkeiten. Man konnte den glatten Anker (Bild 646) zugunsten des Lochankers aufgeben. Der Lochanker (Bild 647) trägt dicht unter seiner Mantelfläche zahlreiche parallel zu dieser verlaufende Bohrungen, durch welche nun die einzelnen Drahtwindungen hindurchzuziehen sind. Die Windungen liegen hier in der Tat vorzüglich gesichert, in gleicher Weise gegen ein seitliches Verschieben durch die elektrodynamischen Kräfte wie durch ein radiales Wegschleudern durch die Fliehkräfte des rotierenden Ankers geschützt. Andererseits aber hafteten dieser Anordnung auch zahlreiche Nachteile an. Insbesondere mußte man hier die Drähte mittels teurer Handarbeit einzeln einziehen und ferner war das Auswechseln einer etwa beschädigten Windung außerordentlich umständlich. An die Stelle des Lochankers trat daher sehr bald der Nutenanker, bei dem die einzelnen Windungen in Nuten liegen, die dicht nebeneinander auf der Mantelfläche ausgespart sind. Man unterscheidet dabei halbgeschlossene und offene Nuten (Bild 648 und 649). Die in den Nuten liegenden Ankerdrähte sind zwar gegen ein seitliches Verschieben geschützt, aber zunächst noch nicht gegen ein Herausgeschleudertwerden durch die Fliehkraft. Die halbgeschlossene Nute gewährt zwar einen gewissen Schutz, erschwert aber wieder das Einbringen der fertigen Spulen. Man wählt daher heut mit Vorliebe die in Bild 649 gezeigte Form. Hier wird erst die Spulenwindung eingebracht, was bei der offenen Form der Nute gut vonstatten geht, und danach die Nute selbst durch eine in die beiden Seitennuten a eingetriebene Deckplatte aus isolierendem Stoff geschlossen, so daß auch hier die Drahtspulen selbst gegen jede mechanische Beanspruchung geschützt sind.



640. Grammescher Ringanker
Der Anker ist in aufgeschnittenem Zustande gezeigt. Im Gegensatz zum Trommelanker bildet das Ankereisen einen Ring, der allseitig mit Kupferspulen bewickelt ist

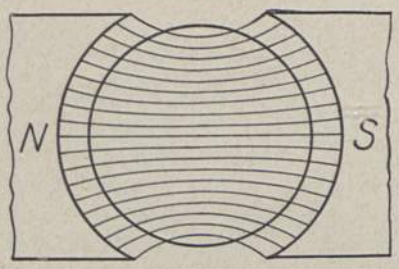
Die ersten Gleichstromdynamomaschinen waren als Hauptstrommaschinen (Bild 650) geschaltet. Der von einem Pol des Ankers A kommende Strom durchfloß hintereinander erst die Feldwindungen und dann die Verbrauchsstellen (Lampen und dergleichen), um dann zum anderen Pol des Ankers zurückzukehren. Das elektrische Verhalten dieser Maschine läßt sich leicht erklären. Solange überhaupt keine Verbrauchsstellen eingeschaltet wurden, war der Stromkreis offen. Es konnte auch kein Strom durch die Feldwindungen fließen und infolgedessen überhaupt keine Erregung der Feldmagnete und keine Stromerzeugung eintreten. Erst wenn einige Verbrauchsstellen eingeschaltet wurden, war eine Stromerzeugung möglich, und

diese mußte immer stärker, die Spannung der Maschine mußte bis zu einer gewissen Grenze immer höher werden, je mehr Verbrauchsstellen eingeschaltet wurden.

Dies Verhalten der Hauptstrommaschine war für solche Verbrauchsapparate, die eine einigermaßen gleichbleibende Stromversorgung verlangten, wenig ersprießlich. Der Mann an der Dampfmaschine mußte fortwährend am Regulierventil stehen, bald abdrosseln und bald Dampf zugeben, um eine einigermaßen gleichbleibende Klemmenspannung der Dynamomaschine zu erreichen.

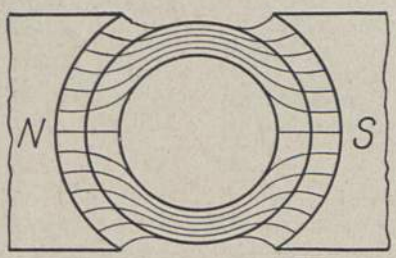
Man erinnerte sich daran, daß diese Unbequemlichkeiten bei den Vorläufern der Dynamomaschine, bei denen das Feld noch von einer besonderen Stromquelle erregt wurde (Bild 651), nicht vorhanden gewesen waren, und versuchte, etwas Ähnliches bei der Dynamo durch eine andere Schaltung zu erreichen. Man legte zu diesem Zweck zwei Stromkreise an die Schleifbürsten der Maschine, einen besonderen Feldstromkreis (siehe Bild 652), der nur die Ankerwicklungen durchfloß, und einen zweiten, den Verbrauchsstromkreis, der zu den Verbrauchsapparaten führte. So entstand die Nebenschlußmaschine. Diese Maschine konnte ohne weiteres angehen, wenn auch keine Verbrauchsapparate eingeschaltet waren, da ja der Magnetstromkreis immer geschlossen blieb. Wurden nun nach und nach Verbrauchsapparate eingeschaltet, so mußte der Anker auch für diese den Strom hergeben, und es war unvermeidlich, daß dabei ein gewisser Spannungsabfall eintrat, daß die Spannung und damit auch die Stromabgabe der Maschine bei wachsender Belastung nach unten abfielen. Aber dieser Nachteil ließ sich durch eine kleine Maßregel ausgleichen. Man dimensionierte die Feldwicklungen des Nebenschlußkreises so stark, daß die Maschine auch bei größter Belastung noch die gewünschte Spannung hergab, und legte in den Nebenschlußkreis einen Regulierwiderstand Rw, durch dessen Ein- und Ausschalten man nun die Spannung zwischen Leerlauf und voller Belastung auf gleichbleibender Höhe halten konnte.

Die Nebenschlußmaschine bedeutete gegenüber der älteren Hauptstrom- oder Hauptschlußmaschine einen bedeutenden Fortschritt. Jetzt war es nicht mehr notwendig, am Ventil der Dampfmaschine herumzuregulieren. Es genügte, daß man für den Antrieb der Dynamo eine Dampfmaschine hatte, die, mit einem zuverlässig arbeitenden Regulator ausgerüstet, ihre Tourenzahl auch bei wechselnder Belastung konstant hielt. Die Tätigkeit des Maschinisten konnte sich auf die einfache Bedienung des Regulierwiderstandes beschränken, den er unter Beobachtung eines mit den Polklemmen der Maschine verbundenen Spannungsmessers so einzustellen hatte, daß die Klemmenspannung der Maschine stets auf der verlangten Höhe blieb. Infolge dieser wertvollen Eigenschaften ist die Nebenschlußmaschine von ihrem Aufkommen an bis zum heutigen Tage die herrschende Type geblieben, wo immer es sich um die Erzeugung von Gleichstrom handelt.




641. Verlauf der Kraftlinien beim Trommelanker

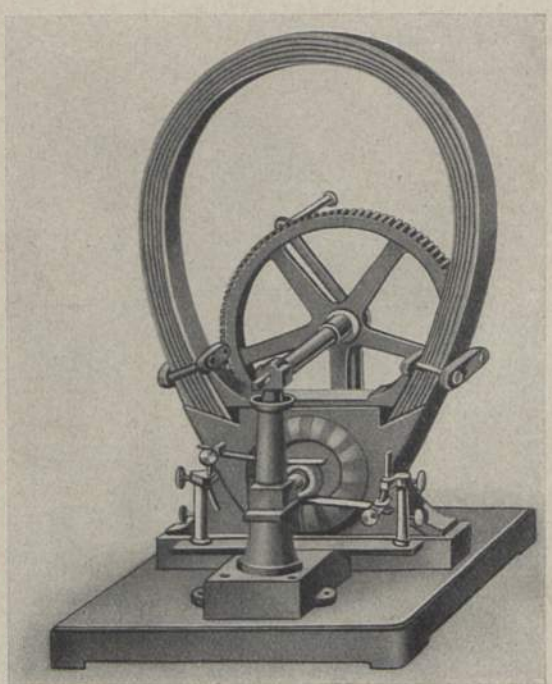
Die Linien bilden in dem schmalen Schlitz zwischen den Feldpolen und Ankereisen homogene Kraftfelder, die von den Ankerwicklungen geschnitten werden




642. Verlauf der Kraftlinien beim Ringanker

Der Raum im Innern des Ringes bleibt fast vollkommen frei von Kraftlinien. Für die Induktion können nur die auf der Außenfläche des Ringes liegenden Kupferdrahtlängen benutzt werden

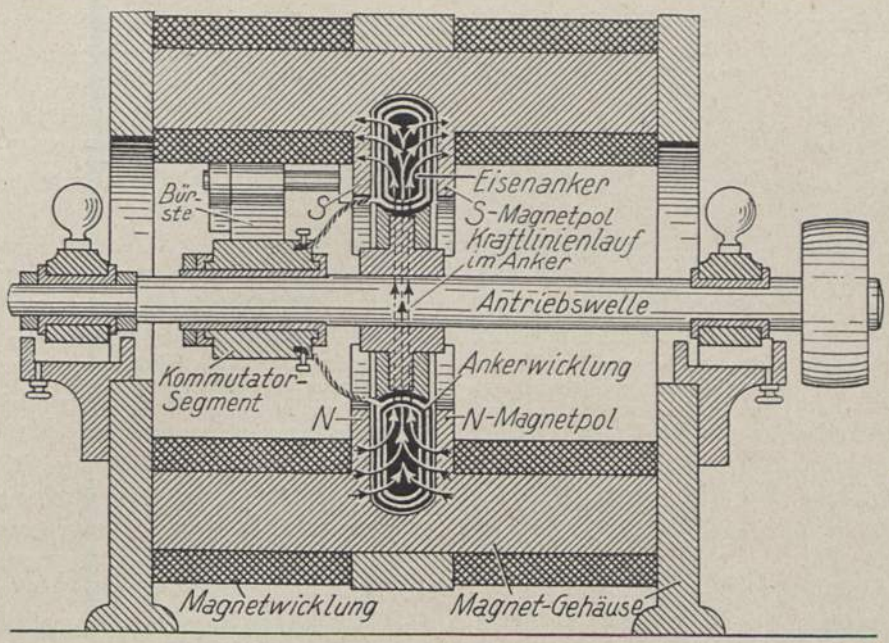
Nur für einige Sonderfälle wurde noch eine dritte Art der Schaltung, die Doppelschlußmaschine, ausgebildet, mit einem englischen Ausdruck Compoundmaschine genannt. Die Doppelschlußmaschine ist eine Vereinigung von Nebenschluß- und Hauptschlußmaschine. Ihr Magnetsystem (Bild 653) wird einmal durch einen besonderen Nebenschlußkreis wie bei der Nebenschlußmaschine erregt. Außerdem aber wird auch der Hauptstrom in einer bestimmten Anzahl von Windungen um die Magnetschenkel herumgeleitet. Die Zahl dieser Windungen, d. h. der Grad der Compoundierung, richtet sich nach dem jeweiligen Zweck. Wir sahen ja, daß die Klemmenspannung einer Hauptschlußmaschine bei steigender Belastung steigt, diejenige einer Nebenschlußmaschine bei steigender Belastung fällt. Daraus ergibt sich, daß es bei zweckmäßiger Wahl der Hauptstromwindungen möglich ist, eine Doppelschlußmaschine zu bauen, bei welcher die Klemmenspannung bei wechselnder Belastung innerhalb weiter Grenzen konstant bleibt. Eine derartige Maschine bezeichnet man wohl auch als einfach compoundiert. Nun ist aber noch nicht gesagt, daß auch die Verbrauchsstellen gleichbleibende Spannung bekommen, wenn diese an den Klemmen der Maschine vorhanden ist. Der Strom hat ja von der Maschine zu den Verbrauchsstellen einen mehr oder weniger langen Weg zurückzulegen, und hierbei tritt naturnotwendig ein gewisser Spannungsverlust ein, der für ein und dieselbe Leitung um so größer wird, je größer die in ihr fließende Stromstärke ist. Deshalb verwendet man bisweilen auch übercompoundierte Maschinen, bei denen die Zahl der Hauptstromwindungen auf den Magnetschenkeln so bemessen ist, daß die Klemmenspannung der Maschine bei wachsender Belastung noch etwas steigt, und zwar in solchem Maße, daß durch die Steigerung der Spannungsverlust in den Leitungen zu den Verbrauchsstellen gerade wettgemacht wird, daß dort also gleichbleibende Spannung herrscht, egal wie groß oder klein die Belastung der Maschine ist.



643. Erste magnetelektrische Maschine von Gramme mit Benutzung des Ringankers

Die Maschine trat für medizinische Zwecke an die Stelle der in Bild 629 gezeigten von Stöhrer

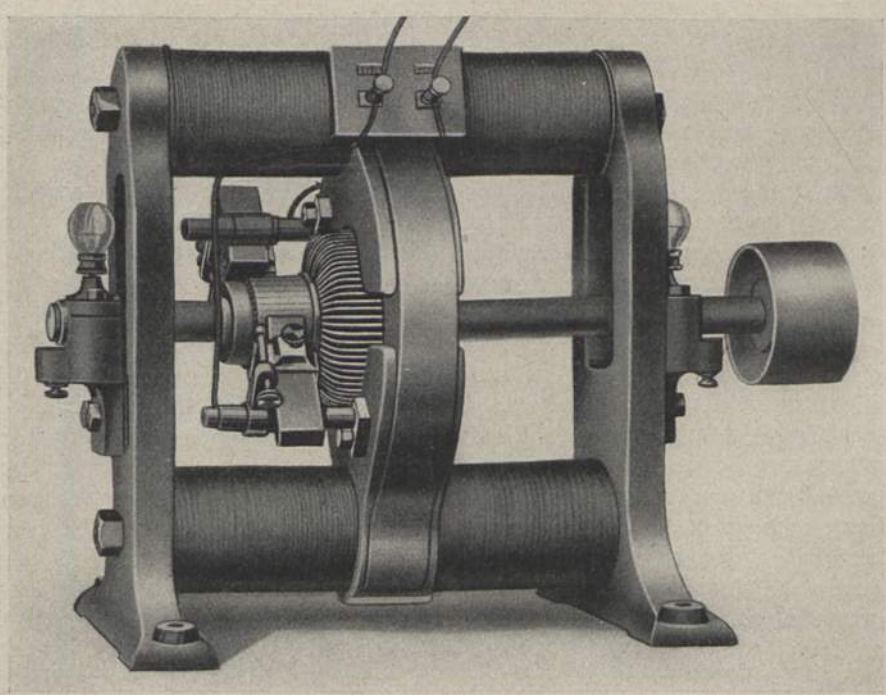
Unsere Betrachtungen haben sich zuletzt ausschließlich mit der




644. Schnitt durch die Schuckertsche Flachringmaschine
Die Pfeile veranschaulichen den elektromagnetischen Kraftfluß. Die Drahtlängen auf den beiden flachen Seiten des Ankerrings werden hier voll ausgenutzt

Gleichstromdynamo befaßt. In der Tat gewann diese auch zu Beginn der achtziger Jahre immer mehr das Übergewicht über die Wechselstrommaschine. Man hatte es ja inzwischen gelernt, ziemlich halt- und brauchbare Kollektoren zu bauen, durch welche die Gleichrichtung der im Anker erzeugten Wechselströme auch für größere Stromstärken betriebsicher gelang. Es lag daher kein triftiger Grund mehr vor, diesen Strom in der Form von Wechselstrom mittels einfacher Schleifringe von der Maschine abzunehmen und in die Leitungen zu schicken. Andererseits brauchte man auch bei einer Wechselstrommaschine unter allen Umständen Gleichstrom, um die Wicklungen ihrer Feldmagnete zu speisen. Eine Wechselstrommaschine bedingte also unter allen Umständen eine zweite kleine Gleichstrommaschine zur Erregung ihres Magnetsystems (Bild 636). Dazu kam, daß, wie im nächsten Abschnitt genauer ausgeführt werden soll, der Gleichstrom für die meisten damaligen Verbrauchsapparate viel geeigneter war als der Wechselstrom. Dagegen traten diejenigen Momente, welche dem Wechselstrom in unseren Tagen wieder das unbedingte Übergewicht verliehen haben, noch nicht in den Vordergrund.

Die Geschichte der Dynamomaschine und mit ihr diejenige der ganzen Starkstromtechnik spielt sich daher folgendermaßen ab. Zur Zeit der Erfindung der Dynamomaschine Ende der sechziger Jahre, stehen sich Gleichstrom und Wechselstrom vollkommen gleichberechtigt gegenüber. Im Laufe der nächsten zehn Jahre führt aber die Ausbildung der Stromerzeuger selbst und in noch stärkerem Maße diejenige der stromverbrauchenden Apparate zu einer Bevorzugung des Gleichstroms. Fast ausschließlich werden die elektrischen Starkstromanlagen als Gleichstromanlagen ausgeführt, und zu Beginn der neunziger Jahre scheint der Sieg des Gleichstroms ein vollständiger zu sein. Dann erst beginnt mit der Erfindung des Drehstroms eine neue Ära, die im Laufe der folgenden Jahrzehnte zum Triumph des Wechselstroms über den Gleichstrom führen sollte.



645. Flachring-Gleichstromdynamo von Schuckert aus den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts

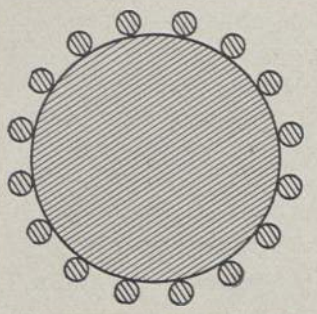
*

Die vorstehenden Ausführungen waren ausschließlich der Entwicklung der maschinellen Starkstromquellen gewidmet, denn erst nachdem diese zur Verfügung standen, konnte ja die Elektrizität wirklich Allgemeingut werden, konnte ernsthaft von einer Elektrotechnik die Rede sein. Welches waren denn nun die Anwendungsmöglichkeiten dieser neuen Naturkraft?

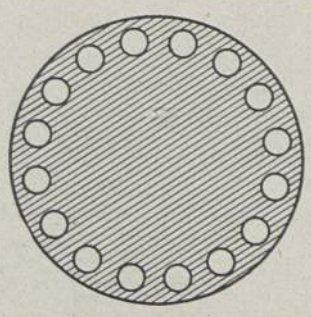
Die Antwort darauf läßt sich nicht mit einem Worte geben. Die elektrische Energie ist durch ihre leichte Umwandelbarkeit in alle anderen überhaupt bekannten Energieformen gekennzeichnet. Sie verwandelt sich in Wärme, sobald Ströme durch Leiter fließen, die ihnen einen gewissen Widerstand bieten. Diese Neigung des Stromes, Wärme zu entwickeln, hatte man ja beim Bau der ersten Dynamomaschinen schmerzlich genug empfunden. Aber wenn der Widerstand genügend groß gewählt und zweckmäßig dimensioniert wurde, dann ließen sich die kalorischen auch bis zu optischen Erscheinungen steigern, ließ sich die Wärmeentwicklung so weit treiben, daß gleichzeitig auch Licht erzeugt wurde.

Diese Erscheinung wurde zunächst im Davyschen Lichtbogen (Bild 655) nutzbar gemacht. Brachte man zwei mit den Polen einer starken Stromquelle verbundene Stifte aus der harten klingenden Kohle, die sich in Gasretorten bildet, zusammen und zog sie dann wieder ein Stückchen auseinander, so bildet sich zwischen ihnen durch die Luft hindurch ein Stromübergang, eben jener Davysche Bogen, und die äußersten Spitzen der Stifte gerieten in hellste,

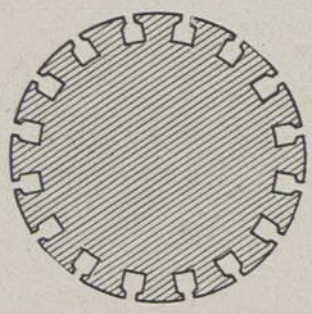
blendende Weißglut. Wir können uns heut im Zeitalter einer hochentwickelten Beleuchtungstechnik kaum noch vorstellen, welchen faszinierenden Eindruck das erste elektrische Bogenlicht auf unsere Eltern und Großeltern machte. Damals war ja die hellste überhaupt vorhandene künstliche Lichtquelle der einfache Gasschnittbrenner, der etwa eine Helligkeit von 16 bis 20 Normalkerzen hergab. Und nun tauchte plötzlich das elektrische Bogenlicht, das künstliche Mondlicht, wie man es poetisch nannte, auf. Schon durch seine Beziehung zur Elektrizität war es mit dem Schimmer des Geheimnisvollen umgeben, durch seine fast weiße Farbe unterschied es sich vorteilhaft von dem rötlichgelben Gaslicht. Und dann hatte eine dieser neuen Lampen auch eine Kerzenstärke von etwa 1000 Normalkerzen, war rund 50 bis 60mal so hell wie eine der damaligen Gasflammen. Was Wunder daher, daß man allenthalben nach dem neuen Licht verlangte, daß sich die Menschen zu Tausenden dorthin drängten, wo eine der neuen wunderbaren Lichtquellen zu sehen war. Nach außen hin war das elektrische Bogenlicht in jeder Beziehung blendend. Diejenigen freilich, die sich mit seiner Technik befaßten und für das gute Funktionieren der ersten Anlagen verantwortlich waren, hatten auch hier mit endlosen Schwierigkeiten zu kämpfen, und die Frage ist schwer zu entscheiden, wo mehr Angstschweiß vergossen wurde, in den Maschinenhäusern der ersten Dynamomaschinen oder bei den ersten Bogenlichtmontagen.



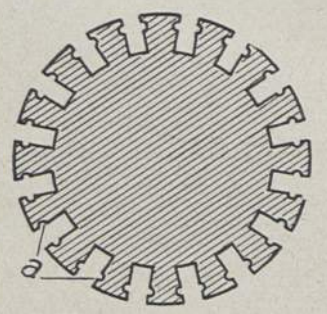
646. GlatterTrommelanker
Der Kupferdraht ist einfach auf die Eisentrommel gewickelt und der Verschiebung durch elektromagnetische Kräfte ausgesetzt



647. Lochanker
Die Kupferdrähte liegen sicher in Bohrungen des Ankerkörpers, aber die Wicklung ist schwierig herzustellen und auszubessern



648. Anker mit halbgeschlossenen Nuten
Die Windungen liegen in Nuten, die durch Keile aus Isoliermaterial verschlossen werden. Die Aufbringung der Windungen ist noch umständlich



649. Anker mit offenen Nuten
Die Windung kann vor dem Einbringen als Schablonenwicklung vollkommen fertig gemacht werden. Die Fabrikation ist einfach und wirtschaftlich

Der elektrische Lichtbogen ist ein auf kleinsten Raum konzentrierter elektrischer Widerstand, durch den große elektrische Energiemengen in Wärme umgesetzt werden. Der Widerstand wird durch den kurzen erhitzten Luftraum zwischen den Kohlenspitzen gebildet und wechselt sehr stark mit dem Abstand der Spitzen. Es kam also in erster Linie darauf an, diese Spitzen nach der Bildung des Lichtbogens in einen richtigen Abstand voneinander zu stellen. Aber damit war es noch nicht getan. Unter dem Einfluß des Sauerstoffes brannten ja die Kohlenstifte langsam ab, und der Zwischenraum zwischen ihnen vergrößerte sich allmählich. Speiste man die Lampe mit Gleichstrom, so brannte zu allem Überfluß der mit dem positiven Pol verbundene Stift noch etwa doppelt so schnell ab wie der negative Stift. Solange es sich nur um eine Demonstration im Physiksaal handelte, konnte man sich mit Handlampen behelfen, bei denen die beiden Kohlenstifte unter Zuhilfenahme eines Werkes von Zahnrädern und Zahnstangen immer wieder von Hand genähert wurden, wenn sie ein Stückchen abgebrannt waren. Aber das Mittel mußte natürlich versagen, sobald man daran dachte, das Bogenlicht irgendwie ernstlich als praktische Lichtquelle zu verwenden. Dann brauchte man Anordnungen, die sich ohne fortwährende Überwachung von selbst regulierten.

Die erste zur Not brauchbare Bogenlampe schuf der Russe Jablochkoff. Er beschränkte sich freilich von Anfang an auf den Wechselstrom, bei dem beide Stifte gleich schnell abbrennen, und traf nun (siehe Bild 657) die verhältnismäßig einfache Anordnung, die beiden Kohlenstifte parallel zueinander in einem Abstande von etwa drei Millimetern und durch eine nichtleitende Gipsschicht getrennt aufzustellen. An den Spitzen waren die Stäbe durch ein ganz feines Kohlenstäbchen verbunden. Ihre unteren Enden steckten in zwei voneinander isolierten Polklemmen. Das war die berühmte Jablochkoffsche Kerze, die mehrere Jahre hindurch die einzige elektrische Lichtquelle blieb. Wurde der Strom eingeschaltet, so brannte zunächst das dünne verbindende Stäbchen an den Spitzen weg und der Lichtbogen bildete sich. Allmählich brannten die Stifte dann ab, während der zwischen ihnen befindliche Gips in der Hitze wegfloß oder verdampfte. Erlosch eine solche Kerze während des Brennens aus irgendwelchen Gründen, so war es nicht möglich, sie ohne weiteres wieder zu entzünden. Ein solches Verlöschen trat aber leider so oft ein, daß die Jablochkoffsche Kerze nicht als betriebsichere Lampe gelten konnte.

Nun lag ja der Gedanke nahe, ein selbsttätiges Regelwerk zu schaffen, welches ausgelöst die Kohlenstifte einander näherbrachte. Die Auslösung dieses Regelwerkes mußte naturgemäß durch den beweglichen Anker eines Elektromagneten erfolgen. Die Frage war nur, wie man die Windungen dieses Magneten schalten sollte. In jenen ersten Jahren der Starkstromtechnik schien man noch in die Hauptstromschaltung verliebt zu sein und wandte sie ebenso wie bei den Dynamomaschinen auch bei den ersten Lampenregelwerken an. Man schaltete also Spule und Lichtbogen hintereinander, so daß der Strom erst die Spule und dann den Lichtbogen durchfließen mußte.

In Verbindung mit einer Hauptstrommaschine mußte eine solche Lampe schon ein ziemlich labiles System bilden. Ganz trostlos aber wurde es, wenn man es versuchte, zwei solcher Lampen entweder neben- oder hintereinander an eine Dynamomaschine zu schalten. Dann brannte entweder die eine Lampe, und die andere ging aus, oder es war umgekehrt. Zu gleichzeitigem Brennen waren sie in keinem Falle zu bringen. In jener Zeit entstand das Schlagwort von der „Teilung des elektrischen Lichtes", das in doppeltem Sinne zu verstehen war. Einmal erstrebte man das Ziel, eine größere Anzahl von Bogenlampen von einer einzigen Dynamomaschine aus zu speisen. Andererseits fand man die Lichtstärke der einzelnen Lampe von tausend Kerzen für viele Zwecke zu hoch und wünschte Lampen von geringerer Lichtstärke.

Die erste Lösung dieses Problems brachte der bereits als Erfinder des Trommelankers erwähnte v. Hefner-Alteneck im Jahre 1878 durch die Schaffung der Differential-Bogen-

lampe. Die Wirkung dieser Lampe beruht auf der Benutzung der Doppelschlußschaltung. Sie enthielt zwei Elektromagnete. Die Windungen des einen waren wie bei den früheren Lampen in den Hauptstromkreis gelegt, die Windungen des anderen in einen Nebenschluß parallel zu dem Lichtbogen (Bild 656). Der Hauptschlußmagnet hatte die Aufgabe, die Kohlen auseinanderzuziehen, der Nebenschlußmagnet diejenige, sie näher zusammenzubringen. Brannte der Lichtbogen richtig, so mußte einerseits eine bestimmte Stromstärke durch die Lampe gehen und andererseits eine bestimmte Spannungsdifferenz zwischen den beiden Kohlenstiften herrschen. Dabei durften Spannung und Stromstärke innerhalb gewisser Grenzen schwanken, sofern nur das Verhältnis zwischen ihnen konstant blieb. Die Wirkung der beiden Elektromagnete war demnach so gegeneinander abzustimmen, daß sie die Lampe dauernd auf ein gleichbleibendes Verhältnis der Stromstärke zur Spannung einregulieren. In der Theorie lief also die Sache darauf hinaus, daß die neue Differentiallampe sich unter Strom vollkommen wie ein Ohmscher Widerstand verhielt, während die früheren Hauptschlußlampen ein unkontrollierbares und kaum definierbares Verhalten gezeigt hatten.

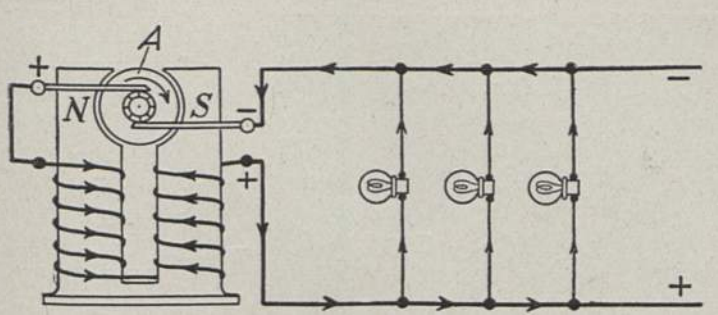
In der Praxis gab es auch hier noch zahlreiche Schwierigkeiten und Rückschläge. Trotzdem aber begann sich die neue Bogenlampe langsam ihr Wirkungsfeld zu erobern. Bereits 1879 wurde der Münchner Zentralbahnhof mit Bogenlichtbeleuchtung versehen, und im Jahre 1880 folgten der Schlesische und der Anhalter Bahnhof in Berlin. Im September 1880 gab es in Köln anläßlich der Domfeier eine großartige elektrische Festbeleuchtung, bei der nicht nur der Dom, sondern auch der Festsaal im Gürzenich beleuchtet wurden. Zu Beginn des Jahres 1881 folgte dann die elektrische Beleuchtung des alten Reichstagsgebäudes in der Leipziger Straße. Bei dieser Anlage ereignete sich übrigens der erste elektrische Unfall, über den Hermann Meyer in seiner trockenen humoristischen Weise berichtet:

„Ein bemerkenswerter Vorgang trug sich im Reichstagsgebäude zu, kurz nachdem die Anlage in Betrieb gesetzt war. Ein Angestellter wollte einigen Herren erklären, wie die Lampen arbeiteten. Zu diesem Zwecke hatte er eine von den Laternen heruntergelassen, die an den Aufziehvorrichtungen hingen. Dabei muß er unvorsichtig gewesen sein. Er hatte bei geöffnetem Stromkreise beide Pole berührt und fiel infolge des Schlages zu Boden. Einer der umstehenden Herren machte den Vorschlag, den in den Körper eingedrungenen Strom unschädlich in die Erde abzuleiten. Der Verunglückte wurde sofort in den Garten geschafft, wo beide Hände in den Erdboden gesteckt wurden. Dort lag der ‚Elektrisierte', bis er sich erholt hatte. Nach Ansicht einiger Zuschauer soll das Verfahren geholfen haben."

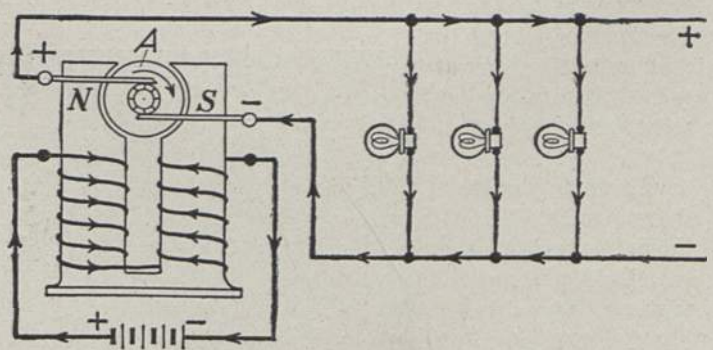
Der Vorfall beweist, daß zu jener Zeit auch die geistigen Führer des deutschen Volkes recht eigentümliche Vorstellungen vom Wesen der Elektrizität besaßen. Erfreulicherweise tat das Vorkommnis der weiteren Ausbreitung des elektrischen Lichtes keinen Schaden.

Der Herbst des Jahres 1881 brachte die erste internationale Elektrizitätsausstellung in Paris, auf der Siemens & Halske, abgesehen von ihren Schwachstromfabrikaten, mit zahlreichen Dynamomaschinen und Bogenlampen vertreten waren. Daß sie auf dieser Ausstellung außerdem noch eine elektrisch betriebene Gesteinsbohrmaschine, eine elektrische Eisenbahn und einen elektrischen Stahlschmelzofen zeigten, sei an dieser Stelle nebenbei erwähnt.

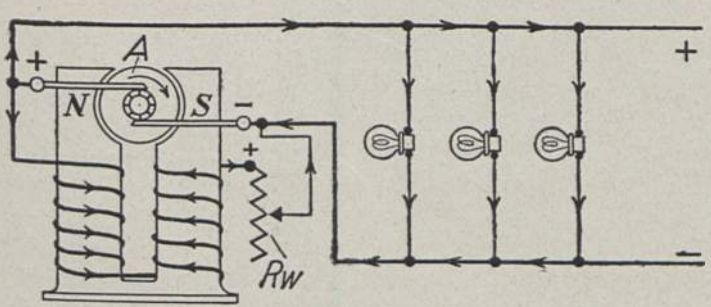
Noch durch etwas anderes, für die weitere Geschichte der Elektrotechnik Grundlegendes ist die Pariser Ausstellung wichtig geworden. Zum erstenmal trat hier Thomas Alva Edison (Bild 661) mit seinem neuerfundenen System der Glühlichtbeleuchtung in Europa an die Öffentlichkeit. Die amerikanische Edison-Company stellte den berühmten „Jumbo" aus. Diesen Elefantennamen trug eine für die damaligen Zeiten geradezu riesenhafte Dynamomaschine von 300 Pferdestärken, die ...



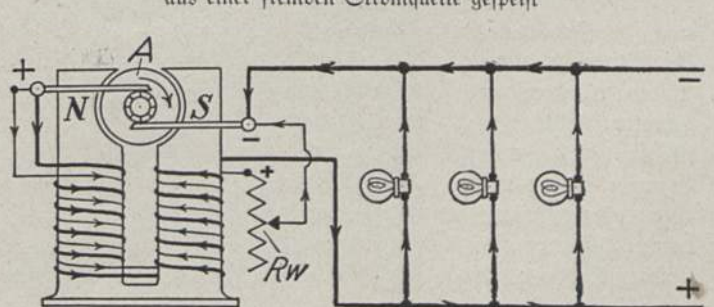

650. Schaltungsschema einer Hauptschluß-Gleichstromdynamo
Der Feldstromkreis und der Verbrauchsstromkreis sind hintereinandergeschaltet




651. Schaltungsschema einer Gleichstromdynamo mit besonderer Felderregung
Die Feldwicklungen sind vom Verbrauchsstromkreis getrennt und werden aus einer fremden Stromquelle gespeist




652. Schaltungsschema einer Nebenschluß-Gleichstromdynamo
Feldstromkreis und Verbrauchsstromkreis sind parallel zueinander an die Ankerbürsten geschaltet




653. Schaltungsschema einer Doppelschluß-Gleichstromdynamo
Das magnetische Feld wird gleichzeitig durch Hauptschluß- und Nebenschlußwicklungen erregt

wiederum eine bahnbrechende Neuheit... unter Verzicht auf den Riemenantrieb direkt mit ihrer Dampfmaschine gekuppelt war. Edison hatte das Problem der Teilung des elektrischen Lichtes von einem ganz anderen Ende her angefaßt. An Stelle des Zwischenraumes zwischen zwei Kohlenstäben wählte er als Lampenwiderstand einen ununterbrochenen elektrischen Leiter von solchen Abmessungen, daß er unter dem Einflusse des Stromes seiner ganzen Länge nach ins Glühen geraten und leuchten mußte. Um den leuchtenden Faden vor der Zerstörung durch den Luftsauerstoff zu schützen, mußte er in ein luftleeres Glasgefäß eingesetzt werden. Das war der Erfindungsgedanke der Glühlampe. Die Erfindung selbst wird recht gut durch die drei Patentansprüche des ersten und grundlegenden deutschen Edisonpatentes gekennzeichnet:

1. Eine elektrische Lampe, die durch Weißglühen Licht gibt, und in der Hauptsache aus Kohlefasern von großem Widerstand besteht, hergestellt und mit den metallischen Drähten verbunden, wie beschrieben.

2. Ein Faden oder Streifen aus Kohlefasern, welcher in solcher Weise in Spiralform gewunden ist, daß nur ein Teil der Oberfläche dieses Kohlenleiters (rund 5 Millimeter) Licht ausstrahlt.

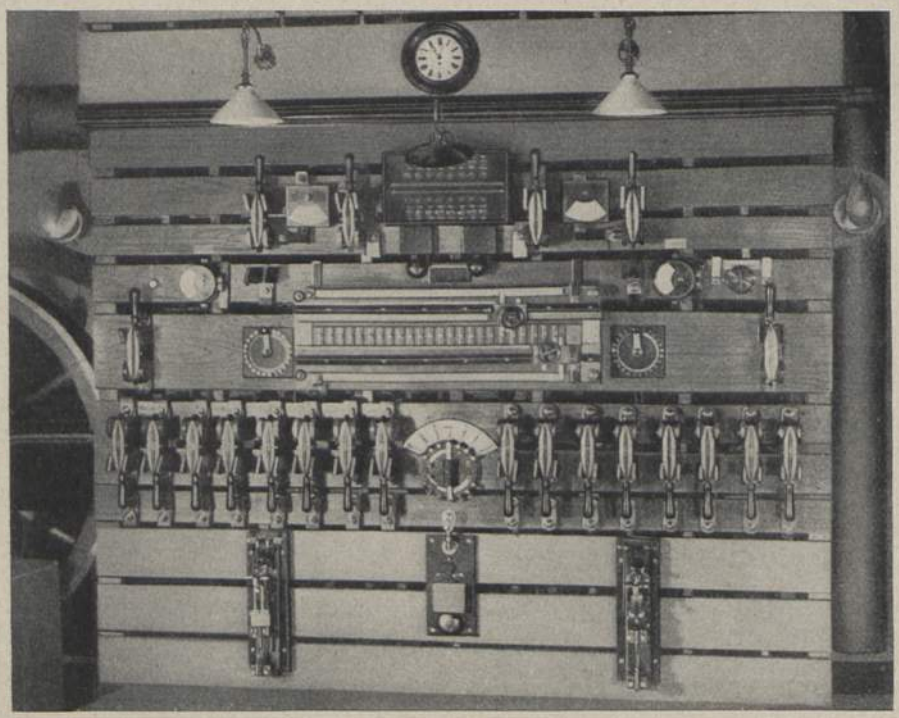
3. Die Platindrähte wie beschrieben an dem Kohlenfaden zu befestigen und das Ganze in einem geschlossenen Gefäß zu karbonisieren.

(Der Widerstand ist je nach der Menge des abgelagerten Lampenrußes klein oder groß herstellbar.)

Der Gedanke, elektrische Lichtquellen unter Verwendung leitender durch den Strom glühender Fäden herzustellen, war an sich schon älter. So wird unter anderem berichtet, daß bereits im Jahre 1859 C. G. Farmer sein Haus in Newport in den Vereinigten Staaten unter Verwendung einer großen galvanischen Batterie mit 42 Platinfadenlampen beleuchtet habe. Aber die wirkliche technische Durchführung des Gedankens gelang doch erst Edison, der mit unglaublicher Zähigkeit Jahre hindurch in seinem Laboratorium zu Menlo Park bei New York an dem Problem arbeitete. 13 Monate hindurch machte er Versuche mit Platindrähten, mit Platin-Iridiumdrähten und zahllosen anderen Metalllegierungen, die sämtlich mißlangen, weil die Drähte immer wieder schmolzen. Durch einen Zufall kam er schließlich auf die Verwendung von Kohle. Die ersten Kohlenfäden wurden von Edison durch die Verkohlung von Baumwollfäden gewonnen. Aber die damit hergestellten Lampen hatten noch eine zu kurze Lebensdauer. Wieder verstrichen Monate, bevor Edison in der Bambusfaser das geeignete Material für die Kohlenfäden entdeckte. Es charakterisiert die eigenartige Arbeitsweise Edisons, daß er in diesem Stadium der Arbeiten Agenten nach sämtlichen Erdteilen schickte, um die verschiedensten Bambusarten für ihn aufzutreiben. Sein Biograph, dem wir die Verantwortung für diese Mitteilung überlassen müssen, berichtet, daß während dieser Zeit nicht weniger als sechzehntausend Proben verschiedenen Bambusrohres in Menlo Park ankamen. Von jeder dieser Proben wurden mehrere Glühfäden angefertigt und die damit hergestellten Lampen so lange gebrannt, so lange ihr Faden hielt. Bis dann schließlich eine bestimmte, wie es heißt, indische Bambusfaser gefunden war, die den Ansprüchen am besten genügte.

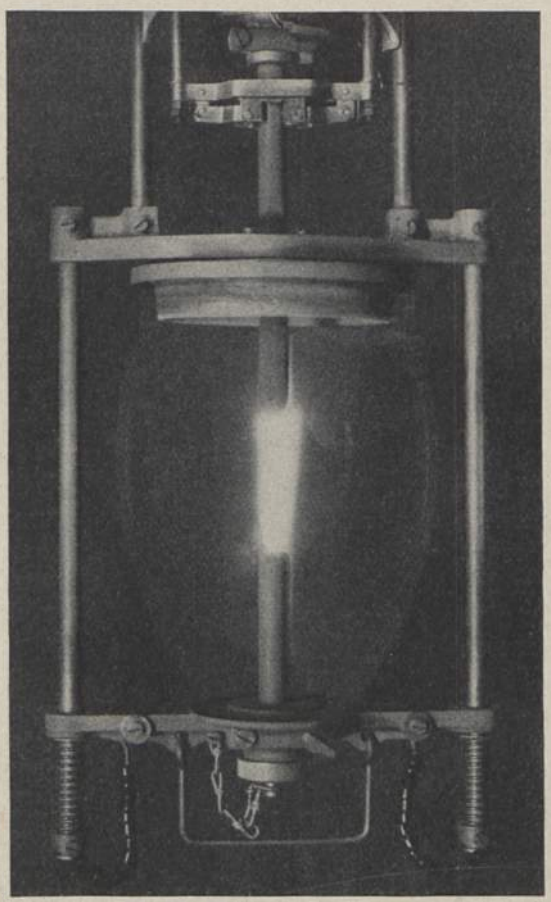
Eine derartige Arbeitsweise erscheint uns heut im Zeitalter der wissenschaftlichen Methodik kaum noch denkbar und möglich. Damals aber galt noch ziemlich allgemein der Grundsatz, daß Probieren über Studieren geht, und an mehr als einer Stelle wurde in ähnlicher Weise gearbeitet. Es mag zum Vergleich nur an die sich ebenfalls über viele Jahre erstreckenden Arbeiten zur Gewinnung guter Bogenlampenkohlen bei Siemens & Halske erinnert werden. Die aus Retortenkohle geschnittenen Stäbe waren ja infolge ihrer ziemlich mühsamen Herstellungsweise recht kostspielig und gaben außerdem einen unruhigen Lichtbogen. Es wurde infolgedessen ein besonderes Laboratorium eingerichtet, aus dem im Laufe der kommenden Jahrzehnte die große Kohlenstiftfabrik von Gebrüder Siemens entstehen sollte. Alle nur denkbaren Arten von Kohlenpulver wurden hier mit allen möglichen Bindemitteln und mineralischen Zusätzen zu Kohlenstiften gepreßt, und tagein tagaus wurden die Erzeugnisse dieser Versuche in Bogenlampen probiert, bis endlich die geeigneten Mischungen, Konstruktionen und Abmessungen gefunden waren.

Edison hatte es sich in den Kopf gesetzt, ein System der elektrischen Beleuchtung zu schaffen, das in der Art seiner Handhabung dem Gaslicht vollkommen ebenbürtig sein sollte, bei dem also jede einzelne Flamme unabhängig von den anderen ein- und ausgeschaltet werden konnte. Dies Ziel ließ sich natürlich nur erreichen, wenn man die damals für Bogenlicht immer noch bevorzugte Reihenschaltung grundsätzlich aufgab und die sämtlichen Glühlampen parallel zueinander an die Leitungen legte. Die Durchführung dieses Gedankens erforderte zunächst eine wenigstens annähernd zutreffende Berechnung der in solchen Anlagen auftretenden Stromstärken und der dadurch bedingten Leitungsquerschnitte. Weiter aber war das ganze System konstruktiv durchzubilden. Es waren also die mannigfachen Schaltapparate zu schaffen, es war eine zuverlässige Sicherung



654. Schaltbrett für vier Dynamomaschinen von zusammen 330 000 Volt-Ampere (500 PS) und eine Akkumulatorenbatterie von 860 Amperestunden Kapazität
Das Schaltbrett ist wirklich noch vom Tischler aus Brettern zusammengesetzt. Man vergleiche damit die modernen Schalttafeln auf Tafel X, 2

der Anlage gegen die Folgen gelegentlicher Kurzschlüsse zu erfinden, und schließlich mußte auch wohl oder übel ein Gegenstück zum Gasmesser geschaffen werden, denn man wollte ja die Elektrizität genau so wie das Gas an die Kundschaft verkaufen. Die Geschichte der Gasbeleuchtung hatte aber gezeigt, daß weder die Gasanstalten noch die Abnehmer mit den sogenannten Pauschaltarifen zufrieden gewesen waren. Ebenso, wie man dort so schnell zu Gasmessern gekommen war, mußte man hier zu irgendwelchen brauchbaren Elektrizitätszählern gelangen. Alle diese Aufgaben löste Edison, während er sich in der Hauptsache mit der Ausbildung der elektrischen Glühlampe beschäftigte, gewissermaßen im Nebenamt, und er löste sie in einer geradezu mustergültigen und heut noch zum größten Teil gebräuchlichen Form. Da war zunächst die Verbindung zwischen Lampe und Leitung. Es war klar, daß Lampe und Leitung in einer unbedingt betriebssicheren Weise miteinander verbunden sein mußten, und zwar so, daß die Verbindung sich nicht durch irgendwelche Erschütterungen von selbst lösen konnte. Aber andererseits mußte auch der Laie imstande sein, eine etwa schadhaft gewordene Lampe durch einen einfachen Handgriff an der unter Strom befindlichen Leitung auszuwechseln, ohne dabei Kurzschluß zu machen oder sonst irgendwie Unheil anzurichten. Die geradezu klassische Lösung dieser Aufgabe wurde durch den Edisonsockel und die Edisonfassung gegeben. Die Lampe bekam den bekannten Gewindesockel, die Fassung ein entsprechendes Gewinde, in das die Lampe mit dem Sockel hineingeschraubt wurde.



655. Der Davysche Lichtbogen zwischen zwei Kohlenstiften
Körting & Matthiesen A.-G., Leipzig

Die Gasflammen hatten den Hahn unmittelbar am Brenner. Edison rechnete mit der Tatsache, daß der Mensch ein Gewohnheitstier ist, und baute gleich in die Lampenfassung einen Ausschalter ein, dessen Griff aufs Haar dem üblichen Griff des Gashahns am Brenner glich. Aber diese Anordnung war mehr für die träge Masse gedacht. Ein Vorteil des neuen Lichtes bestand ja darin, daß man es von jeder beliebigen Stelle aus anzünden und löschen konnte. So entstand gleichzeitig ein System recht praktischer Wandschalter, die es gestatteten, sofort beim Betreten eines Raumes die darin befindlichen Lampen einzuschalten, ohne erst im Dunklen zu ihnen hinlaufen zu müssen.

Und dann war die Sicherungsfrage zu erledigen. Ebenso wie bei Siemens hatte man auch in Menlo Park die unangenehme Erfahrung gemacht, daß der elektrische Strom sich grundsätzlich den Weg des geringsten Widerstandes sucht und dabei gelegentlich ein recht übles Feuerwerk veranstaltet. Berichte jener Zeit aus Menlo Park erzählen, daß bei den ersten Versuchen mit Dynamomaschinen das Kupfer kilogrammweise geschmolzen sei. Dagegen gab es nur ein einziges zuverlässiges Mittel: Den Strom automatisch zu unterbrechen, sowie er eine unzulässige Höhe erreichte. Das Mittel dazu waren die Schmelzsicherungen, die von Edison in einer mustergültigen Weise ausgebildet wurden. Das Prinzip der Schmelzsicherung ist ja sehr einfach. An einer bequem zugänglichen Stelle der Leitung schaltet man in diese, gut in feuerfestes Material eingebaut, ein Stückchen Leitung ein, das so bemessen ist, daß es bereits bei einer Stromstärke durchschmilzt und den Strom unterbricht, bei der die übrige Leitung noch keiner gefährlichen Erwärmung ausgesetzt ist. Aus welchem Metall man dies sichernde Leitungsstückchen herstellt, ist an sich vollkommen gleichgültig. Man kann dafür Blei nehmen, das sich durch einen sehr niedrigen Schmelzpunkt auszeichnet, und das geschah auch zunächst. Heute dagegen bestehen die „Bleisicherungen" meistenteils aus Silberdraht, obwohl Silber einen höheren Schmelzpunkt als das Kupfer besitzt und auch besser als dieses leitet. Aber gerade dieser letzteren Eigenschaft wegen kann man die Schmelzdrähte aus Silber so fein wählen, daß ihre geringe Masse im Falle eines Kurzschlusses verpufft, ohne irgendwie nennenswerte Feuererscheinungen hervorzurufen. Auch für die Sicherungen wandte Edison sein Gewindesystem an. Die Sicherungsstöpsel selbst trugen das gleiche Gewinde wie die Lampensockel und wurden in ein Gewinde hineingeschraubt, welches dem der Lampenfassung glich. Durch diese Anordnung war auch eine einfache und gefahrlose Auswechslung etwa durchgebrannter Sicherungen von Laienhand gewährleistet.

Mit diesem vorstehend geschilderten Beleuchtungssystem erschien nun Edison auf der Pariser Ausstellung von 1881. Die Beurteilung, die er hier fand, war recht verschieden. Man darf dabei ja nicht vergessen, daß seine Kohlenfadenglühlampen ein gelbliches, in der Farbe durchaus dem Gaslicht ähnliches Licht gaben, und daß die durchschnittliche Lichtstärke der einzelnen Lampe mit etwa 16 Normalkerzen auch durchaus derjenigen des Gasschnittbrenners entsprach. Die Mehrzahl der Ausstellungsbesucher ließ sich aber von den tausendkerzigen, fast weiß brennenden Bogenlampen viel mehr imponieren, ohne an die Verwendung der elektrischen Beleuchtung in kleineren Innenräumen zu denken. Es gab auch geradezu absprechende Urteile. So hielt ein namhafter Techniker im Saal der Ausstellung einen wissenschaftlichen Vortrag, in dem er die Edisonsche Erfindung mit Ironie abtat und am Schluß die Behauptung aufstellte, daß in Paris eine Edisonsche Glühlichtanlage zum ersten- aber auch wohl zum letztenmal in Betrieb gewesen sei.

Auf einen der Ausstellungsbesucher aber machte die Edisonsche Erfindung einen solchen Eindruck, daß er darüber in seinen Tagebuchaufzeichnungen schrieb:

„Edisons Beleuchtungssystem war bis in die Einzelheiten so genial erdacht und sachkundig durchgearbeitet, daß man meinte, es sei in unzähligen Städten jahrzehntelang erprobt gewesen. Weder Fassungen, Umschalter, Schmelzsicherungen, Lampenträger noch andere zur Installation gehörige Gegenstände fehlten, und die Stromerzeugung, die Regulierung, die Leitungen mit ihren Abzweigen, Hausanschlüssen, Elektrizitäts-

messern usw. waren mit staunenswertem Verständnis und unvergleichlichem Genie durchgebildet."

Es war Emil Rathenau, der diese Worte schrieb, ein Ingenieur aus Berlin, der damals im dreiundvierzigsten Lebensjahre stand und seit fast einem Jahrzehnt nach dem Verkauf seiner Maschinenfabrik als Privatier lebte. Ein Mann, der für viele seiner Bekannten und Verwandten ein psychologisches Rätsel war. Nur die wenigsten konnten es begreifen, wie ein Mensch auf der Höhe der Schaffenskraft sich so plötzlich von jeder aktiven Tätigkeit zurückzog und ein volles Jahrzehnt hindurch, für den oberflächlichen Beschauer wenigstens, das müßige Leben eines Nichtstuers führte. Nur die wenigen, die tiefer blickten, erkannten die Gründe, und am besten hat sie wohl Riedler in seiner Biographie Rathenaus formuliert. Er sagt darüber:

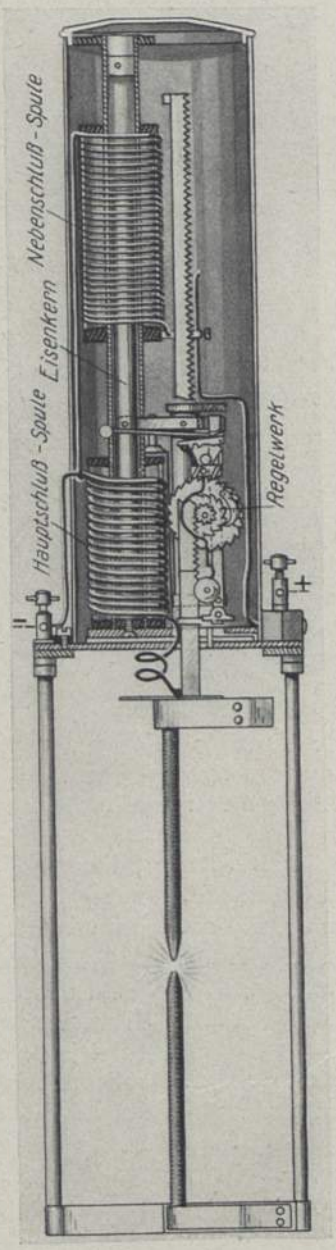
„Die äußerlich sichtbare Tätigkeit Rathenaus in seiner Maschinenfabrik kennzeichnet den Zusammenhang mit seinen späteren Werken nicht ausreichend, es muß sein unerfülltes Streben gewürdigt werden. Er hat dieses Arbeitsfeld gesucht, sich darauf aber bald tief unbefriedigt gefühlt."

Und weiter:

„Wenn ich die damaligen Eindrücke rückschauend zusammenfasse und spätere Eindrücke auszuscheiden versuche, so scheint mir, der wahre Grund, weshalb Rathenau die Tätigkeit in einer der damaligen Fabriken nicht befriedigen konnte, lag in seiner Überzeugung, daß alle Maschinen unwirtschaftlich seien, daß die Fabriken mit dem Bau unbrauchbarer Maschinen beschäftigt seien, die keinen Kunden befriedigen könnten, während sein Streben nach billiger Massenherstellung und nach Kraftversorgung in Städten unerfüllbar war, und lag darin, daß ihn der enge Wirkungskreis des Maschinenbaues alter Art mit seinen zufälligen Tagesarbeiten überhaupt nicht befriedigen konnte."

In Wirklichkeit ist Emil Rathenau während der zehn Jahre dieser scheinbaren Ruhe nicht untätig gewesen. Mit aufmerksamem Auge verfolgte er die Entwicklung der Dinge und war auf jeder der großen in dieses Jahrzehnt fallenden Ausstellungen zu finden. Immer wieder suchte er das, was ihm dankbare Lebensaufgabe werden, seinem Leben einen neuen Inhalt geben könnte. Als er jetzt auf der Pariser Ausstellung vor der Edisonanlage stand, da wußte er, daß er gefunden habe, was er so lange gesucht. Kurz entschlossen kabelte er an Edison und bat ihn, zu einer wichtigen geschäftlichen Abmachung nach Paris zu kommen. Edison, wie stets überbeschäftigt, lehnte dankend ab und verwies den gänzlich unbekannten Herrn Rathenau an seine europäische Vertretung.

Das war nun eine üble Sache. Edison hatte zur Verwertung seiner Patente eine Gesellschaft in London und eine andere auf dem Kontinent gegründet. Die letztere hatte wiederum zwei Untergesellschaften in die Welt gesetzt. Die Rechtsverhältnisse und Kompetenzen zwischen diesen Gesellschaften waren reichlich unklar. Manch anderer hätte darüber die Flinte ins Korn geworfen. Emil Rathenau ließ sich nicht abschrecken. Er knüpfte erfolgreiche Unterhandlungen einerseits mit der Compagnie Continentale Edison und andererseits mit einer deutschen Finanzgruppe an, und noch im Jahre 1881 wurde mit einem Kapital von 250 000 Mark eine Studiengesellschaft zur Einführung der Edisonschen Erfindungen in Deutschland gegründet.




656. Differentialbogenlampe von v. Hefner-Alteneck

Eine Hauptschluß- und eine Nebenschlußspule wirken gemeinsam auf das Regelwerk der Lampe. Die Regelung erfolgt derart, daß das Verhältnis von Lampenspannung und Lampenstrom konstant bleibt. Die Lampe verhält sich daher im Stromkreise genau wie ein Ohmscher Widerstand

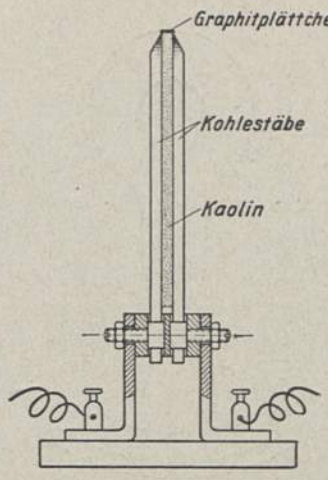
Die erste Aufgabe der jungen Gesellschaft mußte es naturgemäß sein, durch die Anlage von Glühlichtbeleuchtungen in Deutschland für das neue Licht Propaganda zu machen und Interessenten zu werben. So entstanden als erste derartige Installationen die Beleuchtungsanlagen im Unionklub in der Schadowstraße und in der benachbarten „Ressource von 1794". Die Ressource veranstaltete zur Einweihung der neuen Beleuchtung ein Bankett, das so etwas wie ein gesellschaftliches Ereignis für Berlin bedeutete. Aber!... hören wir, was Felix Pinner, der Biograph Emil Rathenaus, darüber berichtet:

„Gerade während Hugo Pringsheim in einer schwungvollen Rede das neue Licht und den Schöpfer der Anlage, Emil Rathenau, feierte, verdüsterte sich allmählich das Licht, und der diensthabende Ingenieur meldete mit schreckensbleichem Gesicht, daß er die Anlage nicht halten könne. In der gehobenen Festesstimmung bemerkte niemand das Verschwinden des Ehrengastes, der im Gesellschaftsanzuge die persönliche Führung der Anlage bis zum Morgen übernahm und mit zwei Ingenieuren durch eifriges Kühlen der Lager mit dem für die Sektkühler bestimmten Eis den Betrieb aufrechterhielt. Ein Verlöschen des Lichts an dieser sichtbaren Stelle wäre ein harter Schlag für das Schicksal der elektrischen Beleuchtung geworden und noch ein stärkerer für das Schicksal des in der Gründung befindlichen Unternehmens, dessen Aktien in kurzer Zeit herausgebracht werden sollten. Das Gelingen wirkte dagegen wie eine besonders wirksame Propaganda. Weitere Privatanlagen entstanden bald in Berlin."

Das Jahr 1882 brachte die erste von Oskar von Miller veranstaltete deutsche Elektrizitätsausstellung in München. Hier war die junge Studiengesellschaft mit einem kleinen Modelltheater vertreten, auf welchem alle Möglichkeiten des elektrischen Glühlichtes für die Zwecke der Bühnenbeleuchtung gezeigt wurden. Gerade dies Ausstellungsobjekt brachte der Gesellschaft beachtenswerte Erfolge. Der Intendant der Münchener Hoftheater bestellte sofort eine elektrische Beleuchtung für das Königliche Residenztheater. In der Tat war ja das neue Licht der bisher auf den Bühnen üblichen Gasbeleuchtung in zweifacher Beziehung ganz gewaltig überlegen. Bot es doch einmal den Vorteil einer absoluten Feuersicherheit und gewährte ferner die Möglichkeit von bisher kaum geahnten Licht- und Farbeneffekten. Allein die Aussicht, im Laufe der nächsten Jahre einen namhaften Teil der deutschen Bühnen mit dem neuen Beleuchtungssystem zu versorgen, bot aber ein Betätigungsfeld, das weit über den Rahmen einer einfachen

Studiengesellschaft mit einem geringfügigen Kapital hinausging.

Nun hatte Emil Rathenau 1882 aus der Not eine Tugend gemacht und sich mit der Gründung der Studiengesellschaft begnügt, weil damals gerade wieder einmal eine Finanzkrise durch Europa ging und größere Kapitalien schwer zu haben waren. Jetzt hatten sich die Verhältnisse gebessert, und so schritt er 1883 zur Gründung einer sehr viel kapitalkräftigeren Erwerbsgesellschaft, der Deutschen Edison-Gesellschaft für angewandte Elektrizität, die im Mai mit einem Kapital von 5 Millionen Mark errichtet wurde und bereits in den acht Monaten ihres ersten Geschäftsjahres 12 000 Glühlampen mit 138 Dynamomaschinen in Betrieb setzte.




657. Jablochkoffsche Kerze
Zwei voneinander isolierte, parallele Kohlenstäbe brennen bei einer Beschickung mit Wechselstrom gleich schnell ab. Der Lichtbogen behält während der ganzen Brenndauer die gleiche Länge

Die neue Gesellschaft verfügte zunächst einmal als Rechtsnachfolgerin der Studiengesellschaft über die Edison-Patente innerhalb der Grenzen des Deutschen Reiches, wofür sie an die Compagnie Continentale eine mäßige Lizenzgebühr zu zahlen hatte. Es blieb ihr noch eine andere sehr wichtige, ja man kann sagen, für ihre ganze weitere Zukunft entscheidende Angelegenheit zu erledigen übrig, nämlich eine vertragliche Verbindung und Auseinandersetzung mit der Firma Siemens & Halske.

Der Name Siemens bedeutete damals in Deutschland die Elektrotechnik schlechthin. Es gab in Deutschland, ja vielleicht in der ganzen Welt keine Firma, die größere Erfahrungen und ältere Ansprüche auf dem Gebiete der angewandten Elektrizität gehabt hätte. Auch war bereits zwischen der europäischen Edisonvertretung und der Firma Siemens & Halske ein Vertrag geschlossen worden, durch den die beiden Gruppen sich den gegenseitigen Schutz ihrer Patente gewährleisteten und ihre gegenseitigen Rechte und Pflichten festlegten. Die Deutsche Edison-Gesellschaft trat für das Gebiet Deutschlands zunächst in diesen Vertrag ein und schloß ein weiteres Abkommen mit Siemens & Halske, durch welches das Tätigkeitsgebiet der beiden Gesellschaften für die nächsten Jahre geregelt wurde. In der Hauptsache lief der Vertrag darauf hinaus, daß die Firma Siemens & Halske darauf verzichtete, städtische Konzessionen nachzusuchen und dies Geschäftsgebiet der Deutschen Edison-Gesellschaft überließ. Dafür verpflichtete sich diese, alle für derartige Anlagen notwendigen Apparate und Maschinen, soweit sie nicht unmittelbar unter die Edison-Patente fielen, von Siemens & Halske zu beziehen.

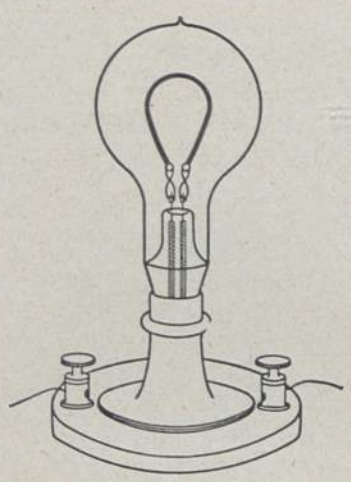
Dieser Vertrag hat nun eine sehr verschiedenartige Beurteilung erfahren. Die einen sagten, Siemens & Halske haben sich in den lukrativen Maschinenlieferungen den Löwenanteil gesichert und Rathenau muß sich mit Kleinkram begnügen. Die anderen meinten, wie ist es nur denkbar, daß die mächtige Firma Siemens & Halske eine solche Konkurrenz aufkommen läßt. In Wirklichkeit dürfte es wohl so gewesen sein, daß man einerseits bei Siemens & Halske die Zukunftsmöglichkeiten der jungen Starkstromtechnik und die gewaltigen im Konzessionsgeschäft liegenden Verdienstmöglichkeiten nicht voll übersah, und daß es andererseits Werner Siemens, der einen Weltruf als Wissenschaftler und Erfinder zu wahren hatte, widerstrebte, irgendwelche wirtschaftlichen Pressionen auf die neubegründete Konkurrenz auszuüben. Dazu kam wohl noch im weiteren der Umstand, daß schließlich alle Patentrechte nur eine verhältnismäßig kurze Lebenszeit besitzen und das Entstehen einer mehr oder minder kräftigen Konkurrenz daher auf die Dauer doch nicht zu verhindern gewesen wäre. In der Tat entstanden ja auch in den folgenden Jahren noch zahlreiche andere Elektrizitätsgesellschaften in Deutschland, von denen hier nur die Schuckertwerke, Bergmann & Co. und die Lahmeyer A.-G. genannt sein mögen. Jedenfalls beginnt vom Jahre 1883 an eine intensive Tätigkeit der Deutschen Edison-Gesellschaft, die ihren Namen schon 1887 in Allgemeine Elektricitätsgesellschaft umwandelte. Zunächst noch eine Tätigkeit, die von Gegnern achselzuckend als diejenige eines Industriebankiers bezeichnet wurde. Dann aber, von Jahr zu Jahr immer freier werdend, immer weniger durch Verträge eingeengt, eine fabrizierende, bauende und finanzierende Tätigkeit, die schließlich auch die alte Konkurrenzfirma Siemens & Halske zu der gleichen Regsamkeit zwang.

Aber wir sind den Ereignissen vorausgeeilt und müssen noch einmal in die Jahre nach der Erfindung der Dynamomaschine zurückkehren. Die erste und nächstliegende Anwendung des von dieser Maschine so reichlich und wirtschaftlich gelieferten Starkstromes galt der Erzeugung von Licht und führte zur Entwicklung der Bogen- und Glühlichtbeleuchtung. Doch damit waren die Möglichkeiten des elektrischen Stromes noch bei weitem nicht erschöpft. In der Dynamomaschine wurde mechanische Arbeit in elektrische Energie verwandelt. Aber die Gleichstromdynamomaschine war ein umkehrbarer Apparat. Man konnte ihr auch elektrische Energie zuführen und den entsprechenden Betrag an mechanischer Energie von ihrer Riemenscheibe abnehmen. Der Starkstrom war also auch für eine Energieübertragung oder, wie man physikalisch nicht ganz richtig zu sagen pflegt, Kraftübertragung geeignet. Die gewaltigen Möglichkeiten, die darin liegen, hat man überhaupt erst in den neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts einigermaßen auszuschöpfen begonnen, während die achtziger Jahre hauptsächlich dem elektrischen Licht und den Lichtzentralen gewidmet waren.

658. Friedrich von Hefner-Alteneck (1845—1906)
Erfinder der Differentialbogenlampe, des Trommelankers und der Hefnerlampe (Normalkerze)

Auf das Schlagwort von der „Teilung des Lichtes" folgte zehn Jahre später dasjenige von der „Teilung der Kraft". In der elektrischen Zentrale sollten tausendpferdige, mit bestem Wirkungsgrade arbeitende Dampfdynamomaschinen stehen. Jeder Industrielle und Gewerbetreibende aber sollte in seinem Betriebe je nach seinem Kraftbedarf Elektromotoren von

100, von 10, von 1, ja von $^1/_{10}$ Pferdestärken haben, die ihm seine Maschinen trieben und zu jeder Stunde betriebsbereit waren. Das wirtschaftliche Bedürfnis für etwas Derartiges war vorhanden, wie unter anderem die nach dem Poppschen Druckluftverfahren in Paris errichteten Energiezentralen bewiesen. Aber erst den ursprünglich und hauptsächlich für die Lichtversorgung errichteten elektrischen Zentralen gelang die Befriedigung dieses Bedürfnisses.



659. Edisons erste Glühlampe aus dem Jahre 1878
Der Glühfaden besteht aus verkohltem Papier

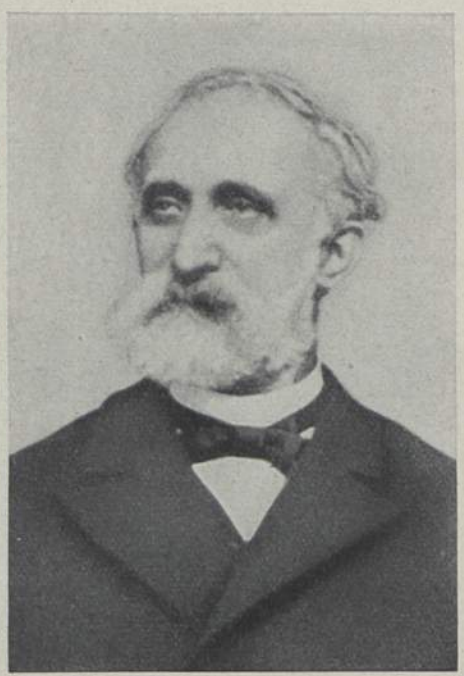
Auch damit sind die Anwendungsmöglichkeiten des Stromes noch nicht erschöpft. Seine Energie läßt sich mit einfachen Mitteln auch in chemische Arbeit und chemische Wirkung umsetzen, wie das gegenwärtig in allergrößtem Maßstabe zur Gewinnung des Aluminiums und zur Bindung des Luftstickstoffes geschieht. Und schließlich hat auch die Möglichkeit, mit Hilfe des elektrischen Stromes genau regelbare Wärmegrade von fast beliebiger Höhe zu erzeugen, zu zahllosen Konstruktionen elektrischer Öfen und anderer elektrisch beheizter Wärmeapparate geführt. Während die ersten drei Wandlungsmöglichkeiten des Stromes in Licht, Kraft und chemische Wirkungen heute längst voll ausgenutzt werden, sind die Dinge auf dem Gebiete der Elektro-Wärmewirtschaft noch in der Entwicklung. Aber schon heute läßt sich wohl sagen, daß die elektrische Küche und höchstwahrscheinlich auch das elektrische Fernheizwerk nur noch Fragen einer gar nicht so fernen Zeit sein dürften.

Als 1883 die Deutsche Edison-Gesellschaft in das Leben trat, handelte es sich zunächst nur um das elektrische Licht. Ähnlich wie bisher das Gas sollte nun der elektrische Strom von Zentralstellen aus dem einzelnen Abnehmer ins Haus geleitet werden. Solange man sich dabei auf die sogenannte Blockzentrale, d. h. auf die Versorgung eines einzigen Straßenblocks von einer Erzeugungsstelle aus beschränkte, war das eine private Angelegenheit, bei welcher der Unternehmer lediglich mit den einzelnen Hausbesitzern dieses Blocks wegen der Inanspruchnahme ihrer Grundstücke und Häuser durch die Kabel und sonstigen Installationen zu verhandeln hatte. Aber das Bild änderte sich, sobald man dazu überging, ganze Straßenzüge und Stadtviertel von einer einzelnen Zentrale aus zu versorgen. Dann mußten für die Kabel die öffentlichen Straßen in Anspruch genommen werden, und dann waren Konzessionsverträge notwendig, wie sie ja auch in früheren Jahrzehnten Gaswerke und Wasserwerke mit den Städten geschlossen hatten. Das aber stand für den Gründer und Leiter der Deutschen Edison-Gesellschaft von Anfang an fest, daß die Blockzentrale nur vorübergehend als Propagandamittel Existenzberechtigung haben dürfe, die Zukunft aber der Stadtzentrale gehören müsse.

Es lag in der Natur der Sache, daß die Reichshauptstadt in erster Linie für das neue elektrische Licht in Betracht kommen mußte, und so wurde am 24. Januar 1884 mit der Stadt Berlin ein Vertrag geschlossen, in dem diese der Edison-Gesellschaft das Recht, die öffentlichen Straßen mit ihren Kabeln zu belegen, einräumte. Dafür verpflichtete sich die Gesellschaft zu einer 10%igen Abgabe von der Bruttoeinnahme aus der Stromlieferung, sowie zu einer 25%igen Abgabe von demjenigen Reinertrage, der nach Verteilung einer Dividende von 6% noch übrigblieb. Außerdem konnte der Berliner Magistrat gegen bestimmte in diesem Vertrage festgesetzte Entschädigungen die elektrische Beleuchtung von Straßen und städtischen Gebäuden verlangen. Das war also das erste und vielleicht größte jener Konzessionsgeschäfte, die der Edison-Gesellschaft in dem Siemens-Vertrage zugestanden worden waren. Zur Durchführung dieses Geschäftes wurde am 8. Mai 1884 mit einem Aktienkapital von 3 Millionen Mark unter dem Namen „Berliner Elektrizitätswerke" eine besondere Aktiengesellschaft gegründet. Auf diese Gründung zielt bereits ein Passus im ersten Geschäftsbericht der Deutschen Edison-Gesellschaft hin, in dem es heißt:

„Im übrigen liegt es nicht in unserer Absicht, den liquiden Vermögensstand dauernd durch eigene Übernahme großer Zentralstationen zu alterieren. Vielmehr verfolgen wir das System, solche Stationen mit Hilfe unserer Geldmittel zwar einzurichten, dieselben aber spätestens nach erfolgter Inbetriebsetzung selbständigen Gesellschaften zu überlassen, um so unser Kapital immer wieder für neue Unternehmungen flüssig zu machen."

Die neugegründete Gesellschaft errichtete zunächst zwei Werke, das eine in der Markgrafenstraße, das andere in der Mauerstraße. Das erste wurde im August 1885 mit sechs Dampfmaschinen von je 150 Pferdestärken und 12 Dynamomaschinen in Betrieb genommen, das andere im März 1886 mit 3 Dampfmaschinen und 6 Dynamomaschinen. Die Dampfmaschinen waren die typischen Schnelläufer und arbeiteten mit Riemenantrieb auf die Dynamomaschinen.



660. Heinrich Göbel
Ein Vorläufer Edisons, der Erfinder des ersten in einer luftleeren Glasglocke brennenden elektrischen Glühlichtes

Professor Slaby, der bekannte Dozent für Elektrotechnik an der Hochschule zu Charlottenburg, besuchte die Zentrale in der Markgrafenstraße und rief beim Anblick der hier in einer langen Reihe arbeitenden Maschinen: „Die Lichtzentrale des kommenden Jahrhunderts."

„O nein!" erwiderte ihm Rathenau lächelnd. „Wie verkennen Sie den unersättlichen Elektrizitätshunger der Menschheit, der in wenigen Jahren sich einstellen wird. Statt dieser Kellerräume mit ihrem ohrenbetäubenden Lärm sehe ich hohe, luftige Riesenhallen mit vieltausendpferdigen Maschinen, die automatisch und geräuschlos Millionenstädte mit Licht und Kraft versorgen. Zuvor haben wir den Maschinenbau für diese Leistungen zu erziehen."

Was Rathenau hier mit prophetischem Blick voraussah, erfüllte sich schneller,

als er selbst wohl damals ahnte. Schon in den Jahren 1887 und 88 wurden zwei große neue Werke in der Spandauer Straße und am Schiffbauerdamm eröffnet, die mit langsam laufenden Dampfmaschinen von je tausend Pferdestärken ausgerüstet waren (Bild 669). Die Dynamomaschinen, Siemensmaschinen der Innenpoltype, waren direkt mit den Dampfmaschinen gekuppelt. Endgültig war es jetzt mit den unwirtschaftlichen Schnelläufern und dem wenig zuverlässigen Riemenbetrieb vorbei. Für das schnelle Anwachsen des Elektrizitätsbedarfes mag die Tatsache sprechen, daß die Zentrale am Schiffbauerdamm, welche die Dorotheenstadt mit Strom zu versorgen hatte, in wenigen Jahren auf eine Leistung von 6000 Pferdestärken ausgebaut wurde. Von nun an war der Fortschritt nicht mehr aufzuhalten, und von Jahr zu Jahr stieg die Leistungsfähigkeit der Berliner Elektrizitätswerke in der Weise, wie die in Bild 689 gegebene Darstellung es erkennen läßt.

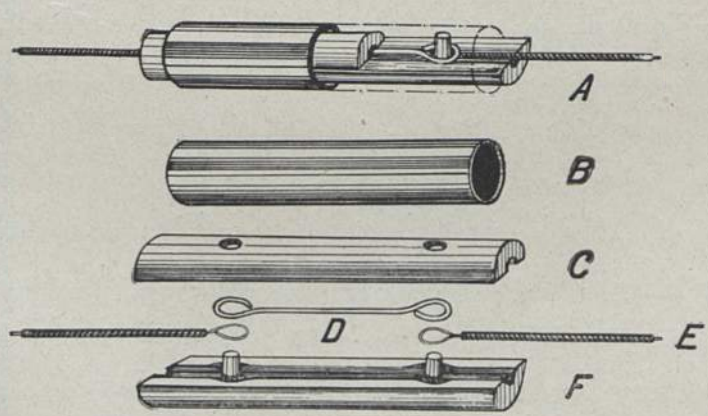
661. Thomas Alva Edison

Der Erfinder der Kohlenfadenglühlampe und der Schöpfer der elektrischen Glühlichtbeleuchtung. Geb. 1847 zu Milan in Ohio

Aus dem Corpus Imaginum der Photographischen Gesellschaft, Berlin

Die Berliner Elektrizitätswerke waren ursprünglich ebenso wie die älteren Gaswerke als reine Beleuchtungswerke gedacht. Nun liegt es aber in der Natur der Sache, daß man künstliches Licht, abgesehen von einigen wenigen stets dunklen Räumen, nur dann braucht, wenn das Tageslicht schwindet. Aus diesem Umstande ergab sich jedoch eine recht ungünstige Belastungsweise der Zentralen. Der Stromverbrauch setzte erst mit Beginn der Dämmerung in den Abendstunden ein, erreichte etwa gegen acht Uhr abends seinen Höchstwert, um dann nach Schluß der Geschäfte und Büros wieder abzuflauen und gegen Mitternacht fast auf Null zu sinken. Die ganze Maschinenanlage der Zentrale mußte aber natürlich für die Höchstleistung, die sogenannte Belastungsspitze, bemessen werden. Das war in doppelter Hinsicht schädlich. Einmal arbeiten halbbelastete Maschinen an sich ungünstiger, da sie für die gleiche Leistung einen höheren Dampfverbrauch haben als vollbelastete. Außerdem aber frißt auch eine stillstehende Maschine dauernd Kapital für ihre Verzinsung und Amortisation, mit anderen Worten, die Maschine muß in den wenigen Stunden, die sie täglich in Betrieb ist, ihre Verzinsung und Amortisation für den ganzen Tag verdienen. Aus diesen Gründen suchte man mit allen Mitteln den Elektromotorenbetrieb zu propagieren, da durch diesen ja auch während der hellen Stunden eine Belastung der Werke und damit eine Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit zu erhoffen war. Während des ersten Jahrzehntes bürgerte sich die elektrische Kraftübertragung zwar nur sehr langsam ein. Noch im Jahre 1893 betrug die Belastung durch Elektromotoren nur 10% der Lichtbelastung. Aber schon im Jahre 1896 war sie auf die Hälfte derselben angewachsen, und im Jahre 1899 war die Kraftbelastung bereits größer als die Lichtbelastung. Die Verbindung der beiden Belastungen gab einen guten Ausgleich, da in der Hauptsache die Elektromotoren in den zahlreichen industriellen Betrieben ja während der hellen Stunden Strom verbrauchen. Immerhin blieben auch jetzt noch Belastungsspitzen, deren Bewältigung durch einen entsprechenden Ausbau der Maschinenstationen unwirtschaftlich gewesen wäre. Erfreulicherweise gab die inzwischen gut vervollkommnete Erfindung des Stromspeichers, des Bleiakkumulators, ein Mittel an die Hand, um der Belastungsspitzen auf eine wirtschaftlichere Weise Herr zu werden. Bei den Berliner Elektrizitätswerken ging man während jener ersten Jahre, in denen die Belastung durch Kraftbetrieb noch fehlte, sogar so weit, neue Werke für die Versorgung bestimmter Bezirke lediglich als Akkumulatorenwerke auszubauen und die elektrische Energie während der Tagesstunden durch die zu dieser Zeit unbeschäftigten Maschinen der anderen Werke dort speichern zu lassen.

Der bedeutende wirtschaftliche Erfolg, den die Berliner Elektrizitätswerke schon wenige Jahre nach ihrer Gründung verzeichnen konnten, reizte bald zur Nacheiferung an. In schneller Folge entstanden in zahlreichen Städten ähnliche Unternehmungen, zunächst noch auf dem Wege der Konzessionsvergebung, von Privatgesellschaften errichtet und betrieben. Bald aber begriffen die Stadtverwaltungen, daß der Betrieb eines Elektrizitätswerkes für den Stadtsäckel ebenso lohnend sei wie derjenige eines Gas- oder Wasserwerkes, und begannen, soweit noch keine Konzessionen vergeben waren, ihre Elektrizitätswerke auf eigene Kosten zu errichten und zu betreiben. In der knappen Zeit eines Jahrzehnts hatte die junge Starkstromtechnik sich glänzend durchgesetzt und begann ihren Siegeslauf über die ganze Welt.



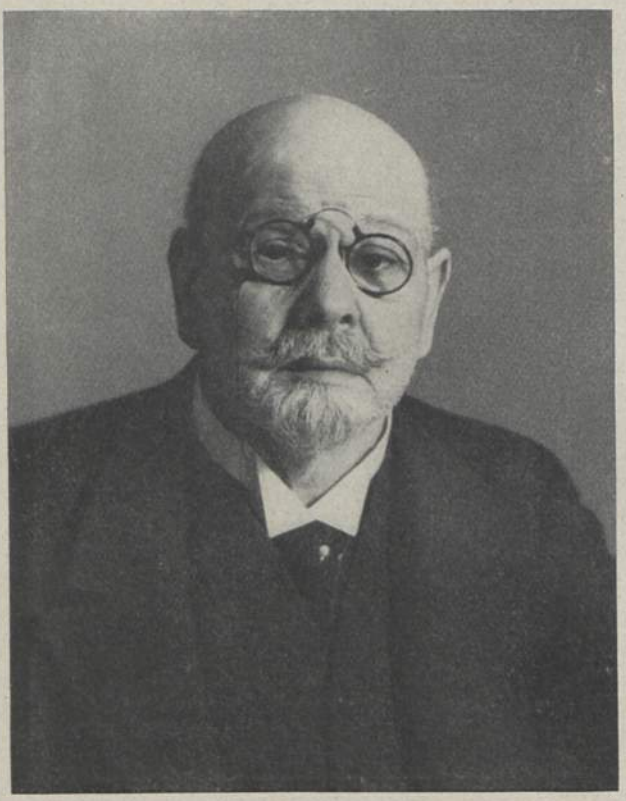

662. Primitive Bleisicherung aus der Anfangszeit der Starkstromtechnik

Der Schmelzdraht ist noch in Holz, ein feuergefährliches Material, gebettet. A betriebsfertige Sicherung, B Metallschutzbüchse, C obere Holzeinbettung, D Schmelzdraht, E Leitung, F untere Holzeinbettung

*

Die elektrischen Kraftwerke, die im Laufe der achtziger Jahre entstanden, führten ihre Bezeichnung als elektrische Zentralen mit gutem Recht, weil sie wirklich im Zentrum des von ihnen zu versorgenden Gebietes lagen. Es mag zum Beweis für diese Behauptung nur an die bereits erwähnten ersten vier Kraftwerke der Berliner Elektrizitätswerke erinnert werden. Diese Lage in der Mitte des Versorgungsgebietes hielt die Wege, die der Strom von der Erzeugungs- zur Verbrauchsstelle zurückzulegen hatte,

ziemlich kurz, gestattete, mit erträglichen Kabelmengen auszukommen und ermöglichte dadurch eine wirtschaftliche Stromversorgung. Aber auf der anderen Seite sprachen doch auch Gründe gegen eine solche Lage. Die Zeiten, in denen man eine Zentrale nebst allem Zubehör in den gemieteten Kellerräumen irgendeines Privathauses unterbringen konnte, waren ja längst vorbei. Das Kraftwerk verlangte vielmehr ein eigenes durchaus nicht kleines Grundstück für sich, das im Mittelpunkte der Stadt natürlich recht teuer war. Auch erschien die Aufstellung großer Dampfmaschinen und Kessel mit den zugehörigen Schornsteinen und der kaum ganz zu vermeidenden Ruß- und Rauchentwicklung in der besten Geschäftsgegend nicht sehr erwünscht. Allmählich tauchte daher der Gedanke auf, die Kraftwerke gerade zum Gegenteil dessen zu machen, was der Name Zentrale besagt, sie nämlich an den Rand ihres Versorgungsgebietes zu verlegen, ja sogar ganz außerhalb desselben zu erbauen. Durchführbar wurde diese neue Entwicklung freilich erst nach grundlegenden technischen Fortschritten.

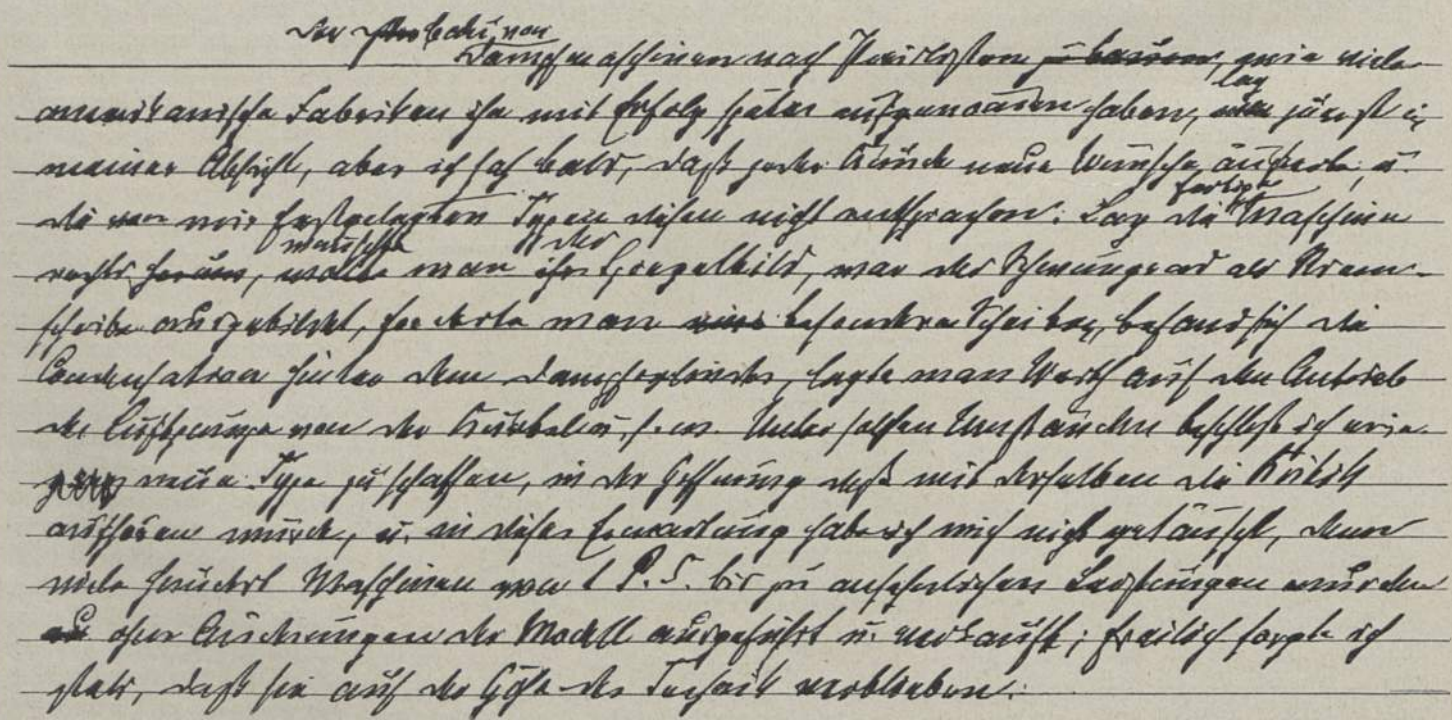


663. Emil Rathenau (1838—1915)
Der Schöpfer des AEG-Konzerns

Die achtziger Jahre hatten mit einem vollkommenen Siege des Gleichstroms über den Wechselstrom geendet. In der Tat bot der Gleichstrom bei dem damaligen Stande der Elektrotechnik auch bedeutende Vorteile. Besonders wertvoll war seine Speicherbarkeit. Man konnte elektrische Energie dieser Form mit gutem Wirkungsgrad und verhältnismäßig geringen Kosten in Akkumulatorenbatterien aufspeichern, was besonders für eine wirtschaftliche Überwindung der Belastungsspitzen von Nutzen war.

Für die elektrische Beleuchtung wäre es auch damals schon gleichgültig gewesen, welche Stromart man genommen hätte. Sowohl Bogen- wie Glühlampen waren in gleichguter Form für Wechselstrom und Gleichstrom vorhanden. Dagegen verfügte man noch nicht über unbedingt brauchbare und zuverlässige Wechselstrommotoren. Unter diesen Umständen zog man den Gleichstrom vor und erzeugte ihn in den Elektrizitätswerken durchgehend mit einer Spannung von 110 Volt. Die Wahl dieser Spannung geschah ebenso zufällig wie etwa die Wahl der Normalspurweite für Eisenbahnen. Weil die erste Grubenbahn, welche sich eine Dampflokomotive zulegte, zufälligerweise eine Spurweite von 5 englischen Fuß besaß, haben heute die Eisenbahnen der ganzen Welt mit Ausnahme der russischen diese Spurweite. Weil die ersten Edisonmaschinen in New York zufälligerweise eine Spannung von 110 Volt gaben, spielen diese Zahl und ihre Vielfachen noch heut in der Elektrotechnik eine maßgebende Rolle.

Immerhin war diese Spannung ganz gut brauchbar. Sie gestattete, zwei Bogenlampen mit je 45 Volt Lichtbogenspannung hintereinander zu brennen, wobei noch 20 Volt für einen Vorschaltwiderstand übrigblieben, gerade genug, um ein ruhiges Brennen der Lampe zu sichern. Die Edisonsche Kohlenfaden-



664. Faksimile aus der autobiographischen Skizze Emil Rathenaus

glühlampe ließ sich für diese Spannung hinreichend betriebssicher herstellen. Auch ihre Wirkungen auf den menschlichen Organismus bei zufälligen Leitungsberührungen waren unter normalen Verhältnissen harmlos, so daß man sie unbedenklich in die Privatwohnungen einführen konnte.

Diesen Vorzügen stand aber doch ein Nachteil entgegen. Das Kraftwerk hat ja die Aufgabe, elektrische Energie zu den Verbrauchsstellen zu leiten. Die elektrische Leistung, gemessen in Watt, ist aber ein Produkt zweier Faktoren, nämlich der Spannung des Stromes, seinen Volt, und der Stromstärke, gemessen in Ampere. Für eine gleichbleibende elektrische Leistung muß naturgemäß der eine dieser Faktoren in dem gleichen Maße größer werden, in welchem der andere kleiner wird. Will man so ein Kilowatt bei einer Spannung von 100 Volt übertragen, so muß man 10 Ampere durch die Leitung schicken. Bei einer Spannung von 200 Volt dagegen genügen 5 Ampere für die gleiche Leistung. Allgemein gilt also das Gesetz, daß ein Kraftwerk bei einer bestimmten Leistung eine um so größere Strommenge durch seine Kabel zu den Verbrauchsstellen befördern muß, je geringer seine Spannung ist.

665. Walter Rathenau (1870—1922)
Aus dem Corpus Imaginum der Photographischen Gesellschaft, Berlin

Nun ist es aber gerade die Stromstärke, welche den Kupferquerschnitt des Kabels und damit sehr wesentlich seinen Preis bedingt. Die alten Kohlenfadenlampen waren gegen Spannungsschwankungen empfindlicher als die heutigen Metallfadenlampen, und man mußte deshalb die Kupferkabel so stark berechnen, daß höchstens ein Spannungsabfall von 2 Volt in ihnen stattfinden konnte. Das Ergebnis dieser Berechnungen war die Tatsache, daß bei einer Betriebsspannung von 110 Volt die wirtschaftliche Grenze bei einer Übertragungsentfernung von 600 Metern erreicht war. Nahm man also die Entfernung von 600 Metern und schlug damit einen Kreis um das Kraftwerk, so hatte man damit das Gebiet, das von diesem noch wirtschaftlich versorgt werden konnte. Eine Kreisfläche von 1,2 Kilometern im Durchmesser reichte aber auch bei kleineren Städten nur selten aus, um das zu versorgende Gebiet vollkommen zu bedecken. Man entschloß sich daher ziemlich bald, die ursprüngliche Spannung zu verdoppeln und auf 220 Volt zu gehen, da die rechnerische Behandlung des Problems zeigte, daß der wirtschaftliche Radius ungefähr im Quadrat der Spannung wächst. Die Verdoppelung der Spannung mußte den Radius demnach von 0,6 auf 2,4 Kilometer bringen, eine Entfernung, die für die meisten Städte ausreichte, solange die Zentrale wirklich im Zentrum lag.

666. Erich Rathenau (1871—1903)

Einer solchen Erhöhung der Spannung stand aber zunächst der Umstand im Wege, daß man noch nicht Kohlenfadenglühlampen für eine Spannung von 220 Volt herstellen konnte. Aus diesem Dilemma half man sich mit einem Kunstgriff durch die von dem Amerikaner Hopkinson angegebene Dreileiterschaltung, die Bild 670 zeigt. Dabei sind in der Zentrale zwei Dynamomaschinen von je 110 Volt Klemmenspannung hintereinandergeschaltet. Von den verbundenen Polen dieser Maschinen geht der Mittelleiter, von den beiden anderen Polen gehen die beiden Außenleiter ab. Dabei herrscht zwischen den beiden Außenleitern eine Spannung von 220 Volt, zwischen jedem Außenleiter und dem Mittelleiter eine solche von 110 Volt. Untersucht man nun den Stromzufluß in solchem Dreileitersystem, so zeigt sich, daß der Mittelleiter viel weniger Strom zu führen braucht als die beiden Außenleiter. Er braucht tatsächlich nur die Stromdifferenz zwischen den Strömen der beiden Außenleiter zu transportieren und kann vollkommen stromlos werden, wenn beide Außenleiter gleichen Strom führen, also die beiden Hälften des Dreileitersystems gleich stark belastet sind. Diesen Zustand sucht man nach Möglichkeit zu erreichen, indem man gleiche Anschlußmengen an die beiden Netzhälften legt. Es zeigte sich dabei, daß man gut auskam, wenn man dem Mittelleiter den halben Querschnitt eines Außenleiters gab. Für die Außenleiter gelten nun aber die für eine Spannung von 220 Volt errechneten Verhältnisse, die eine wirtschaftliche Länge von 2,4 Kilometern ergeben.

Im Jahre 1899 kamen auch Kohlenfadenglühlampen für 220 Volt auf den Markt, und nun ging man wieder einen Schritt weiter, indem man Dreileiteranlagen mit 440 Volt zwischen den Außenleitern, 220 Volt zwischen dem Mittelleiter und jedem Außenleiter schuf. Man führte dabei freilich eine Spannung von 220 Volt in die einzelne Wohnung ein, aber die Praxis hat gezeigt, daß es unbedenklich geschehen konnte. Auf der andern Seite wurden Wirtschaftlichkeit und Reichweite des elektrischen Kraftwerkes durch den Übergang zu dieser Spannung nochmals bedeutend erhöht. Insbesondere wurde es möglich, das gesamte Gebiet des alten Berlin, das doch immerhin aus einer Fläche von rund 100 Quadratkilometern besteht, mit dieser Spannung zu versorgen, ohne allzu gewaltige Kupfermengen in Form von Kabeln in den Straßenboden vergraben zu müssen. Aber damit war man auch mit dem Gleichstrom an der Grenze der Leistungsfähigkeit angekommen.

Wollte man wesentlich größere Gebiete von einer Stelle aus mit Energie versorgen, so mußte man das System verlassen und vom Gleichstrom zum Wechselstrom übergehen. Die Gründe dafür lagen in der bequemen Transformierbarkeit des Wechselstromes. Das eine stand ja fest, mit mehr als 220 Volt durfte man in die einzelne Wohnung nicht hineingehen, da sonst ernstliche Gefährdungen der Bewohner durch gelegentliche elektrische Schläge zu erwarten waren. Für eine wirtschaftliche Fortleitung der zu transportierenden elektrischen Energiemengen brauchte man aber Spannungen, die ganz wesentlich über den bisher benutzten Gleichstromspannungen lagen, und in die Tausende, ja in die Zehntausende von Volt gehen mußten. Dafür war nur der Wechselstrom geeignet, der sich durch verhältnismäßig recht einfache Apparate, die Transformatoren, mit geringfügigen Verlusten in der Weise umformen läßt, daß zwar die Energiemenge, also das Produkt aus Spannung und Stromstärke gleich bleibt, die beiden Faktoren selbst aber sich in weitesten Grenzen ändern können.

Das Prinzip des Wechselstromtransformators wird schematisch durch Bild 672 dargestellt. Auf einem ringförmig geschlossenen Eisenkern, der zur Vermeidung von Wirbelströmen ebenso wie das aktive Eisen der Dynamomaschinen aus feinen, voneinander isolierten Eisenblechen aufgebaut ist, befinden sich zwei voneinander isolierte Kupferwicklungen $W_1$ und $W_2$. Der Wicklung $W_1$, der primären Wicklung, wird von außen her elektrische Energie in Form eines Wechselstromes zugeführt. Es ist klar, daß dieser Strom auf den Eisenkern magnetisierend wirken und in ihm einen starken Kraftlinienfluß erzeugen muß. Das würde natürlich auch ein Gleichstrom tun. Nun aber zeigt sich ein grundsätzlicher Unterschied zwischen Gleichstrom und Wechselstrom. Ein Gleichstrom würde den Eisenkern einmal magnetisieren, also einen gewissen Energiebetrag für den Aufbau des magnetischen Feldes hergeben. Danach aber würde er die Primärwicklung einfach nach dem Ohmschen Gesetz durchfließen, demzufolge ja die Stromstärke gleich der elektromotorischen Kraft dividiert durch den Widerstand ist. Da der Widerstand der Wicklung nur sehr gering ist, häufig nur Bruchteile eines Ohms (Vgl. S. 472) beträgt, so würde eine Beschickung derselben mit Gleichstrom wahrscheinlich einem regulären Kurzschluß gleichkommen, es würde eine Stromstärke entstehen, welche die Windungen verbrennt.

Ganz anders ist das Verhalten dagegen bei der Beschickung mit Wechselstrom, mit einer Stromart also, welche ihre Richtung etwa hundertmal in der Sekunde wechselt. Auch der Wechselstrom wirkt magnetisierend, aber entsprechend seiner eigenen Form erzeugt er auch ein magnetisches Wechselfeld. Unter seiner Wirkung entsteht ein Kraftlinienfluß, der beispielsweise zu einem Zeitpunkt im Sinne des Uhrzeigers in dem Eisenring verlaufen mag, der eine zweihundertstel Sekunde später schon wieder verschwunden ist und nach der nächsten zweihundertstel Sekunde im entgegengesetzten Sinne des Uhrzeigers durch das Eisen verläuft. Der Wechselstrom baut sich also ein magnetisches Feld, reißt es wieder ein, baut es von neuem in entgegengesetzter Richtung usw. Dabei aber verhält sich dies magnetische Feld wie ein mit Masse und Trägheit behafteter Gegenstand.

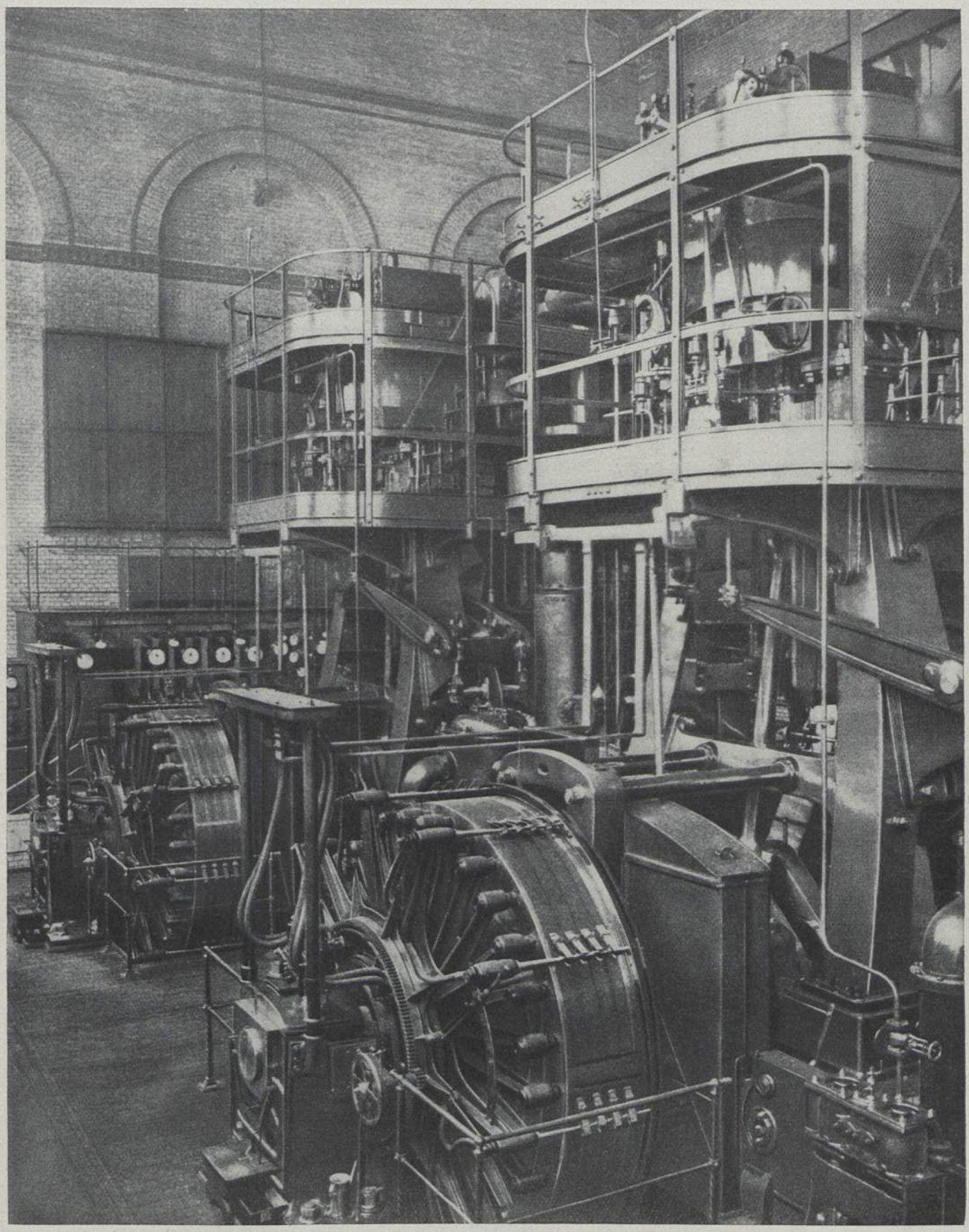
Man macht sich die Verhältnisse am besten durch einen mechanischen Vergleich klar, indem man sich etwa vorstellt, daß ein schweres Schwungrad durch einen Kurbeltrieb bewegt werden soll. Einer Beschickung der Spule mit Gleichstrom entspricht eine gleichbleibende Drehung des Schwungrades in derselben Richtung. Ist das Schwungrad hier einmal in Bewegung gesetzt, so läßt es sich mit geringfügigem Energieaufwand weiterdrehen. Der Beschickung der Spule mit Wechselstrom würde es dagegen entsprechen, wenn man das Schwungrad in einer fortwährend und ziemlich schnell wechselnden Richtung hin und her schwingen wollte. Es leuchtet sofort ein, daß die Trägheit des Rades einer solchen Bewegung großen Widerstand entgegensetzt. Genau ebenso verhält sich aber das unter der Wirkung des Wechselstroms gebildete Magnetfeld. Unter seiner Wirkung tritt in der mit Wechselstrom beschickten Primärspule eine elektromotorische Gegenkraft auf, welche rein äußerlich wie ein Ohmscher Widerstand wirkt und bei richtiger Bemessung des Eisenkörpers und der Windungszahl den Strom auch bei sehr großer Spannung in mäßigen Grenzen hält. Eine solche auf einem unterteilten Eisenkörper steckende Kupferdrahtspule drosselt also den Wechselstrom gewissermaßen ab und wird daher Drosselspule genannt. Drosselspulen werden in Wechselstromanlagen sehr häufig an Stelle der in Gleichstromanlagen üblichen Ohmschen Widerstände benutzt.

667. Felix Deutsch

668. Dr. Paul Mamroth

Die beiden ältesten Mitarbeiter Emil Rathenaus und gegenwärtigen Leiter des AEG-Konzerns

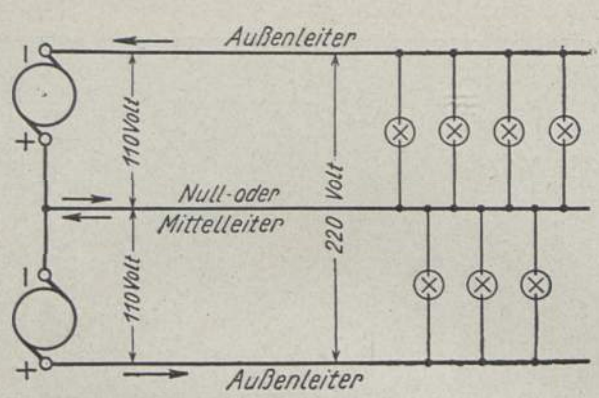
Es ist nun das energetische Verhalten der Drosselspule zu untersuchen. Vom Gleichstrom wissen wir ja, daß seine Arbeitsleistung gleich dem Produkt seiner Spannung und Stromstärke ist. Auch der Wechselstrom besitzt eine bestimmte mittlere Spannung und Stromstärke, deren Produkt im allgemeinen gleich seiner Arbeitsleistung ist. Wenn er aber durch eine Drosselspule geschickt wird, so tritt etwas Eigentümliches ein, zu dessen Erklärung wir wiederum den Vergleich mit dem Schwungrad heranziehen müssen. Die mechanische Arbeit ist ja gleich der ausgeübten Kraft oder dem geleisteten Druck multipliziert mit der Wegstrecke, über die er wirkt. Setzt man nun ein schweres Schwungrad in Bewegung, so wird man zuerst ganz gewaltig auf die Kurbel drücken müssen, aber der Weg, den die Kurbel unter dem Einfluß dieses Druckes zurücklegt, wird nur gering sein. Ist andererseits die Kurbel in Bewegung geraten, so genügt ein geringer Druck, unter dessen Wirkung sie sich mit größerer Geschwindigkeit über eine größere Wegstrecke bewegen wird. Wir haben beim Schwungrad also in diesem Falle große Kraft und kleinen Weg oder kleine Kraft und großen Weg, niemals aber zur gleichen Zeit große Kraft und



669. Die Zentrale Schiffbauerdamm zu Anfang der neunziger Jahre
Stehende tausendpferdige Dampfmaschinen (Hammermaschinen), jede Dampfmaschine direkt gekuppelt mit je zwei fünfhundertpferdigen Siemens-Innenpolmaschinen

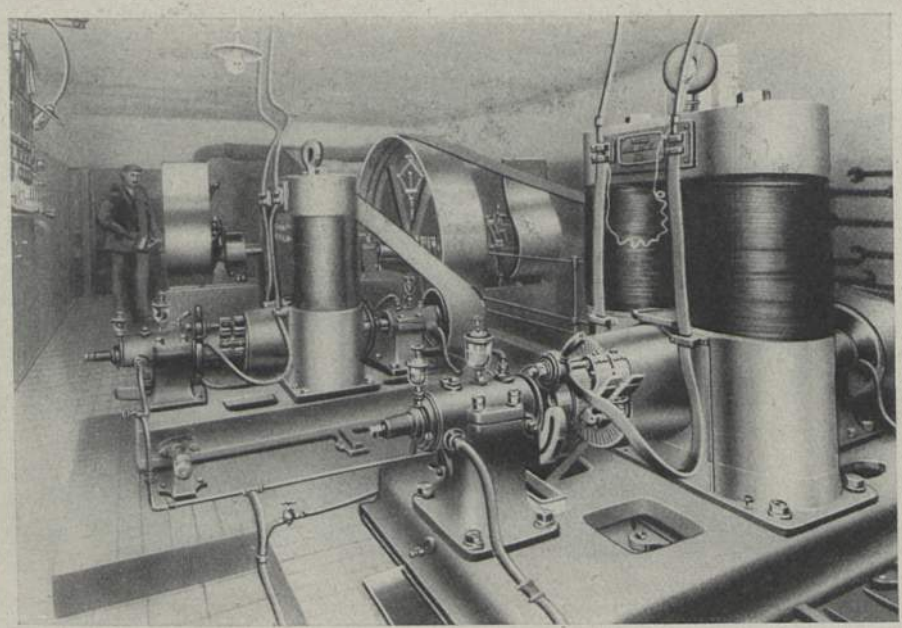
großen Weg bzw. kleine Kraft und kleinen Weg.

Etwas ganz Ähnliches geschieht mit dem auf der Drosselspule wirkenden Wechselstrom. Wir können uns den Verlauf von Wechselströmen und von Wechselspannungen, das heißt von den elektromotorischen Kräften der Wechselströme zeichnerisch in Form von Sinuskurven darstellen (Bild 674), wobei dann die wagerechte Linie die verfließende Zeit angibt und die jeweilige senkrechte Entfernung der Kurve von dieser wagerechten Grundlinie die zu dem betreffenden Zeitpunkt herrschende Stromstärke oder Spannung. Solange wir den Wechselstrom auf einen einfachen Ohmschen Widerstand, beispielsweise auf eine Kohlenfadenlampe schalten, werden die beiden Kurven für die Spannung und Stromstärke zusammenfallen, dem jeweiligen Höchstwert der Spannung wird auch ein Höchstwert der Stromstärke entsprechen. Schalten wir ihn aber an eine Drosselspule, so ergibt sich die gleiche Erscheinung, die wir an dem Schwungrade beobachteten, wobei der Druck der elektromotorischen Kraft, die jeweilige Radgeschwindigkeit der Stromstärke entspricht. Es tritt dann eine zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke, die soviel genannte und in allen Wechselstromproblemen eine so große Rolle spielende Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung auf. Dabei ist die Spannung oder elektromotorische Kraft das Ursprüngliche, von der Wechselstromleitung Gelieferte, ebenso wie der Druck, den ein Mensch auf die Schwungradkurbel ausübt. Die Stromstärke ist erst das Zweite, das von der elektromotorischen Kraft in dem Stromkreise Erzeugte, und diese Stromstärke eilt nun der elektromotorischen Kraft nach, sie tritt um eine bestimmte Winkelgröße, die man in der Wechselstromtechnik mit dem griechischen Buchstaben $\varphi$ bezeichnet, später auf als die Spannung. Die wirkliche Energieleistung eines mit einer solchen Phasenverschiebung behafteten Wechselstromes ist kleiner als das Produkt seiner mittleren Stromstärke und Spannung. Man muß es noch mit einer trigonometrischen Funktion des Winkels $\varphi$, dem Kosinus $\varphi$, multiplizieren. Der Kosinus $\varphi$ ist für 0 Grad gleich 1, für 90 Grad gleich 0. Bei einer Phasenverschiebung von 90 Grad zwischen Strom und Spannung würde also die wirkliche oder effektive Leistung auch bei den größten Spannungen und Stromstärken gleich 0 sein. Dieser Fall ist nur theoretisch möglich, da jeder fließende Strom ja eine gewisse Stromwärme in den Leitungen entwickelt, also eine gewisse Arbeit leistet, die eine Phasenverschiebung von 90 Grad unmöglich macht. In der Praxis bewegt sich der Kosinus $\varphi$ gewöhnlich zwischen Werten von 0,8—0,5. Bei den Direktoren der Wechselstromwerke ist er nicht sonderlich beliebt, da er unnütze und recht bedeutende Ausgaben für Kupfer verursacht. Es hat sich daher sogar ein besonderer Verein gebildet, der den schönen Namen Kosinus-$\varphi$-Verein trägt und den Zweck verfolgt, die Phasenverschiebungen in den Wechselstromnetzen möglichst gering zu halten.




670. Schaltungsschema eines Dreileiter-Gleichstromsystems

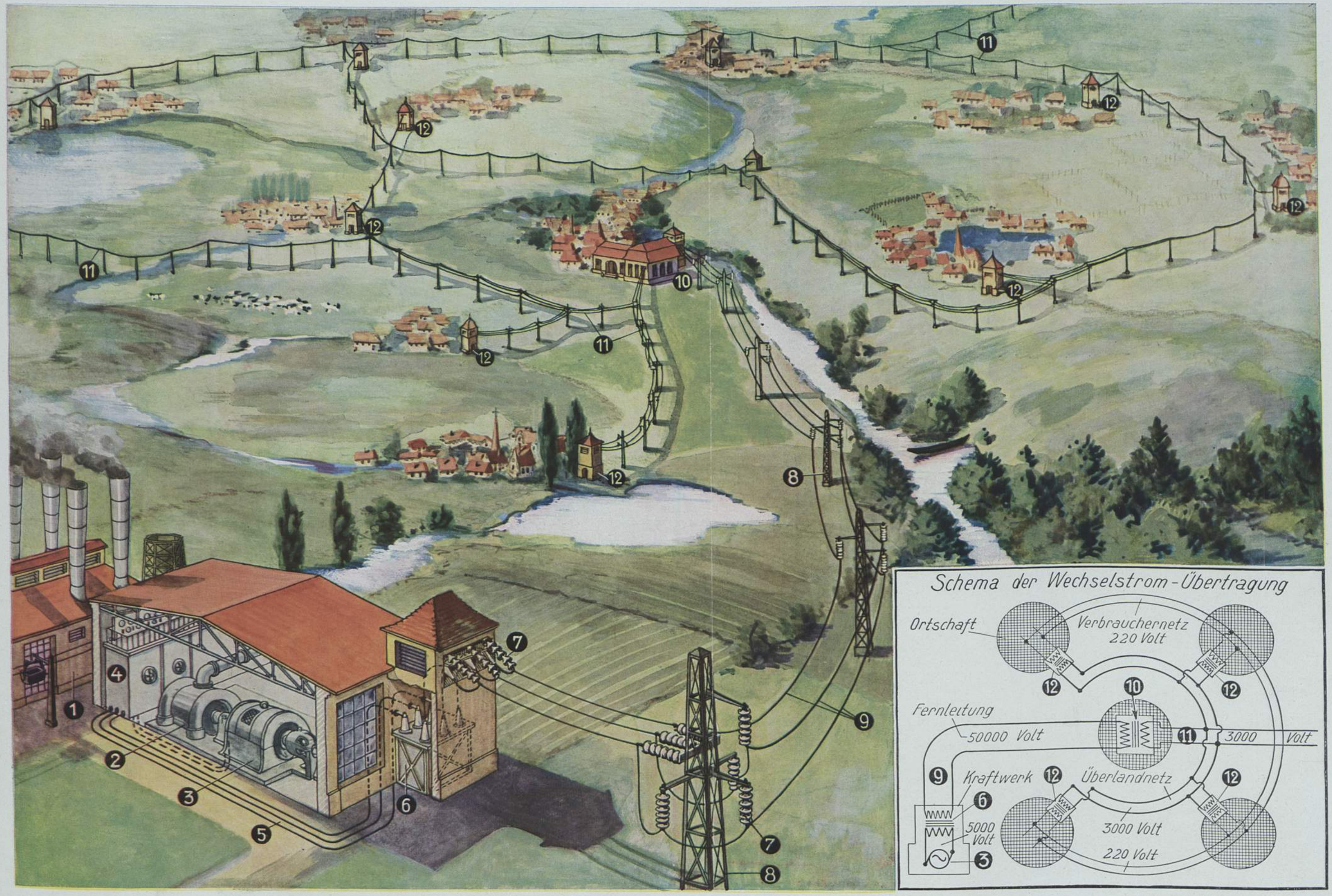
Kehren wir nach diesen Betrachtungen zu dem in Bild 672 gegebenen Schema eines Wechselstromtransformators zurück. Der von der Primärspule $W_1$ verursachte magnetische Wechselfluß durchsetzt ja nicht nur diese Spule, sondern auch die zweite, die Sekundärspule $W_2$. Nach den Gesetzen der elektromagnetischen Induktion wird er in jeder Windung der zweiten Spule die gleiche elektromotorische Kraft hervorrufen, die in jeder Windung der Primärspule wirksam ist. Diese zweite Spule wird also unmittelbar als eine neue Stromquelle benutzt werden können, wenn man irgendwelche stromverbrauchenden Apparate an ihre Enden anschließt. Dabei gilt nach dem eben Gesagten die Regel, daß die Spannung der beiden Spulen proportional der Zahl ihrer Windungen sein muß. Je nachdem man das Verhältnis der beiden Windungszahlen wählt, gestaltet sich auch das Übersetzungsverhältnis des Transformators. Gibt man der Sekundärwicklung die zehnfache Windungszahl der primären, so wird der Apparat nach oben transformieren, er wird das Zehnfache der ihm zugeführten Spannung liefern, aber natürlich auch nur den zehnten Teil der zugeführten Stromstärke, denn das Gesetz von der Erhaltung der Energie muß ja gewahrt werden.



671. Blick in eine der ersten Theaterzentralen

Die Dynamomaschinen (Edisonmaschinen) sind ausgesprochene Schnelläufer und werden von Gasmotoren mittels Riemen angetrieben. Die ganze Zentrale ist in einem Keller untergebracht

Solange die sekundäre Wicklung des Transformators nicht geschlossen ist, wirkt seine primäre Wicklung wie eine einfache Drosselspule, sie läßt nur einen bestimmten minimalen Strom, den sogenannten Leerlaufstrom, hindurch. Sobald aber die Sekundärwindung geschlossen wird und ihrerseits Energie nach außen abgibt, wirkt der in ihr fließende Strom der Drosselwirkung entgegen, und es fließt außer dem Leerlaufstrom in der Primärwicklung noch ein Zusatzstrom, während

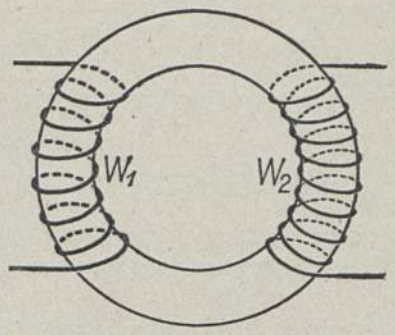



**Wechselstromübertragung vom Kraftwerk über Umspannwerke zu den örtlichen Verbrauchernetzen**

1. Kesselhaus. 2. Dampfturbine. 3. Generator, Wechselstrommaschine 5000 Volt (Drehstrom). 4. Schalthaus. 5. Transformatorleitung. 6. Stationstransformator 5000/50 000 Volt. 7. Abspannungs-Isolator. 8. Abspannmast. 9. Fernleitung 50 000 Volt. 10. Umspannwerk 50 000/3000 Volt. 11. Überlandnetz 3000 Volt. 12. Transformatorhaus 3000/220 Volt

gleichzeitig die Phasenverschiebung kleiner wird. Bei einem sonst richtig bemessenen Transformator regeln sich also alle Verhältnisse ganz automatisch von selbst. Er wirkt wie eine Stromquelle von bestimmter Spannung, die jeder Stromentnahme von 0 bis zu einem gegebenen Höchstwert willig entspricht.

Bild 673 veranschaulicht in Kurvendarstellung die Verhältnisse in der Primärwicklung eines Transformators. Bild 673 (links) zeigt die Vorgänge, wenn die Sekundärspule offen ist, die Primärspule also ausschließlich als Drossel wirkt. Die mit E bezeichnete Kurve stellt die elektrische vom Netz her der Spule aufgedrückte Spannung dar. Die mit $J_b$ bezeichnete Kurve entspricht der unter dem Einfluß der Spannung E durch die Windungen der Spule fließenden Stromstärke, dem sogenannten Blindstrom. Man sieht, daß diese zweite Kurve um genau 90 Grad gegen die Spannungskurve versetzt ist. Während die letztere an der linken Kante der Zeichnung bereits ihren Höchstwert besitzt, beginnt die Stromkurve dort erst mit dem Nullwert. Während 90 Grad später die Stromkurve ihren Höchstwert erreicht, ist die Spannungskurve bereits bis auf Null gefallen. Das Produkt der zusammengehörigen Spannungen und Stromstärke $P_1$ gleich E mal $J_b$ ergibt die Leistung des Stromes. Die Leistungskurve $P_1$ ist in Bild 673 (links) schraffiert, und nun ergibt sich folgendes. Die Leistungskurve pendelt doppelt so schnell wie die Strom- und Spannungskurven und liegt bald oberhalb, bald unterhalb der Zeitkurve. Das letztere bedeutet aber, daß die Leistung vorübergehend negativ wird, das heißt, daß zu diesen Zeiten die Spule keine elektrische Leistung aus dem Netze aufnimmt, sondern im Gegenteil unter dem Einflusse des in ihr wieder zerfallenden und dabei Energie abgebenden magnetischen Feldes Φ elektrische Leistung in das Netz zurückliefert. Bei der in Bild 673 (links) angenommenen Phasenverschiebung von 90 Grad ist die aufgenommene genau gleich der abgegebenen Leistung, das heißt, die Spule entzieht dem Netz überhaupt keine wirkliche Leistung, obwohl sie dauernd von starken Spannungen beansprucht und von starken Strömen durchflossen wird. — Ganz anders als diese Blindleistung stellt sich die Wirkleistung



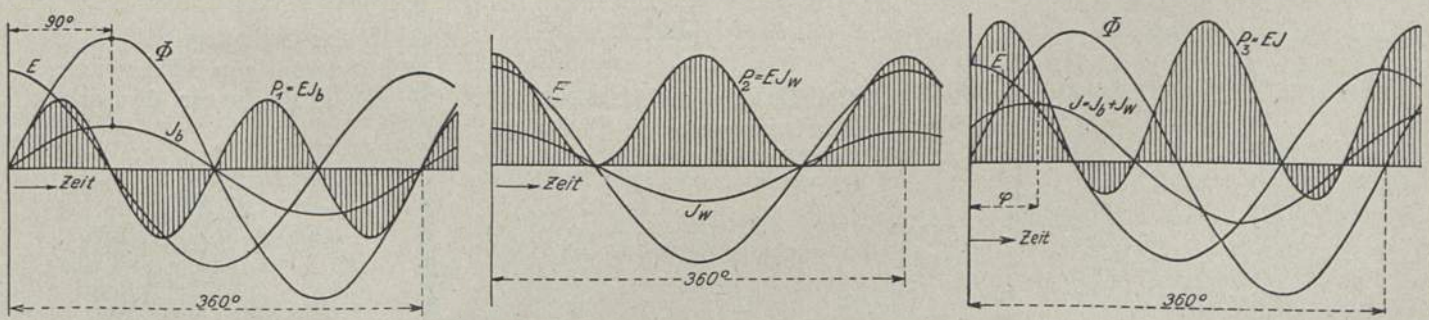

672. Prinzip des Transformators
Auf einem gemeinschaftlichen Eisenring befinden sich zwei Wicklungen W 1 und W 2, die durch den magnetischen Kraftfluß im Eisen miteinander verkettet sind

dar, die nun auftritt, wenn die Sekundärspule nach außen hin ihrerseits Leistung abgibt. Hier sind Spannung E und Wirkstrom $J_w$ in Phasengleichheit, ihre Höchst- und Mindestwerte fallen zeitlich zusammen. Infolgedessen liegt die schraffierte Leistungskurve (Bild 673, Mitte) dauernd oberhalb der Zeitachse, die Wirkleistung $P_2$ ist eine positiv vom Netz an die Spule abgegebene Leistung.

Tatsächlich finden die beiden Vorgänge der Blindleistung und der Wirkleistung in jedem mehr oder weniger belasteten Transformator nebeneinander statt, und die in Bild 673 (links u. Mitte) getrennt dargestellten Erscheinungen addieren sich in der in Bild 673 (rechts) gezeigten Weise. Es ergibt sich zwischen Stromstärke und Spannung eine Phasenverschiebung, die geringer als 90 Grad ist, und die Leistung $P_3$ pendelt nur in geringerem Maße in das Netz zurück. Diese Summierung der Blindleistung und der Wirkleistung bezeichnet man als Scheinleistung. Sie spielt nicht nur bei den Transformatoren, sondern auch bei allen übrigen Wechselstrommaschinen und Apparaten eine bedeutsame Rolle.

In dem Wechselstromtransformator hatte man nun ein gutes Mittel, die von den Maschinen des Kraftwerkes gelieferte Wechselstromenergie auf einen beliebigen Wert hinauf zu transformieren. Die derartig gewonnene hochgespannte Energie konnte dann in dünnen Leitungen über große Entfernungen fortgeleitet werden und am Verbrauchsort wieder auf eine solche Spannung hinunter transformiert werden, daß man sie den Verbrauchern unbedenklich zuführen konnte. Nach diesem Schema (Tafel XXII) arbeiten auch heut noch die sämtlichen großen Wechselstromwerke. Um dies Ziel aber wirklich zu erreichen, war zweierlei notwendig. Man mußte die bei dieser Anordnung vorkommenden hohen Spannungen wirklich betriebszuverlässig beherrschen, und man mußte auch für den Wechselstrom einen brauchbaren Motor schaffen, denn von Jahr zu Jahr hatte ja die Verwendung der Elektrizität für motorische Zwecke neben der elektrischen Beleuchtung immer größere Bedeutung gewonnen.

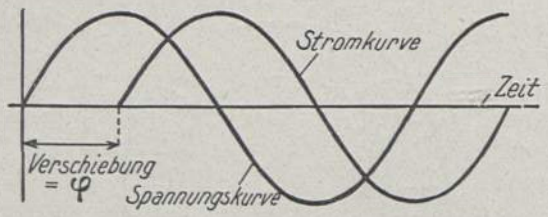
Das Mittel, mit dem diese Aufgabe gelöst wurde, war der Drehstrom. Zu seiner Erklärung müssen wir wieder auf




673. Die elektrischen und magnetischen Verhältnisse in der Primärwicklung eines Transformators: Blind-, Wirk- und Scheinleistung

Links: Die Kurve E stellt die der Primärwirkung zugeführte elektrische Spannung dar. Unter dem Einfluß dieser Spannung fließt in der Primärwicklung ein Strom $J_b$, welcher der Spannung E um 90 Grad nacheilt und im Eisenkörper des Transformators einen magnetischen Wechselfluß Φ erzeugt. Das Produkt aus der Spannung E und der Stromstärke $J_b$ (in der Zeichnung schraffiert) gibt die Leistung. Man sieht, daß diese Blindleistung $P_1$ die doppelte Periodenzahl der zugeführten Wechselspannung besitzt und abwechselnd positiv und negativ ist. Das bedeutet, daß dem Transformator in der ersten Viertelperiode vom Netz Energie zugeführt wird, und daß er die gleiche Leistung in der zweiten Viertelperiode wieder in das Netz zurückgibt. — Mitte: Für jenen Teil der elektrischen Energie, die dem Transformator auf der Sekundärseite für Verbrauchszwecke entnommen wird, sind auf der Primärseite die aufgedrückte Spannung E und der unter dem Einfluß dieser Spannung fließende Wirkstrom $J_w$ in gleicher Phase. Das Produkt dieser beiden Größen, die Wirkleistung $P_2$ (in der Zeichnung durch die schraffierte Kurve dargestellt), hat die gleiche Periodenzahl und ist dauernd positiv. Der Transformator entnimmt diese Leistung stetig aus dem Netz. — Rechts: Die Scheinleistung eines Transformators setzt sich aus seiner Blindleistung $P_1$ und aus seiner Wirkleistung $P_2$ zusammen. Die schraffierte Kurve $P_3$ gibt die Scheinleistung, die in der Hauptsache positiv ist. Nur die kleinen, nach unten gerichteten Kurventeile bedeuten Energie, die aus dem Transformator in das Netz zurückflutet

den im vorstehenden besprochenen Begriff der Phasenverschiebung zurückgehen. Dabei handelt es sich aber diesmal nicht um eine Verschiebung zwischen Stromstärke und Spannung eines einzelnen Stromes, sondern es handelt sich um mehrere zunächst voneinander völlig unabhängige Wechselströme, die zwar dieselbe Wechselzahl per Sekunde haben, deren Stromphasen aber zeitlich gegeneinander verschoben sind. Betrachten wir zwei verschiedene Wechselströme, deren Phasen um 90 Grad differieren, wie Bild 675 das in Kurvenform zeigt, und nehmen wir nun ein vierpoliges Maschinengestell (Bild 676), um dessen Pole A und B wir den Strom I, um dessen Pole C und D wir den Strom II schicken. Zu einem bestimmten Zeitpunkt (in den Bildern durch $t_0$ gekennzeichnet) mag der Strom I seinen Höchstwert haben und in A einen Nordpol, in B einen Südpol erzeugen. Zur selben Zeit ist der Strom II gleich Null, C und D haben überhaupt keinen Magnetismus. In dem Raum zwischen den vier Polen herrscht ein von Süden unten nach Norden oben gerichtetes Magnetfeld. Im weiteren Zeitverlauf wird der Strom I und dementsprechend auch der Magnetismus in A und B schwächer. Dafür wächst aber der Strom II und erzeugt im Pole D einen Nordpol, in C einen Südpol. Zu dem in Bild 675 durch $t_1$ gekennzeichneten Zeitpunkt sind beide Ströme und dementsprechend auch die von ihnen erzeugten Pole gleich stark.

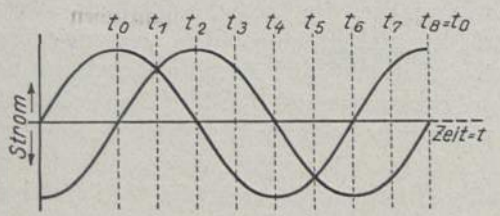



674. Phasenverschiebung zwischen der Spannung und der Stromstärke eines sinusförmigen Wechselstroms

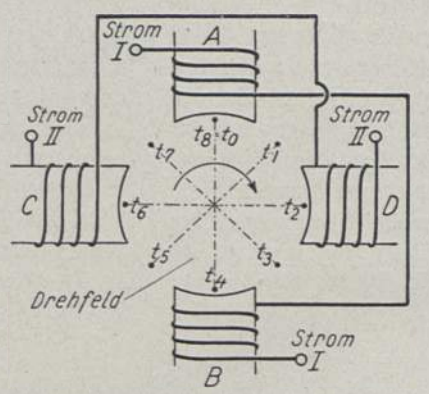
Auf der wagerechten Linie sind die Zeitwerte, senkrecht dazu die jeweiligen Spannungs- und Stromwerte aufgetragen. Der Strom eilt der Spannung in der hier gegebenen Darstellung um eine viertel Periode gleich 90 Grad nach

A und D sind gleich starke Nordpole, C und B entsprechende Südpole. Das magnetische Feld hat sich in dieser Zeit im Sinne des Uhrzeigers um 45 Grad gedreht, es ist jetzt von Süden links unten nach Norden rechts oben gerichtet. Zur Zeit $t_2$ ist Strom I gleich Null. D ist ein Nordpol, C ein Südpol. Das magnetische Feld hat sich wiederum um 45 Grad gedreht. Es verläuft jetzt wagerecht vom Südpol links zum Nordpol rechts. In dieser Weise geht die Erscheinung weiter. Die Betrachtung zeigt, daß zwei in der Phase verschiedene Wechselströme bei geeigneter Anordnung auch in einem feststehenden Spulensystem ein sich gleichmäßig drehendes magnetisches Feld, ein sogenanntes Drehfeld, zu erzeugen vermögen. Es leuchtet auch wohl ein, daß sich die gleiche Wirkung erzielen läßt, wenn man an Stelle der in Bild 676 gezeigten die in Bild 677 dargestellte Anordnung wählt, bei der sich einfach zwei Spulen kreuzen, die von zwei um 90 Grad versetzten Wechselströmen durchflossen werden.

Es waren insbesondere der Italiener Ferraris und der Amerikaner Tesla, die sich zuerst eingehend mit mehrphasigen Wechselströmen, den von diesen erzeugten Drehfeldern und den dadurch möglichen motorischen Wirkungen beschäftigten. Würde man etwa einen gewöhnlichen stählernen Stabmagneten drehbar in ein solches magnetisches Drehfeld hineinbringen, so würde

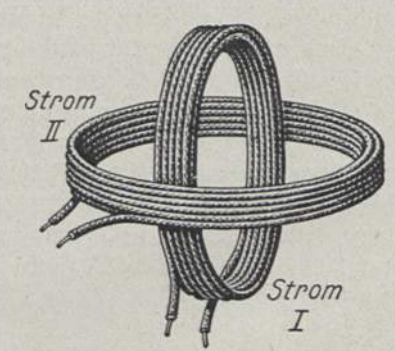



675. Zwei voneinander unabhängige, in ihren Stromkurven um 90 Grad verschobene Wechselströme (Mehrphasenstrom)

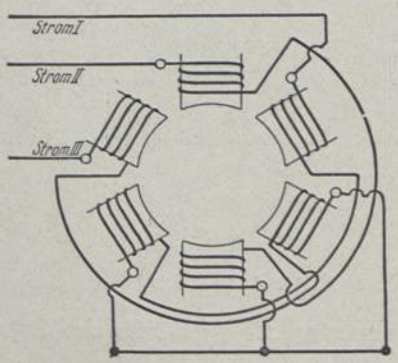



676. Die Erzeugung eines vierpoligen elektromagnetischen Drehfeldes

unter Benutzung zweier um 90 Grad gegeneinander verschobener Wechselströme

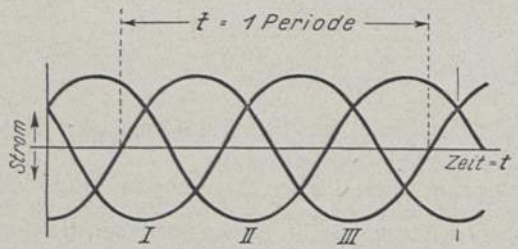



677. Die Erzeugung des gleichen Drehfeldes wie in Bild 676 unter Benutzung zweier Spulen

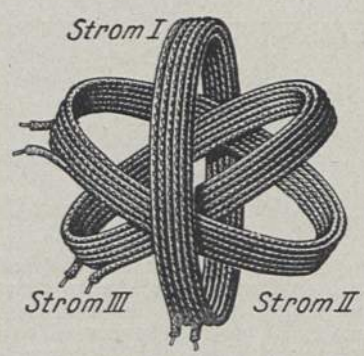



678. Die Erzeugung eines sechspoligen elektromagnetischen Drehfeldes

unter Benutzung dreier um je 120 Grad gegeneinander verschobener Wechselströme. Die Ströme sind miteinander verkettet. Die drei Rückleitungen werden gespart. Jede Zuleitung ist gleichzeitig Rückleitung für die beiden anderen Ströme

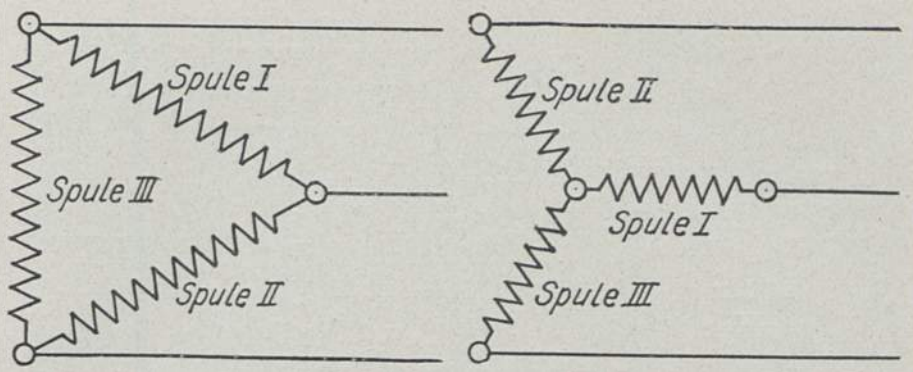



679. Drei in ihren Phasen um je 120 Grad gegeneinander verschobene Wechselströme. Dreiphasiger Wechselstrom (Drehstrom)



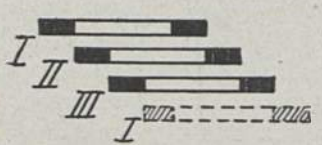

680. Die Erzeugung des gleichen Drehfeldes wie in Bild 678 unter Benutzung dreier Spulen

er selbstverständlich der Drehung des Feldes ständig folgen, nachdem sich seine Längsachse einmal in die Richtung des Feldes eingestellt hat. In der Tat begann Tesla seine ersten Versuche auch mit einer solchen Anordnung, kam aber sehr schnell zu etwas Besserem.




681. Geschlossene oder Dreieckschaltung (links) und offene oder Sternschaltung (rechts) für Drehstromapparate

Bei der Benutzung zweier um 90 Grad versetzter Wechselströme braucht man ja zwei Hinleitungen und zwei Rückleitungen, insgesamt also vier Leitungen, was doch eine recht bedenkliche Komplikation und wirtschaftliche Belastung bedeutet. Günstiger werden die Verhältnisse, wenn man drei in ihrer Phase um je 120 Grad versetzte Wechselströme benutzt. Bild 679 zeigt drei derartige Ströme in der schon früher benutzten Kurvendarstellung. Bild 678 und 680 als Gegenstück zu den Bildern 676 und 677 zeigen, wie man hier für die drei Phasen drei um je 120 Grad gegeneinander versetzte Spulen anordnen muß, um in ihrem Inneren ein Drehfeld zu erhalten. Die Verwendung von drei Strömen scheint zunächst gegenüber derjenigen von nur zwei Strömen eine weitere Verschlechterung zu bedeuten, da man ja nun drei Hinleitungen und drei Rückleitungen, insgesamt also sogar sechs Leitungen haben müßte.

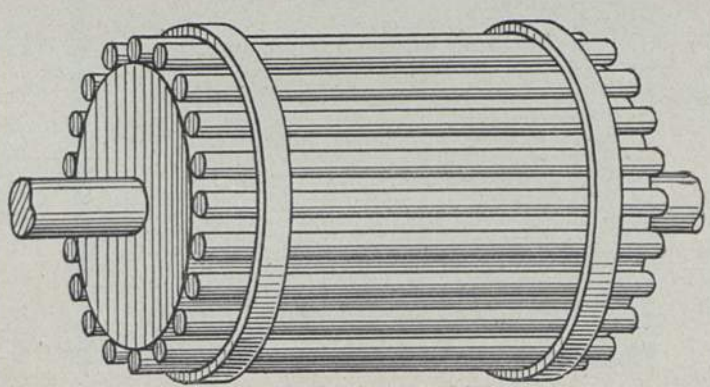



682. Schema der Spulenanlagen der Statorfeldwicklung

Aber diese Annahme stimmt nicht ganz. Prüft man mit einem Maßstab einmal die in Bild 679 gegebene Kurvendarstellung eines solchen Dreiphasensystems, und berücksichtigt man dabei, daß die Senkrechten von der Mittellinie nach oben Ströme in der einen, diejenigen von der Mittellinie nach unten Ströme in der anderen Richtung bedeuten, und daß entgegengerichtete Ströme gleicher Größe sich aufheben, so wird man finden, daß die Summe aller drei Ströme in jedem Augenblick gleich Null ist. Betrachtet man also zunächst einmal die drei Hinleitungen allein für sich, so zeigt sich, daß in jedem Moment zwei derselben zusammen dieselbe Stromstärke wie die dritte führen, aber in umgekehrter Richtung. Unter diesen Umständen kann man sich nun erfreulicherweise die drei Rückleitungen schenken, sofern man die drei Spulen am Verbrauchsort zweckmäßig verbindet. Jede einzelne der drei Hinleitungen funktioniert dann gleichzeitig als Rückleitung für die beiden anderen Hinleitungen.

Die Schaltung kann dabei auf zweierlei Weise erfolgen. Man kann drei Spulen in Form eines Dreiecks schalten, wie Bild 681 (links) es veranschaulicht, und erhält dadurch die geschlossene oder Dreieckschaltung. Man kann sie aber auch in Form eines Sternes schalten, indem man je ein Ende der drei Spulen zu einem gemeinsamen Punkte führt und dort verbindet und von den drei anderen Enden der Spulen die Leitungen abzweigt. Diese Anordnung ergibt die offene oder Sternschaltung. Ein Vergleich der beiden Schaltungen in Bild 681 zeigt einen charakteristischen Unterschied. Bei der ersteren Schaltung liegt nur eine Spule zwischen zwei Leitungen, bei der anderen liegen zwei dazwischen.

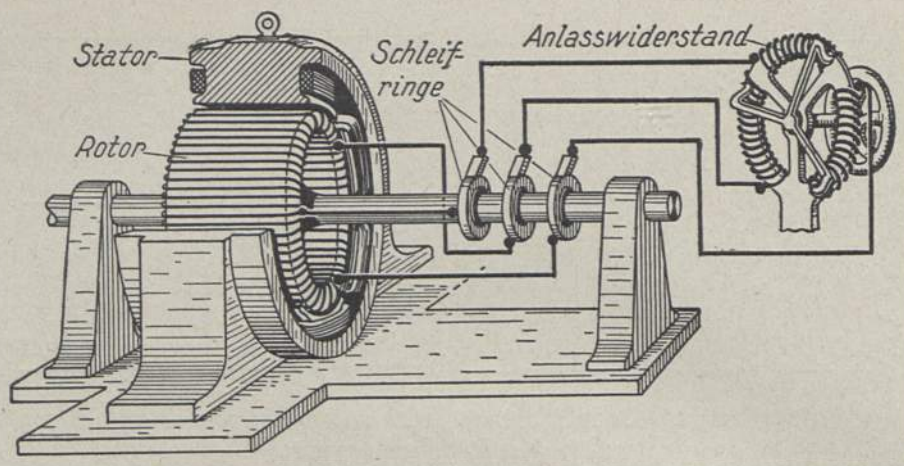
Nehmen wir nun ein Drehfeld etwa von der Art, wie Bild 678 es darstellt, und untersuchen weiter, wie man mit dessen Hilfe zu einem brauchbaren Elektromotor kommen könnte. Daß sich ein drehbarer Stahlmagnet in solchem Felde dreht, wurde bereits gesagt. Aber der Versuch zeigte weiter, daß auch ein gewöhnlicher Weicheisenkörper die gleiche Drehung ausführte. Die Erklärung dafür liegt nahe, wenn man daran denkt, daß gewöhnliches Weicheisen ja auch von einem Stahlmagneten angezogen wird. Nähert man etwa ein Stück an sich unmagnetischen Eisens dem Nordpol eines Stahlmagneten, so wird dadurch an der diesem Pole zugewandten Stelle des Eisens ein Südpol induziert und dieser wird von dem Nordpol des Stahlmagneten angezogen. Etwas Ähnliches könnte man zunächst auch von dem in das Drehfeld gebrachten Eisenkörper vermuten. Aber die Weiterführung des Versuches zeigt, daß hier noch etwas anderes geschieht. Überlassen wir den möglichst reibungsfrei gelagerten Eisenkörper sich selber, so folgt er fast genau der Drehung des rotierenden magnetischen Feldes und bleibt dabei kühl. Bremsen wir ihn aber so stark ab, daß er beträchtlich hinter der Bewegung des Drehfeldes zurückbleiben muß, so wird er recht heiß, ein Beweis dafür, daß hier beträchtliche Wirbelströme auftreten. Eine kurze Überlegung zeigt, daß das aber auch so sein muß. Das durch unsere drei Wechselstromspulen hervorgerufene magnetische Drehfeld können wir ja, ohne daß sich etwas Wesentliches ändert, durch kräftige Gleichstromelektromagnete ersetzen, die mit der Geschwindigkeit des Drehfeldes im Kreise laufen. Weiter bleibt es sich egal, ob wir diesen Magnetkranz drehen und den dazwischen befindlichen Eisenkörper, den Anker, festhalten, oder ob wir den Magnetkranz stillsetzen und den Anker drehen. Es kommt ja lediglich auf die Relativbewegung zwischen den beiden Systemen an. Tun wir nun aber dies letztere, so haben wir genau die gleichen Verhältnisse wie bei der alten Gleichstrommaschine. Wollen wir eine schädliche Erhitzung unseres Eisenkörpers im Drehfelde also vermeiden, so müssen wir auch hier das Eisen senkrecht zur Drehachse fein unterteilen, müssen den Anker unseres zu erbauenden Drehstrommotors ebenfalls aus einzelnen voneinander isolierten Blechen aufbauen.



683. Käfigwicklung eines Drehstrom-Induktionsmotors

Bringen wir aber einen derart unterteilten Eisenkörper in das Drehfeld, so müssen wir die Entdeckung machen, daß es mit seiner

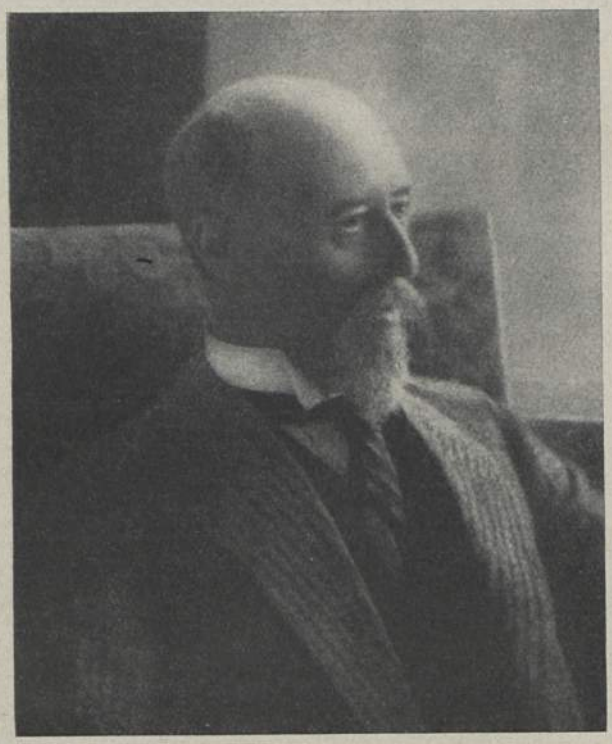
Neigung, sich zu drehen und dem Felde zu folgen, recht mäßig bestellt ist. Während der massive Eisenkörper kaum festzuhalten war, läßt sich der unterteilte Körper mit Leichtigkeit abbremsen. Diese Beobachtung zeigt, daß die Drehung des eisernen Körpers nicht durch direkte magnetische Anziehung zustande kommt wie bei der Verwendung eines Stahlmagneten als Anker, sondern durch elektrodynamische Wirkungen. Das umlaufende Drehfeld induziert in dem dahinter zurückbleibenden Anker Ströme, die nun erst ihrerseits im Ankereisen solche Magnetpole hervorrufen, die ein Mitlaufen des Ankers im Drehfelde zur Folge haben. Diese induzierende Wirkung muß um so stärker sein, je größer die Relativbewegung zwischen Drehfeld und Anker ist. Das Zurückbleiben der Ankerdrehung hinter der Felddrehung bezeichnet man als die Schlüpfung oder den Schlupf des Ankers. Je größer der Ankerschlupf, desto größer auch die in ihm induzierten Ströme und dementsprechend wieder auch um so größer die Kraft, mit der er der Felddrehung zu folgen versucht.




684. Drehstrom-Induktionsmotor mit Schleifringen und Anlaßwiderstand in Sternschaltung

Der Stator ist hier mit einzelnen ausgebildeten Polen nach Bild 676 dargestellt. In der Praxis zieht man die in Bild 682 angedeutete Wicklungsart für den Stator vor

Dies alles konnten wir bereits bei unserem massiven Eisenanker feststellen. Aber nun haben wir ihn ja unterteilt, um die unkontrollierbaren Wirbelströme zu unterbinden, und damit ist auch seine natürliche Zugkraft verloren gegangen. Wir müssen deshalb eine isolierte Kupferwicklung auf ihm anbringen, und dieser Wicklung geben wir zunächst die in Bild 683 dargestellte Form einer einfachen Käfigwicklung. Bei richtiger Bemessung der Wicklung hat der Anker jetzt die gewünschte Zugkraft wiedererhalten, ohne doch unliebsam heiß zu werden. Wir haben also einen brauchbaren Drehstrommotor, aber einen Motor, der sich von Grund aus von den Gleichstrommotoren unterscheidet. Beim Gleichstrommotor benutzten wir den Strom einmal, um ein feststehendes Magnetfeld mit Hilfe der Feldwicklungen zu erzeugen. Außerdem aber mußten wir den Strom mit Hilfe von Schleifbürsten auch in die Ankerdrähte führen, damit nun diese in einem Magnetfeld befindlichen und von Strom durchflossenen Drähte sich nach den Gesetzen der Elektrodynamik in Bewegung setzen und dabei auch den Anker mitnehmen. Ganz anders beim Drehstrommotor. Hier werden nur die Windungen des feststehenden Maschinenteiles vom dreiphasigen Wechselstrom durchflossen und erzeugen dabei ein schnell rotierendes Magnetfeld. Die Ankerwicklungen dagegen sind mit gar keiner Stromquelle verbunden, sondern bilden in sich einen geschlossenen Kreis, in dem das Drehfeld Ströme induziert, die dann nach den Gesetzen der Elektrodynamik eine Bewegung des Ankers bewirken. Aus diesem Grunde bezeichnet man diesen Drehstrommotor auch als Induktionsmotor.



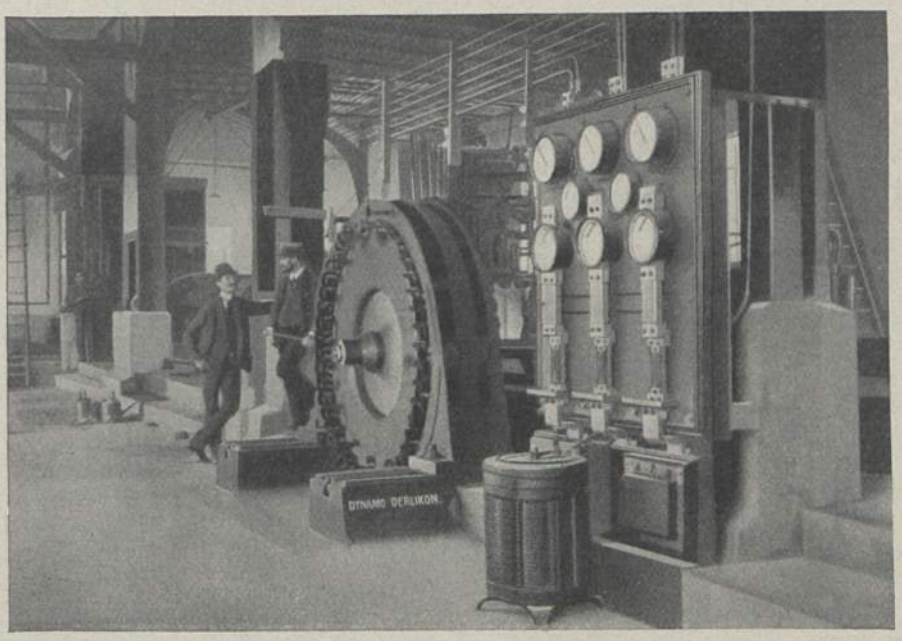
685. Michael v. Dolivo-Dobrowolski
Der Vater der Drehstromtechnik

Seinen feststehenden Teil nennt man Stator oder Ständer, seinen Anker Rotor oder Läufer.

Die Induktion und damit auch die Stromstärke im Anker wächst wie gesagt mit dem Ankerschlupf. Der größte Schlupf ist aber im Augenblicke des Einschaltens vorhanden. Dann steht ja der Anker noch still, und die gesamte Geschwindigkeit des Drehfeldes wird als Schlupf induzierend wirken. Dabei bestehen zwischen den Statorwindungen und den Rotorwindungen ganz ähnliche Verhältnisse wie zwischen der Primär- und Sekundärwicklung eines Transformators. Selbstverständlich stammen die in der Ankerwicklung induzierten Ströme nicht aus dem Nichts, sondern aus der Energieleistung, die aus dem Netz in die Statorwicklungen fließt. Starke Ströme im Rotor bedingen daher auch starke Ströme im Stator, d. h. eine starke Stromentnahme aus dem Leitungsnetz. Das tritt nun auch ganz prompt beim Einschalten eines Drehstrommotors mit der in Bild 683 gezeigten Käfigwicklung ein. Im Augenblicke des Einschaltens steigt die Stromstärke auf das Drei- bis Fünffache der normalen und geht erst zurück, wenn der Anker auf Touren gekommen ist und dem Drehfelde mit verhältnismäßig geringem Schlupf folgt.

Bei kleineren Motoren ist diese Erscheinung zu ertragen. Hier pflegen die Anlaufstromstärken, auch wenn sie ein Mehrfaches der normalen Stromstärke sind, immer noch in den Grenzen zu bleiben, die das Netz verträgt. Aber anders ist es bei größeren und großen Motoren. Hier muß man sich gegen ein verderbliches Anwachsen der Anlaufstromstärke schützen, und man tut es durch die Benutzung von Anlaßwiderständen. Es wird die Wicklung auf dem Rotor beispielsweise in Sternschaltung (Bild 681, rechts) angeordnet und die offenen drei Enden werden zu drei Schleifringen auf der Ankerwelle geführt. Von den Schleifbürsten geht die

Leitung dann zu einem dreifachen ebenfalls auf Stern geschalteten Widerstand weiter (Bild 684). Dieser wird gewöhnlich als regulierbarer Flüssigkeitswiderstand, als ein sogenannter Flüssigkeitsanlasser ausgebildet. Beim Anlassen des Motors schaltet man zunächst, während der Widerstand noch geöffnet ist, die Statorwindungen ein. Erst dann schließt man allmählich die Widerstände des Flüssigkeitsanlassers, und dabei geht der Rotor allmählich an, ohne daß die Stromentnahme aus dem Netz eine unzulässige Höhe erreicht.

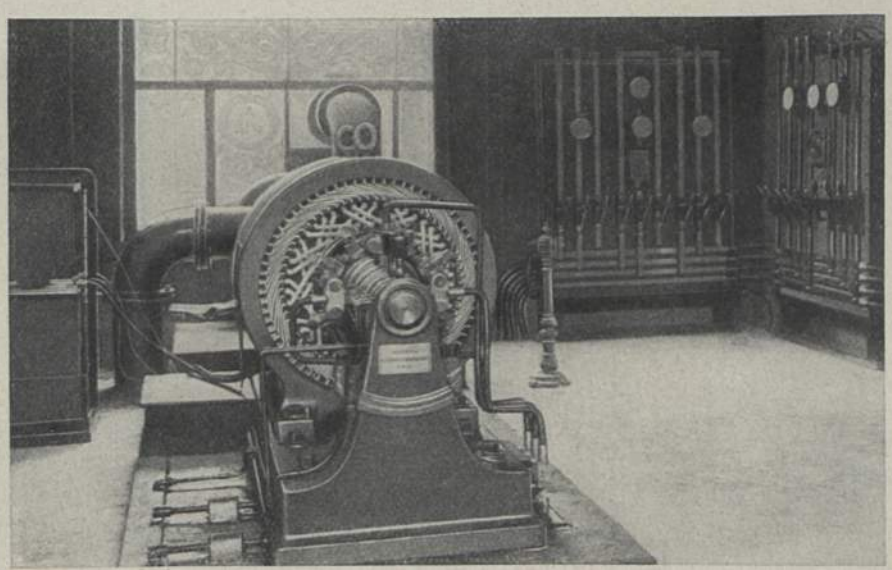



686. Die erste elektrische Hochspannungs-Fernübertragung im Jahre 1891
Die Primärstation in Lauffen am Neckar mit einer Drehstromdynamo von Oerlikon

Die hier beschriebene Anordnung bedingt es, daß nun während der ganzen Betriebszeit des Motors die im Anker induzierten Ströme über die Schleifringe und Schleifbürsten zu dem Anlasser laufen müssen und dort erst kurz geschlossen werden. Das ist namentlich bei großen Motoren, bei denen die Stärken dieser Induktionsströme Hunderte von Ampere betragen können, nicht gerade sehr förderlich für die Betriebssicherheit. Vielfach baut man deshalb in die Ankerwelle eine Vorrichtung ein, die ähnlich wie ein Zentrifugalregulator arbeitet und die drei Schleifringe auf der Welle selbst unmittelbar kurz schließt, sobald der Rotor seine normale Tourenzahl erreicht hat.

Es könnte vielleicht die Frage gestellt werden, warum man denn den Anlaßwiderstand bei einem Drehstrommotor nicht einfach in die Zuleitungen zwischen Netz und Ständer einschaltet und den Läufer nach wie vor mit einer Käfigwicklung versieht. Macht man aber einen derartigen Versuch, so merkt man, daß der Motor dabei einfach nicht angeht, sondern hartnäckig stehen bleibt. Der Wechselstromtechniker tut diese Erscheinung mit dem einfachen Satz ab: Das Ankerfeld drückt das Ständerfeld weg. In der Tat ist ja sowohl bei Gleichstrommaschinen wie beim Drehstrom-Induktionsmotor das Ankerfeld bestrebt, dem primären Feld entgegenzuwirken, es je nach der Art der betreffenden Maschine zu schwächen, zu verdrehen oder sonstwie zu verzerren. Legt man nun den Anlaßwiderstand beim Drehstrommotor vor die Ständerwicklung, während die Ankerwicklung kurz geschlossen bleibt, so entsteht in dieser von Anfang an eine derartige Gegenwirkung gegen den Ständerstrom und dessen Magnetfeld, daß es überhaupt nicht zur Ausbildung eines genügenden Drehmomentes kommen kann. Alle diese Verhältnisse waren zu Beginn der Drehstromtechnik natürlich noch wenig ergründet, und es bedurfte jahrelanger intensivster Arbeit, um sie zu klären. Die Elektrotechniker, die mit ihren in der Gleichstrompraxis gewonnenen Erfahrungen an Drehstromprobleme herantraten, standen ja plötzlich vor einer Fülle ganz neuer und zunächst unerklärlicher Erscheinungen. Man maß bedeutende Ströme und Spannungen und hatte doch eine viel geringere Leistung als das Produkt dieser beiden Größen, da man die Tücken des Kosinus $\varphi$ noch nicht genügend kannte. Man sprach von effektiven und von scheinbaren Watt, ohne sich doch unter diesen Begriffen etwas Rechtes vorstellen zu können.

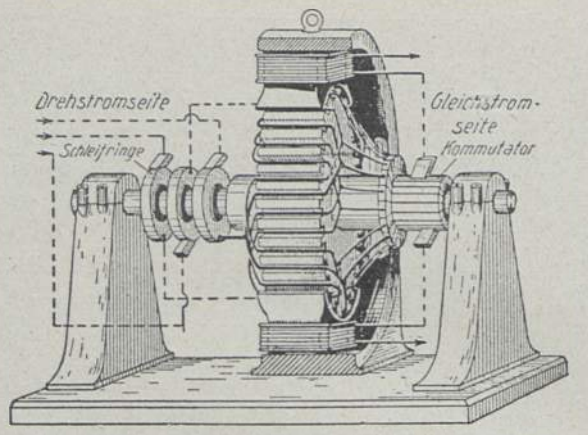
Der Mann, der in Deutschland als der erste alle diese Probleme mit festem Griff anpackte und die Drehstromtechnik aus einer Geheimwissenschaft des Laboratoriums zu wirklicher Technik entwickelte, war der Chefelektriker der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft v. Dolivo-Dobrowolski. Er widmete sich zu Ende der achtziger Jahre der Ausbildung von Drehstromerzeugern und Drehstrommotoren mit solchem Erfolg, daß die neue Stromart bereits auf der Internationalen elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt am Main in einer großartigen, die ganze Welt interessierenden Weise vorgeführt werden konnte. Es ist die Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt am Main, das erste wirklich gelungene Fernübertragungsexperiment großen Stiles. Die Idee, mit Hilfe des neuerfundenen Drehstroms die



687. Die erste elektrische Hochspannungs-Fernübertragung im Jahre 1891
Die erste Sekundärstation auf der Internationalen elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt am Main. Ein hundertpferdiger Drehstrommotor

Wasserkräfte des Neckarfalles bei Lauffen über eine Entfernung von 175 Kilometern zu übertragen, ging von Oskar von Miller aus, die technische Ausführung leitete die Allgemeine Elektricitätsgesellschaft.

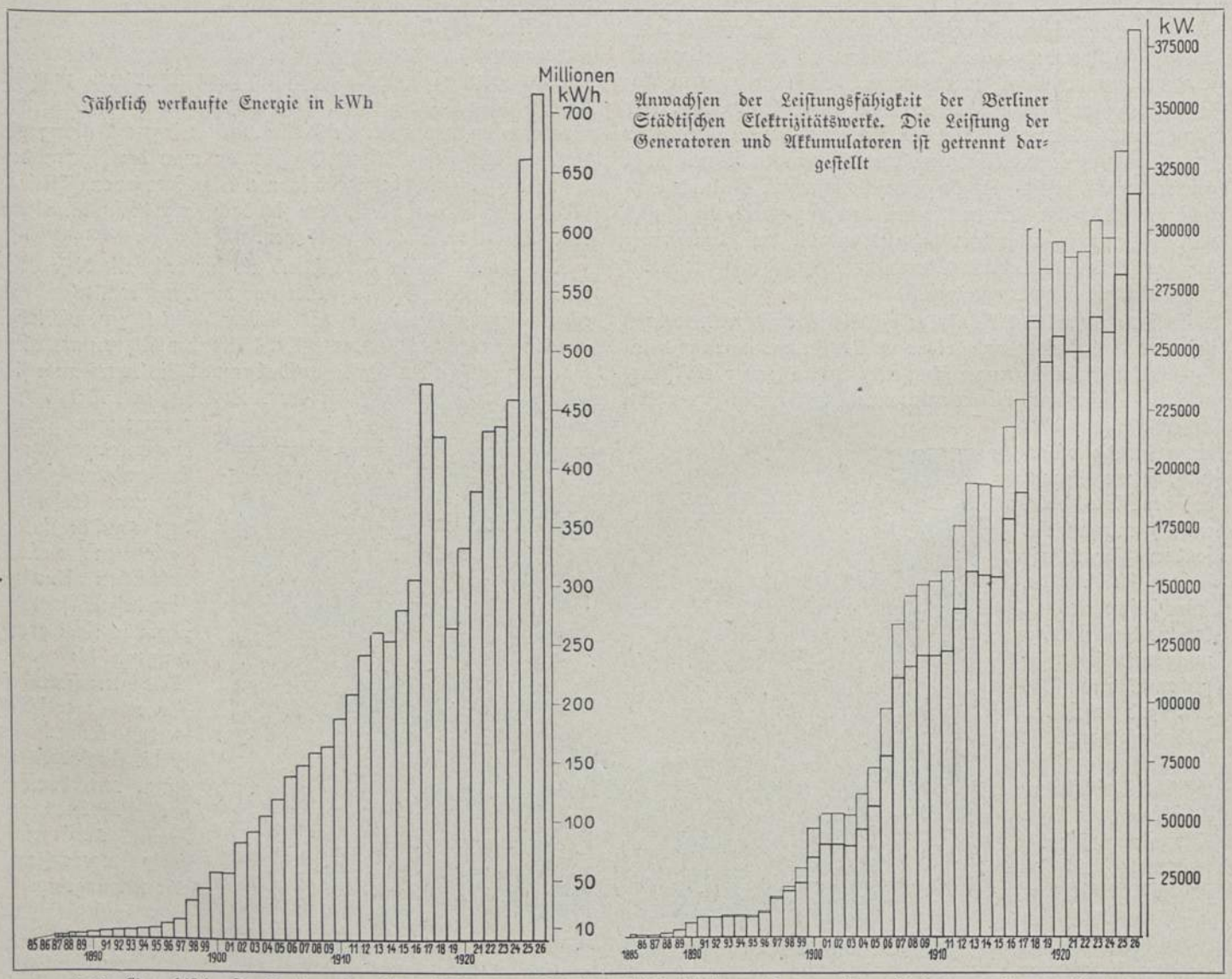
In Lauffen stand eine Turbine, die von den Wassermassen des Neckarfalles getrieben wurde und ihrerseits einen zweihundertpferdigen Drehstrom-Generator antrieb. Die von diesem gelieferte elektrische Energie wurde auf eine Spannung von 16 000 Volt hinauftransformiert, nach Frankfurt geleitet, dort wieder auf einige hundert Volt hinuntertransformiert und zum Betriebe von tausend Glühlampen und einem Drehstrommotor benutzt, der seinerseits wieder eine Kreiselpumpe trieb und dadurch einen kleinen Wasserfall auf dem Ausstellungsgelände speiste. Maschinen und Transformatoren waren zu dieser Zeit von Dolivo-Dobrowolski bereits zu einer recht bedeutenden Vollkommenheit entwickelt worden. Das Schwierigste war eigentlich die Hochspannungsleitung, die durch die Gebiete von Württemberg, Baden, Hessen und Preußen geführt werden mußte. Erst nach der Überwindung vieler Widerstände, namentlich seitens der Postverwaltung, gelang es, die Konzession für diese Leitung zu bekommen, deren Gefahr ebenso maßlos überschätzt wurde wie fünfzig Jahre früher etwa diejenige der ersten Eisenbahnen.




688. Schematische Darstellung eines Drehstrom-Gleichstrom-Einanker-Umformers

Auf der Drehstromseite wird der Maschine zu drei Schleifringen Drehstrom zugeführt, auf der Gleichstromseite wird von einem Kommutator Gleichstrom abgenommen

Vom Standpunkte unserer heutigen Hochspannungstechnik, die Spannungen bis zu 500 000 Volt zuverlässig meistert, muß man diesen ersten Versuch freilich als einen Angstbetrieb bezeichnen. Die Isolatoren waren der besseren Sicherheit halber noch mit Öl gefüllt und mußten ständig überwacht werden. War es ja das erstemal, daß man sich an Spannungen von solcher Höhe heranwagte. Aber der Versuch glückte, die Anlage funktionierte mit einem überraschend hohen Wirkungsgrad und gewährte der staunenden Mitwelt den Ausblick in märchenhafte Entwick-




689. Graphische Darstellung der Entwicklung der Berliner Elektrizitätswerke von ihrer Gründung bis zur Gegenwart

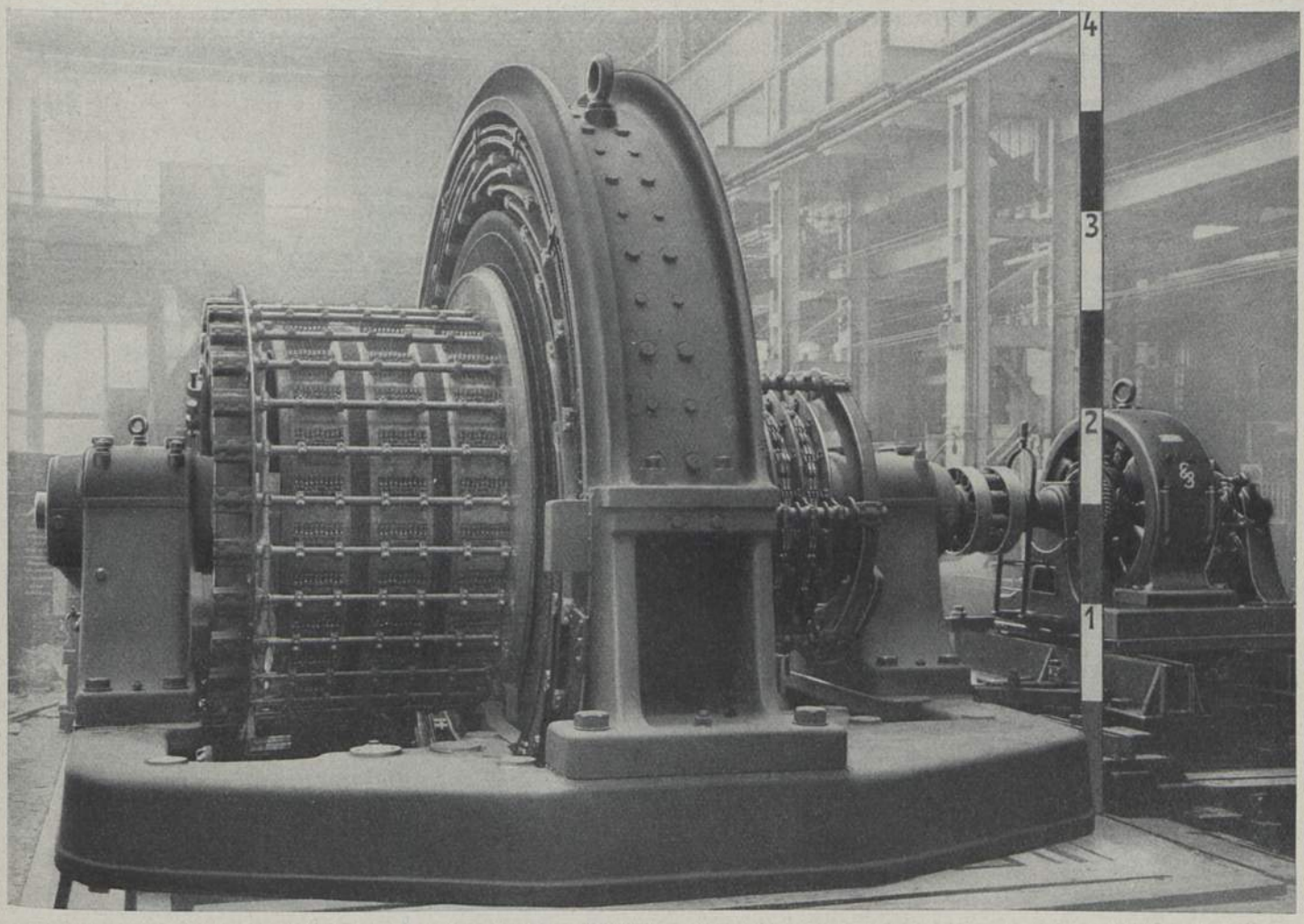
lungsmöglichkeiten. Charakteristisch ist die Rede, die Emil Rathenau damals vor den Festgästen der Ausstellung hielt. Er sagte darin u.a.:

„Bei weitem überflügelt hat aber der, wie man ihn bisher nannte, elektrische Funke den Dampf. Wir haben es heute gezeigt, daß auf eine Entfernung von über 170 km mit mathematischer Gewißheit Elektrizität die ihr von einem Wasserfall zugeführte Kraft überträgt, und was heute auf 175 km und mit 16 000 Volt Spannung gelingt, wird gewiß in wenigen Jahren mit 100 000 Volt auf weit riesigere Entfernungen ein Leichtes sein.

Aber nicht allein dieser fast märchenhafte Erfolg der Überwindung von Zeit und Raum ist uns klargelegt; Sie werden, meine hochgeehrte Versammlung, bei Ihrer Rückkehr nach der Ausstellung dort gewahren können, wie die auf nur 4 Millimeter starke Drähte eingezwängte und über weite Strecken fortgeleitete Kraft von mehr als 200 Pferdestärken an der Ankunftsstelle den verschiedensten Zwecken dienstbar gemacht wird, wie sie nicht nur mit einem Aufwand von etwa 80 Pferdestärken eine Wassermenge 10 Meter in die Höhe drückt, um dieselbe als Wasserfall hinabsprudeln zu lassen, wie sie dann noch an verschiedenen Stellen dem Gebote eines geringen Drucks auf einen Hebel folgend, eine große Anzahl von Lampen aufglühen läßt, wie sie endlich ohne jede Schwierigkeit geringe Teile ihrer Kraft, $^1/_{10}$ Pferdekraft, abgibt, um mittels einer kleinen, fast spielzeugartigen und doch dauerhaften und betriebsfähigen Maschine, einen Luftfächer zu bedienen.

Die großartige Verteilungsfähigkeit der Elektrizität ist es, welche den Versuch der Übertragung auf große, sehr große Entfernungen erst so recht zu einem bedeutungs- und wertvollen gemacht hat. Wenn wir daran denken, daß es das ungewußte Sinnen der Menschheit, das zielbewußte Streben der Forscher, Erfinder, der Leute der Zukunft, wie ich den Ingenieur bezeichnen möchte, ist, menschlicher Arbeit das Gebiet des Nachdenkens, das Gebiet der individuellen Tätigkeit vorzubehalten und immer weiter zu erschließen, alle rein mechanische, gedankenlose Tätigkeit aber durch Unterjochen der Naturkraft durch Maschinen zu vollbringen, so darf ich den jetzt eingeschlagenen Weg kühn als denjenigen bezeichnen, auf dem Jahrhunderte mit Erfolg weiter wandeln können."

Nach Schluß der Frankfurter Ausstellung wurde die Spannung dieser ersten Fernübertragung zu Versuchszwecken sogar noch auf 30 000 Volt erhöht und arbeitete auch damit zufriedenstellend. Trotzdem aber sollte es noch mehrere Jahre dauern, bevor das neue System wirklich praktische Anwendung und Verbreitung fand. Erst jetzt entbrannte der Kampf zwischen den Anhängern des Gleichstroms und des Wechselstroms zu voller Flamme, und mit nicht immer sauberen Mitteln suchten die Anhänger des Gleichstromes das neue System zu verdächtigen. Der Anstoß, der doch schließlich den Streit zugunsten des Drehstromes entschied, kam aus dem Auslande, aus Ländern, denen die Natur Kohlenschätze versagt, aber dafür reiche Wasserkräfte geschenkt hatte. Die skandinavischen Länder




690. Drehstrom-Gleichstrom-Einanker-Umformer
für eine dauernde Gleichstromleistung von 5000 Kilowatt (6800 Pferdestärken). Der rechts befindliche Metermaßstab gibt einen Überblick über die Größenverhältnisse. Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

und Italien waren die ersten, die der jungen Hochspannungstechnik lohnende Aufträge überwiesen und dadurch ihre weitere Entwicklung ermöglichten. Die Kohlen konnte man schließlich immer noch zur Zentrale hinfahren, mochte diese auch weit von der Kohlengrube entfernt im Herzen der Großstadt liegen. Freilich war es aus wirtschaftlichen Gründen geboten, die Transportkosten nur für eine möglichst hochwertige Kohle aufzuwenden, denn der Transportpreis für das Tonnenkilometer blieb ja unter allen Umständen der gleiche, aber die Tonne bester westfälischer Steinkohle hatte den dreifachen Heizwert einer mittleren Braunkohle. Bei den Wasserkräften aber war solch Transport völlig ausgeschlossen. Man mußte sie an Ort und Stelle für die Elektrizitätserzeugung nutzbar machen oder auch weiterhin nutzlos verrauschen lassen. Sie auf elektrischem Wege nutzbar machen, hieß aber auch gleichzeitig, sich zur Hochspannung bekennen. Denn fast ausnahmslos lagen alle diese Wasserkräfte in wilden einsamen Gebirgsgegenden, weit ab von aller Kultur und Zivilisation. Es wäre einfach unmöglich gewesen, die aus ihnen gewonnene elektrische Energie unmittelbar an der Gewinnungsstelle auch nutzbringend zu verwerten.

Im Laufe der weiteren Entwicklung kam die Weiterbildung der Hochspannungstechnik auch den anderen Ländern zugute. Schon im Jahre 1898 errichteten die Berliner Elektrizitätswerke die erste Drehstrom-Hochspannungszentrale in Oberschöneweide an der Oberspree, welche Wechselstromenergie mit einer Spannung von 30 000 Volt erzeugte. 1899 folgte der Bau einer zweiten derartigen Zentrale in Moabit und wiederum wenige Jahre später der einer dritten in Rummelsburg. Für die nähere Umgebung waren diese drei Werke in der Tat Wechselstromwerke. Sie versorgten die zu ihnen gehörigen Berliner Außenviertel mit Drehstrom, der auf 220 Volt hinuntertransformiert in das Straßennetz gegeben wurde. Darüber hinaus aber waren sie auch Stromversorger größten Stiles für die alte Innenstadt. In Hochspannungskabeln wurde die Energie mit 30 000 Volt bis in das Herz Berlins zu fünf neuen Unterstationen geleitet. Hier wurde sie zunächst hinuntertransformiert und dann rotierenden Umformern zugeleitet, die den Drehstrom in Gleichstrom verwandelten.

Eine Verwandlung von Drehstrom in Gleichstrom kann in einfacher Weise erfolgen, indem man einen Drehstrommotor mit einer passenden Gleichstromdynamo kuppelt. Der Motor verwandelt dann die zugeführte Drehstromenergie in mechanische Arbeit, die durch die gekuppelten Wellen auf die Dynamomaschine übertragen und hier in elektrische Energie in Form von Gleichstrom verwandelt wird. Die ganze Umwandlung erfolgt unter günstigen Verhältnissen. Man kann den Wirkungsgrad eines großen Induktionsmotors mit 86 %, den einer Gleichstromdynamo sogar mit 92 % annehmen, so daß ein solches Maschinenaggregat die Umwandlung der einen in die andere Stromart mit dem immerhin günstigen Wirkungsgrad von rund 80 % besorgt.

Die fortschreitende Technik hat aber diese wohl auch als Motorgeneratoren bezeichneten Umformer im Laufe der Zeit durch die Einanker-Umformer ersetzt, die ihnen sowohl wirtschaftlich wie in bezug auf den Wirkungsgrad beträchtlich überlegen sind. Die Einankerumformer für die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom erhalten auf dem in einem durch Gleichstrom erregten Magnetfeld rotierenden Anker nur eine Wicklung, der von der einen Seite her durch drei Schleifbürsten der Drehstrom zugeführt und auf der anderen Seite durch einen Kommutator mit zwei Bürsten der Gleichstrom entnommen wird. Bild 688 zeigt das Schema einer solchen Maschine. Ein derartiger Umformer wird nicht umfangreicher und auch kaum teurer als ein Generator der gleichen Leistung. Die Umformung selbst aber vollzieht sich hier mit einem sehr guten Wirkungsgrad, der sich im allgemeinen höher als 90 % stellt. In einer Umformstation fallen natürlich die umfangreichen Räume für das Brennstofflager, die Kessel- und die Maschinenanlage fort, und man kann solche Stationen mit sehr großer Leistung in verhältnismäßig recht kleinen Räumen unterbringen. Da es sich überdies nur um rotierende, vollkommen geräuschlos arbeitende Maschinen handelt, so bedeutet eine solche Station auch keine Belästigung für die Nachbarschaft und kann sogar in Mietsräumen untergebracht werden.

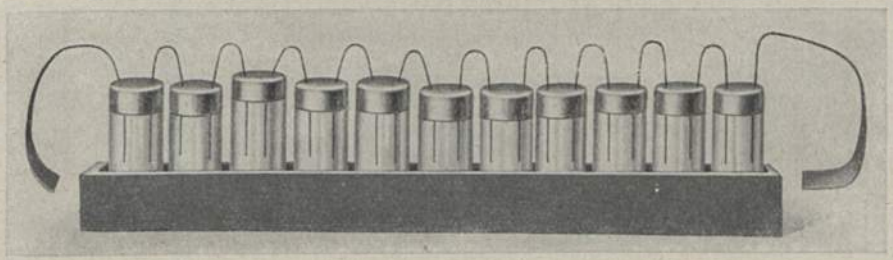
In der Tat hat die Anlage der hier genannten Hochspannungswerke in der Umgebung Berlins genügt, um den rapide ansteigenden Strombedarf der Reichshauptstadt für anderthalb Jahrzehnte zu decken. Bis dann der letzte große Sprung kam, bis man die Spannung auf das Tausendfache der alten Edisonspannung, bis auf 110 000 Volt erhöhte und die Kraftwerke weit weg ins Land hinein verlegte, wo Braunkohle als billiger Brennstoff in reichem Maße zur Verfügung stand. Doch dieser Schritt führt schon weit in das 20. Jahrhundert hinein, in jene Epoche der Elektrotechnik, in der wir jetzt noch leben.

# 32. Die technische Beherrschung der elektrischen Energie

Vor der Erfindung der magnetelektrischen Maschinen verfügte man nur über Galvanische Batterien als Stromquellen. In diesen vollzogen sich chemische Umwandlungen, die letzten Endes immer auf eine Oxydation von metallischem Zink hinausliefen, während ein Teil der bei dieser Oxydation oder Verbrennung frei werdenden Arbeit in Form elektrischer Energie von der Batterie abgegeben werden konnte. Alle diese Galvanischen Batterien waren durch die Unumkehrbarkeit des in ihnen stattfindenden Prozesses gekennzeichnet. Man konnte ihnen Strom entnehmen, während gleichzeitig eine chemische Veränderung der in ihnen befindlichen Flüssigkeiten und Metalle vor sich ging. Es war aber nicht möglich dadurch, daß man umgekehrt Strom in solche Batterie hineinschickte, den ursprünglichen Zustand ihrer Bestandteile wieder herzustellen. Wenn sogar heut noch bisweilen die Behauptung aufgestellt wird, es wäre möglich, eine Radio-Anodenbatterie durch längere Beschickung mit Gleichstrom aus dem Lichtnetz wieder zu regenerieren, so ist das eine bedauerliche Selbsttäuschung und ein interessanter Fall aus der Geschichte des technischen Aberglaubens.

Wenn aber auch der Prozeß in den üblichen Galvanischen Batterien nicht umkehrbar war, so war damit doch noch nicht gesagt, daß sich umkehrbare Batterien nicht konstruieren lassen sollten. Folgende Überlegung war möglich. Man geht von einer Zusammenstellung aus, die zunächst elektrisch vollkommen wirkungslos ist. Man nimmt z. B., wie es der Arzt Johann Wilhelm Ritter schon in den ersten Jahren des 19. Jahrhunderts tat, zwei rein metallische Kupferplatten, trennt sie durch eine „kochsalznasse Papp-Platte" und führt diesem System nun den Strom einer Galvanischen Batterie zu. Unter der Stromwirkung erleiden die Kupferplatten Veränderungen und sind danach befähigt, selbst wie eine Batterie zu arbeiten und solange Strom abzugeben, bis die Veränderungen und Unterschiede der beiden Kupferplatten wieder verschwunden sind. Tatsächlich hatte Ritter durch diese Anordnung die erste umkehrbare Batterie geschaffen, der er eine gute Viertelstunde hindurch nach der Ladung Strom entnehmen konnte. Bild 691 zeigt eine der ältesten derartigen „Ladungssäulen" von Ritter in Gestalt einer sogenannten „Tassenkrone".

Der Rittersche Versuch hatte natürlich nur die Bedeutung eines interessanten wissenschaftlichen Experimentes. Erst ein halbes Jahrhundert später wurde durch einen anderen deutschen Arzt Wilhelm Joseph Sinsteden ein weiterer wichtiger Schritt auf diesem Gebiete getan. Sinsteden benutzte als der erste eine Kombination von zwei Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure und stellte fest, daß gerade diese Zusammenstellung besonders günstig für die Aufspeicherung verhältnismäßig großer Mengen elektrischer Energie war. Den nächsten Fortschritt erzielte 1859 Planté, der die fünf Jahre vorher von Sinsteden angegebene Kombination „Blei — verdünnte Schwefelsäure — Blei" aufgriff, seinem Element aber die in Bild 692 gezeigte Form gab. Die beiden ziemlich dünnen Bleibleche wurden dabei durch dazwischen gelegte Gummibänder voneinander isoliert und in Zylinderform aufgerollt, so daß ein Element mit sehr großer Plattenoberfläche und geringem inneren Widerstand entstand. Planté machte auch bei seinen Versuchen die Erfahrung, daß es wenig Zweck hatte, ein solches Element über eine gewisse Grenze hinaus mit Strom zu beschicken, da von einem bestimmten Zeitpunkt an die zugeführte Energie nicht mehr gespeichert, sondern zwecklos zur Wasserzersetzung verbraucht wurde. Er fand weiter, daß die Aufnahmefähigkeit des Elementes bedeutend stieg, wenn es recht häufig geladen und wieder entladen wurde. Auch die Erklärung für dies Verhalten gab er richtig an. Bei der ersten Ladung wird auf der Oberfläche derjenigen Platte, die am positiven Pol der ladenden Stromquelle liegt, eine ganz dünne Schicht von Bleisuperoxyd erzeugt. Bei der Entladung verwandelt sich das Superoxyd zwar wieder in metallisches Blei, aber dies Blei ist jetzt nicht mehr fest, sondern schwammig. Bei der nächsten Ladung kann der Strom durch den

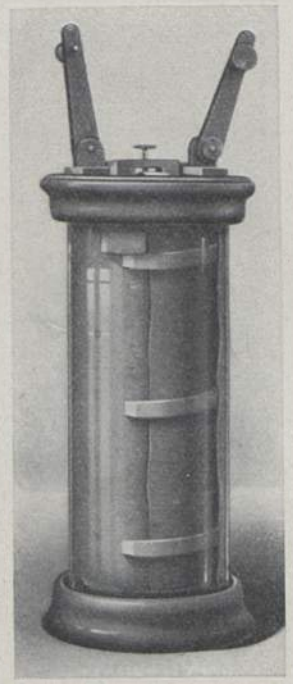


691. Die „Tassenkrone" von Johann Wilhelm Ritter

Der erste Versuch eines elektrischen Akkumulators aus dem Jahre 1805. Kupferplatten in Schwefelsäure. Die Säule stammt aus dem Nachlaß Voltas, wurde auf der Volta-Ausstellung in Como im Jahre 1899 gezeigt und bei dem Brande dieser Ausstellung wahrscheinlich mit zerstört

Bleischwamm hindurch tiefer wirken und eine stärkere Superoxydschicht bilden. So geht es von Ladung zu Ladung weiter, wobei es sich als vorteilhaft erweist, die Ladungen in wechselnder Richtung vorzunehmen, so daß beide Platten bis in größere Tiefen aufgelockert werden. Planté bezeichnete diesen Vorgang als das Formieren der Batterie. Seine Arbeiten fielen in die Zeit vor der Erfindung der Dynamomaschine und haben daher hauptsächlich wissenschaftliches und geschichtliches Interesse. Erst nach der Erfindung der Dynamomaschine und der Errichtung der ersten Blockzentralen trat ein wirkliches Bedürfnis für einen elektrochemischen Stromspeicher auf, und nun wurden die Ideen und Vorschläge der hier genannten Erfinder fruchtbar weiter entwickelt.

Planté selbst wies im Jahre 1879 in erneuter Veröffentlichung auf seine 20 Jahre zurückliegenden Untersuchungen hin. Im gleichen Jahre baute Metzger in Alt-Breisach einen Bleiakkumulator, dessen Platte (Bild 694) aus zwei durchlochten Bleiblechen bestand, wobei der Zwischenraum zwischen den Platten mit Bleiverbindungen ausgefüllt wurde. Das Jahr 1881 brachte das berühmte Patent von Camille Faure, welches dem Erfinder jegliche Benutzung von mechanisch oder chemisch aufgetragenen Bleiverbindungen auf Träger aus Blei, Kupfer, Kohle und dergleichen schützte. Mit Ausnahme des Planté-Akkumulators umfaßt dieses Patent so ziemlich jede denkbare Bauart eines Sammlers und gab daher Veranlassung zu erbitterten Patentstreitigkeiten, die sich bis in die neunziger Jahre hinein erstreckten und schließlich zu einer starken Beschneidung der Faureschen Ansprüche führten.



692. Planté-Akkumulator aus dem Jahre 1859

Bleiplatten in Schwefelsäure. Große, dicht beieinander liegende Platten, daher geringer innerer Widerstand des Akkumulators

Den Erfindungen von Metzger und Faure sowie denjenigen von Volckmar und Charles F. Brush, von denen später berichtet werden soll, lag die gemeinschaftliche Idee zugrunde, das langwierige und kostspielige Formierungsverfahren von Planté durch etwas Besseres zu ersetzen. Die Formierung verwandelte das feste metallische Blei allmählich auf elektrochemischem Wege in schwammiges Blei. Der Gedanke mußte ja naheliegen, diesen Prozeß dadurch zu umgehen, daß man einen irgendwie passend geformten Träger aus festem metallischem Blei mit einer geeigneten Bleiverbindung bestrich oder überzog. Faure wählte dazu Mennige, jene als rote Anstrichfarbe bekannte Bleiverbindung, die in einem Molekül zwei Atome Blei und drei Atome Sauerstoff enthält. Die Mennige wurde mit verdünnter Schwefelsäure zu einer plastischen Paste angerührt und dann auf die Bleiträger verstrichen. Wurde nun eine aus solchen Platten zusammengebaute Batterie mit elektrischem Strom geladen, so wanderte dabei der Sauerstoff aus der Mennige der negativen Platte zur positiven Platte hinüber. Er bildete hier mit der Mennige dieser Platte Bleisuperoxyd, eine noch sauerstoffreichere Bleiverbindung, deren Molekül aus einem Atom Blei und zwei Atomen Sauerstoff besteht. An der negativen Platte dagegen blieb metallisches Blei in schwammiger Form zurück. Dieser Prozeß vollzog sich sofort bei der ersten Ladung durch die ganze Masse der aufgestrichenen Paste hindurch, da diese an sich porös war und die elektrochemischen Wirkungen sofort in die Tiefe dringen ließ.

Ist die Ladung eines solchen Faure-Akkumulators vollendet, so ist also die ganze aktive Masse seiner positiven Platten in Bleisuperoxyd, diejenige der negativen Platten in metallischen Bleischwamm verwandelt. Die Platten stehen in verdünnter Schwefelsäure, so daß sich für den geladenen Akkumulator das nachstehende Schema ergibt.

| + Platte; | Elektrolyt; | — Platte |
|---|---|---|
| $PbO_2$ | $H_2SO_4$ | Pb |

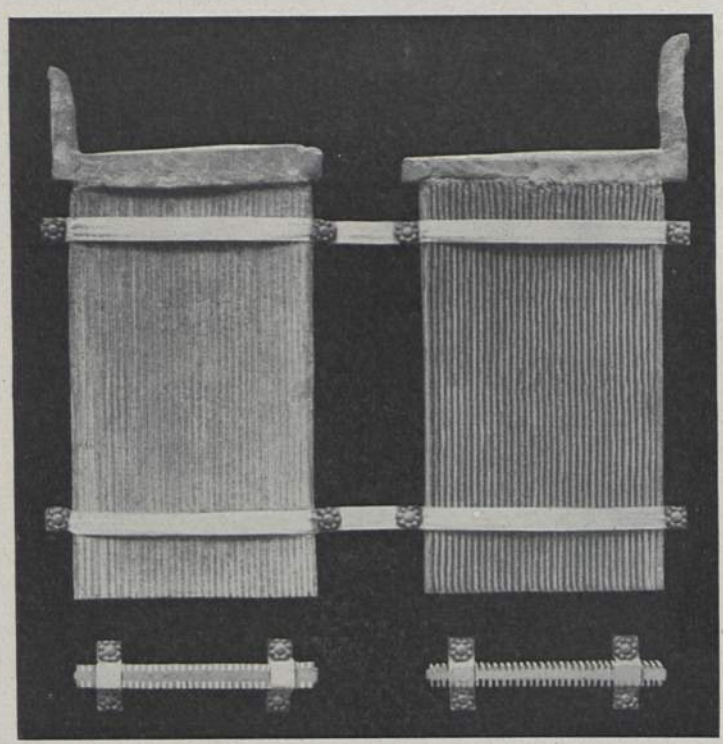
Die Entladung ist nun aber keineswegs einfach die genaue Umkehrung des Vorganges bei der ersten Ladung. Vielmehr spielt jetzt die Schwefelsäure des Elektrolyten dabei eine Rolle mit, wie es die nachstehenden Formeln zeigen.

$$PbO_2 \qquad H_2SO_4 \qquad Pb$$

$$H_2 \qquad SO_4$$

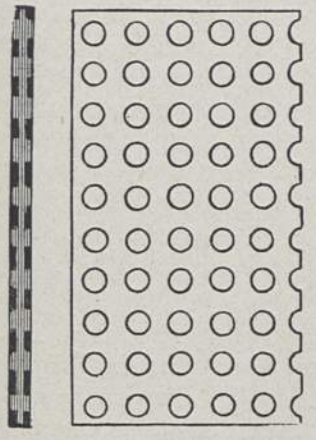
$$PbO_2 + H_2 + H_2SO_4 = PbSO_4 + 2H_2O \qquad SO_4 + Pb = PbSO_4$$

Ein Molekül Schwefelsäure von der Form $H_2SO_4$ zerfällt in seine beiden Radikale $H_2$ und $SO_4$. Das Radikal $SO_4$ wandert zur negativen Platte und bildet mit dem Blei derselben schwefelsaures Blei oder Bleivitriol von der Form $PbSO_4$. Zur positiven Platte wandert das Radikal $H_2$ und außerdem noch ein Schwefelsäuremolekül $H_2SO_4$. Zusammen mit einem Bleisuperoxydmolekül $PbO_2$ bilden sie hier ein Molekül schwefelsaures Blei $PbSO_4$ und zwei Molekül Wasser, die in den Elektrolyten gehen. Während der Entladung erfährt also die Schwefelsäure eine ständige Verdünnung. Man kann daher aus ihrem jeweiligen spezifischen Gewicht genau ersehen, wie weit die Entladung der Batterie vorgeschritten ist. Während die Prüfung der Batteriespannung, auch wenn sie in sorgfältigster Weise und mit den



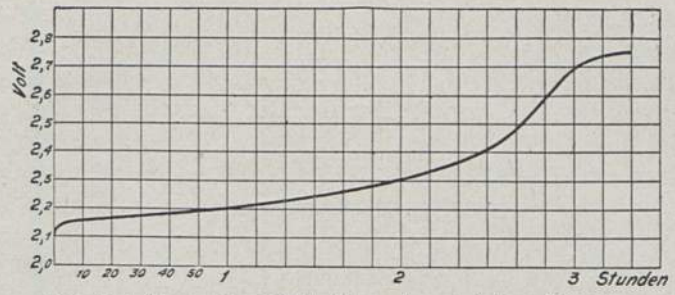
693. Tudorplatten aus dem Jahre 1883

Die Gebrüder Tudor machten den Bleiakkumulator durch die glückliche Vereinigung der Erfindungsgedanken von Planté und Faure lebensfähig.

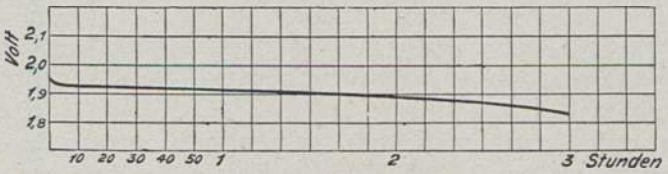


694. Akkumulatorenplatte von Metzger

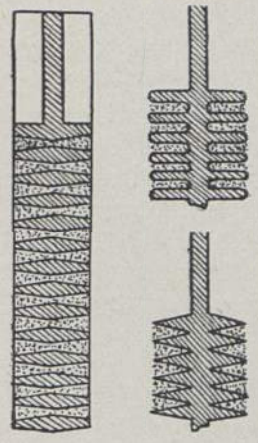
Die erste mit Bleiverbindungen gefüllte Hohlplatte aus dem Jahre 1879




695. Ladekurve eines Bleiakkumulators bei dreistündiger Ladung

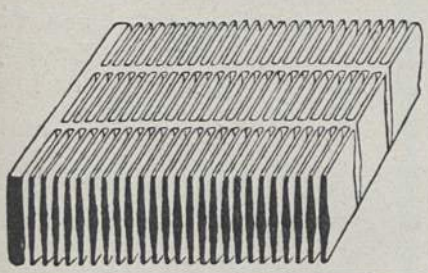



696. Entladekurve eines Bleiakkumulators

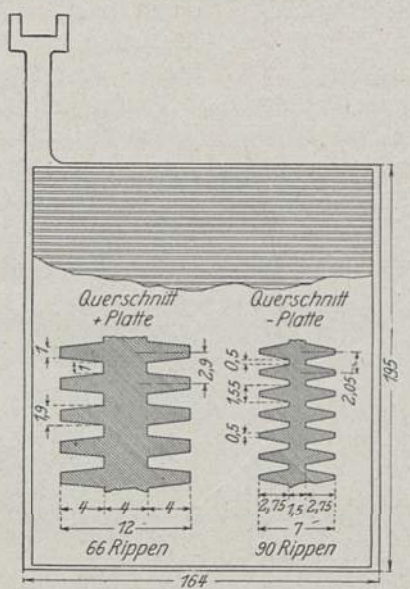


697. Plattenabschnitte von Brushplatten

Charles F. Brush darf als Erfinder der Großoberflächenplatten gelten

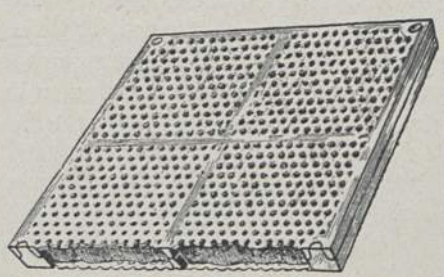


698. Abschnitt einer positiven Großoberflächenplatte

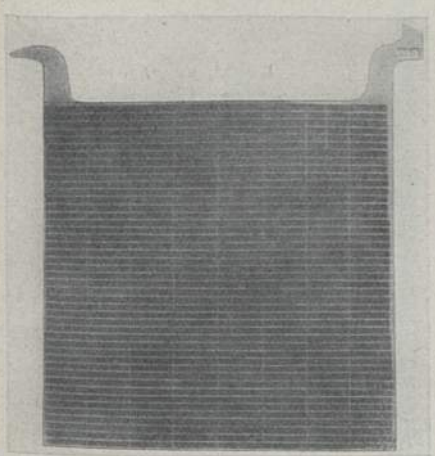



699. Weiter entwickelte Tudorplatte

der Accumulatoren-Fabrik A.-G., Berlin. Vgl. Bild 693

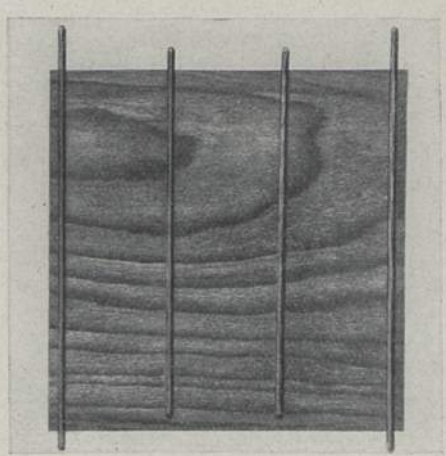


700. Abschnitt einer negativen Kastenplatte



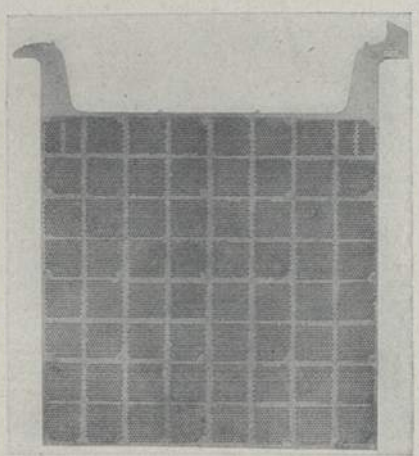
701. Positive Großoberflächenplatte

Accumulatoren-Fabrik A.-G., Berlin



702. Holzbrettchen mit Holzstäben

zum sicheren Auseinanderhalten der Platten in ortsfesten Batterien



703. Negative Kastenplatte

Accumulatoren-Fabrik A.-G., Berlin

besten Meßinstrumenten erfolgt, niemals ein zuverlässiges Bild vom augenblicklichen Zustand des Akkumulators zu geben vermag, gestattet die Messung der Säuredichte mit Hilfe eines einfachen Aräometers sofort einen sicheren Schluß darauf, wieviel Energie der Batterie noch entnommen werden darf. Die nun folgende zweite Ladung der Batterie ist wirklich eine Umkehrung des ersten Entladungsvorganges, wie es die folgenden Formeln dartun.

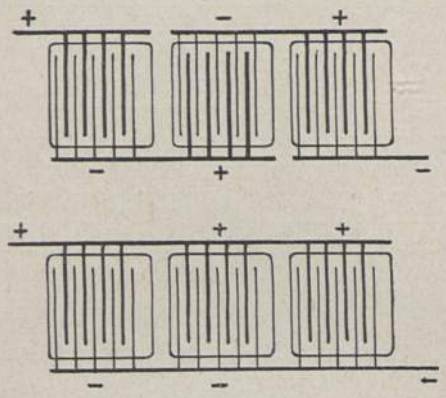
$$+PbSO_4 \quad H_2SO_4 \quad -PbSO_4$$

$$SO_4 \qquad H_2$$

$$PbSO_4+2H_2O+SO_4 \qquad PbSO_4+H_2$$
$$=PbO_2+2H_2SO_4; \qquad =H_2SO_4+Pb$$

Dabei wird wieder Schwefelsäure gebildet und der Elektrolyt gewinnt seine frühere Konzentration und damit auch sein früheres spezifisches Gewicht zurück, und ebenso gehen auch die beiden Elektroden in die frühere Form zurück. Die aktive Masse der positiven Platte wird wieder in Bleisuperoxyd, diejenige der negativen Platte in metallisches Blei zurückverwandelt.

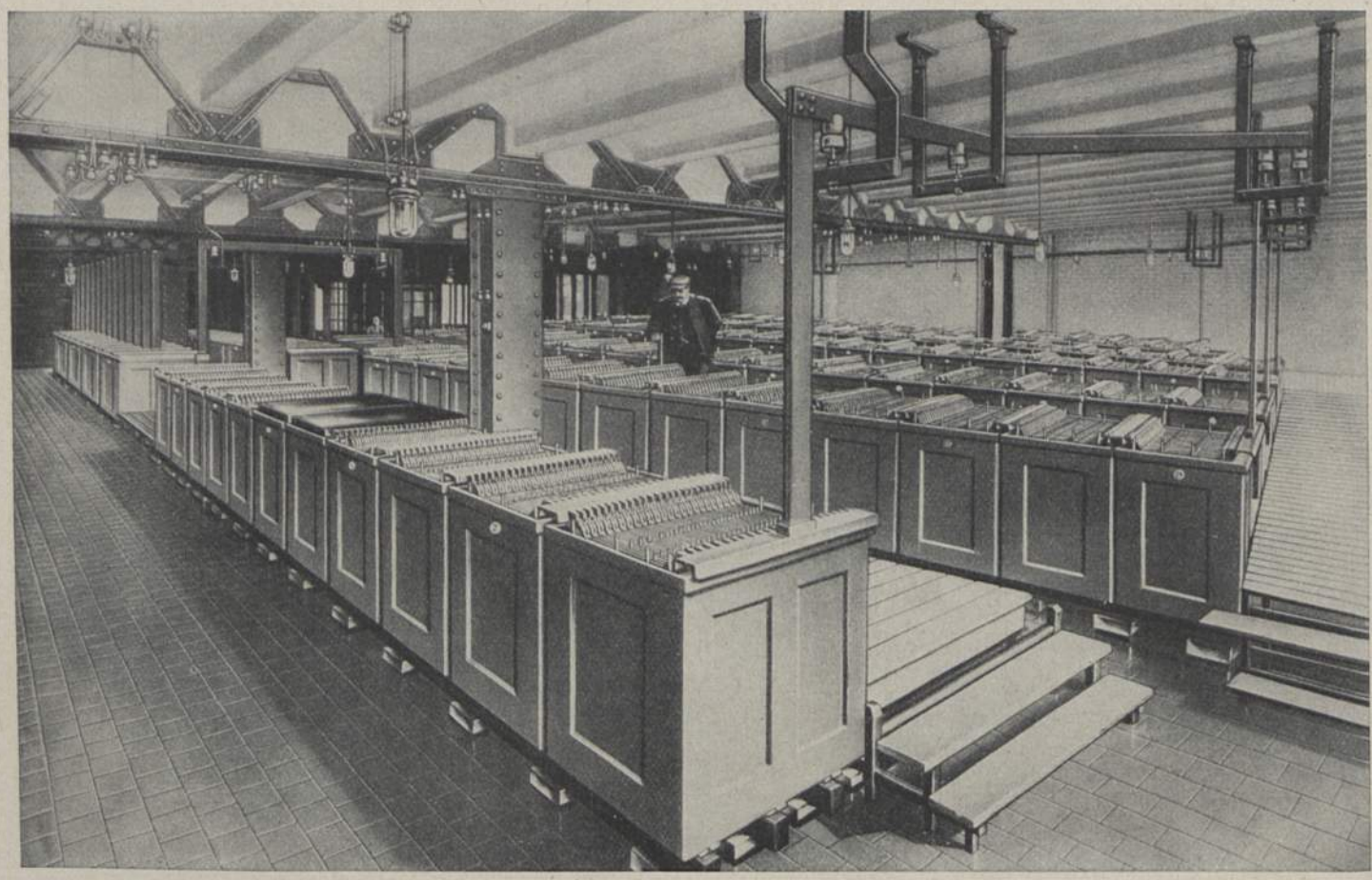
Die große Reihe von Erfindungen und zugehörigen Patenten, die nun nach dem Auftreten von Camille Faure einsetzt, läßt sich in zwei Hauptgruppen teilen, in Erfindungen, die den mechanischen Aufbau der Masseplatten und in solche, welche die chemische Zusammensetzung der aufzustreichenden Paste betreffen. In der ersteren Gruppe machen sich die beiden Richtungen der reinen Masseplatte und der Großoberflächenplatte bemerkbar. Als Vertreter der ersteren wählte Volckmar ein Bleigitter, dessen Maschen mit der aktiven Masse ausgestrichen wurden, und wurde dadurch der Schöpfer der Gitterplatte. Dagegen meldete Charles F. Brush eine zusammenhängende Bleiplatte mit möglichst großer Oberfläche an (Bild 697), deren Rillen oder Nuten mit der aktiven Masse ausgestrichen wurden.



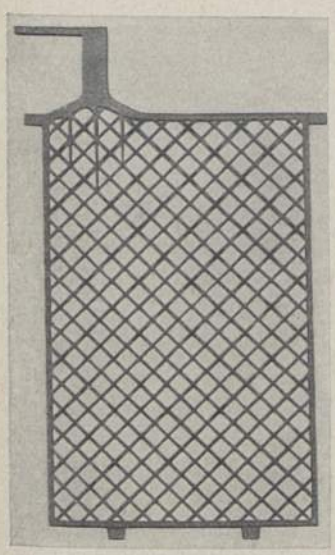
704. Akkumulatorenzellen in Hintereinanderschaltung (oben) und in Parallelschaltung (unten)

Sehr bald zeigte es sich nun aber, daß die Erfindung Faures doch noch nicht das Ideal darstellte. Die aktive Masse verhielt sich dabei auf dem tragenden metallischen Bleikörper immer mehr oder weniger wie ein Fremdkörper und zeigte eine Neigung, sich zu lockern und aus den Maschen herauszufallen. Zahlreiche Erfinder suchten das dadurch zu verhindern, daß sie die Masse derartig in Bleitaschen oder Bleikästchen einkapselten, daß sie einfach mechanisch festgehalten wurde und nicht hinauskonnte. Aber auch diese Lösung befriedigte nicht. Wohl blieb die Masse jetzt an ihrer Stelle, aber sie verlor auch dort den leitenden Zusammenhang mit dem Bleigerippe in solchem Maße, daß sie sich an den elektrochemischen Vorgängen nicht mehr beteiligte.

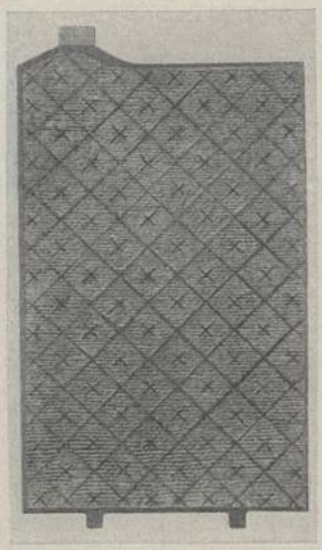
Die grundsätzliche Behebung dieses Übelstandes gelang erst im Jahre 1883 den Gebrüdern Tudor in Rosport. Ihr Verfahren stellt eine Vereinigung der beiden von Planté und von Faure angegebenen Methoden dar. Sie gingen (Bild 693), von einer



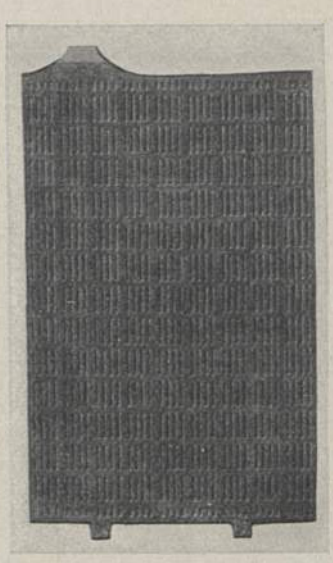
705. Batterie „Alte Jakobstraße" der Berliner Elektrizitätswerke
Drei Batterien von je 140 Elementen. Kapazität jeder Batterie 7776 Amperestunden bei einer dreistündigen Entladung
Accumulatoren-Fabrik A.-G., Berlin



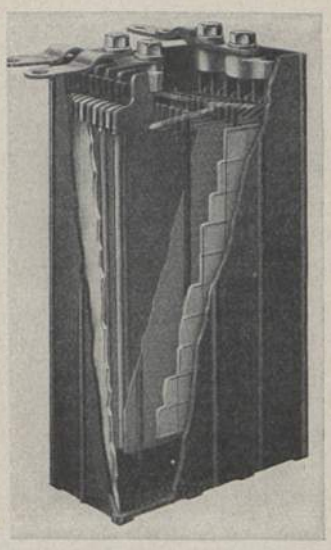
706. Bleigitter für die positive Ky-Platte eines ortsbeweglichen Akkumulators



707. Positive Ky-Gitterplatte



708. Negative Ky-Gitterplatte

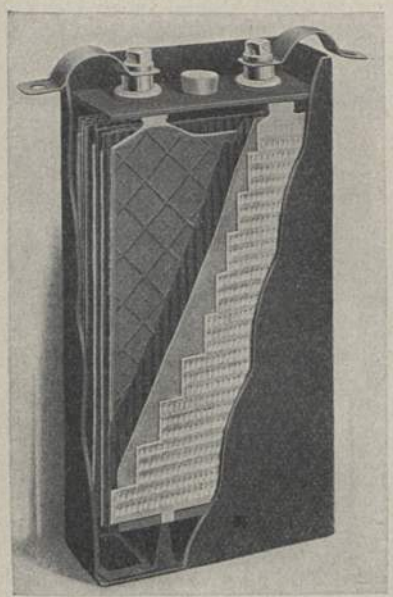


709. Ortsbewegliche Akkumulatorenzelle für Eisenbahntriebwagen

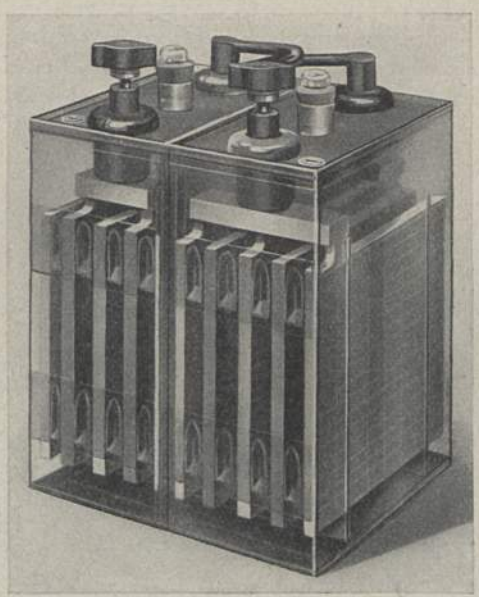
Erzeugnisse der Accumulatoren-Fabrik A.-G., Berlin

metallischen Bleiplatte aus, die eine ausgesprochene Großoberflächenplatte war und der Brushplatte ähnelte. Diese Plattengerippe wurden nun zunächst nach dem Planté-Verfahren formiert, d. h. mehrere Male geladen und wieder entladen, so daß sich auf ihren Oberflächen eine dünne Bleischwammschicht bildete, die nach der Plattentiefe zu ganz allmählich in festes Blei überging. Dann erst wurde eine geeignete Bleiverbindung als Paste in die so formierten Platten eingestrichen und nun in üblicher Weise geladen. Jetzt war durch die vorangegangene Formierung wirklich ein stetiger Übergang zwischen Masse und Bleiträger geschaffen, und Träger und Masse arbeiteten organisch zusammen. Trotz der Güte der Tudorschen Erfindung fand sie doch zunächst noch keine praktische Anwendung. Erst im Jahre 1887 nahm Adolf Müller ihre Verwertung in Deutschland in die Hand und gründete in Hagen in Westfalen eine Akkumulatorenfabrik, aus der später die Accumulatoren-Fabrik Aktiengesellschaft (AFA) hervorging, die heut eine Weltfirma ist und die meisten anderen deutschen Akkumulatorenfabriken in sich aufgenommen hat.

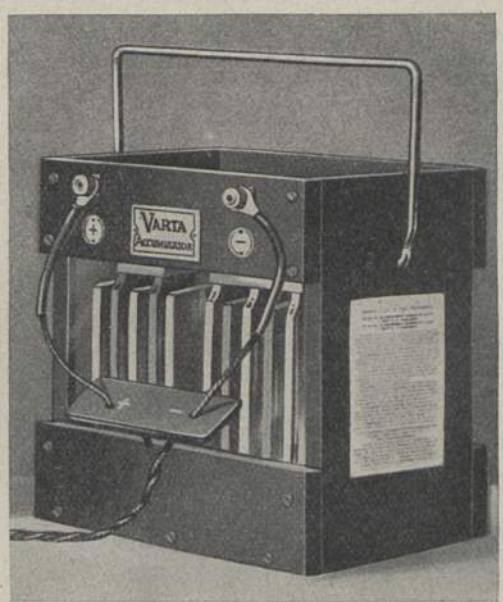
Auf elektrochemischem Gebiete bewegen sich die Erfindungen der achtziger und neunziger Jahre hauptsächlich in der Richtung, geeignetere Bleiverbindungen als die von Faure angegebene Mennige zu finden, und diesen Verbindungen noch Zusätze zu geben, durch die ein vorzeitiges Zusammensintern und Hartwerden der aktiven Masse verhindert werden sollte. Die Zahl der darauf bezüglichen Patente ist Legion, doch es verlohnt sich heut kaum noch, sie näher zu betrachten. Je mehr man sich aber mit dem Bleiakkumulator praktisch beschäftigte, um so mehr merkte man auch, daß seine Theorie keineswegs so einfach war, wie die ersten Erfinder sich das vorgestellt hatten. Vor allen Dingen zeigte es sich, daß man einen Bleiakkumulator, dessen positive Platten eine Schicht Bleisuperoxyd trugen, während die negativen aus Bleischwamm bestanden, keineswegs bis zur völligen Erschöpfung entladen durfte, wenn man nicht höchst unliebsame



710. Ortsbewegliche Zelle für Elektromobile



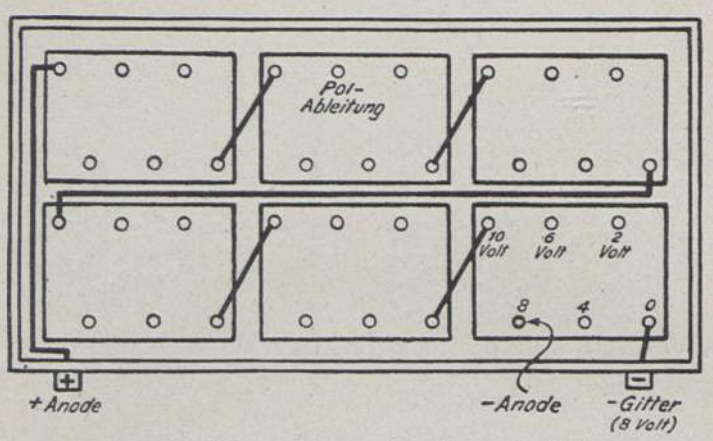
711. Zündbatterie in Zelluloidgefäß für Kraftwagen




712. Ortsbewegliche Varta-Heizbatterie für Radiozwecke

Erzeugnisse der Accumulatoren-Fabrik A.-G., Berlin

Überraschungen erleben wollte. Dabei spielte die Schwefelsäure eine etwas zweideutige Rolle. Während sie bei der heute allgemein vorgeschriebenen Behandlung des Akkumulators, d. h. solange die einzelne Zelle nicht unter einer Spannung von 1,75 Volt entladen wird, mit der aktiven Masse Bleivitriol bildet, das bei der Ladung wieder restlos in Bleisuperoxyd bzw. metallisches Blei übergeht, bildet sie bei stärkerer Entladung harte und nicht wieder rückwandelbare Schwefelbleiverbindungen, welche die Leistungsfähigkeit des Akkumulators schwer beeinträchtigen.

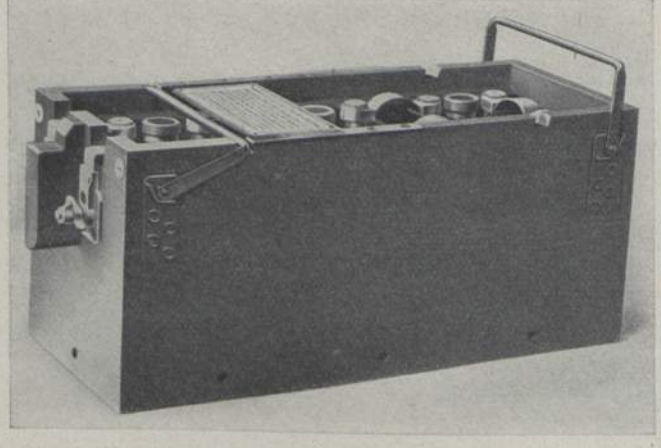



713. Schaltungsschema einer Anodenbatterie

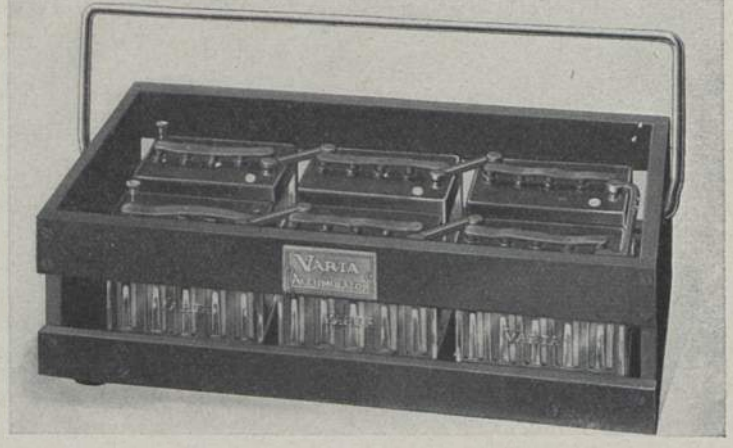
Es gilt also heut die Regel: Sobald die Spannung einer Akkumulatorenzelle auf 1,75 Volt gefallen ist, muß die Zelle sofort geladen werden, da sich die erwähnten schädlichen Bleiverbindungen auch bilden, wenn sie längere Zeit in diesem entladenen Zustande stehenbleibt. Die Ladung erfolgt mit Gleichstrom, wobei der positive Pol der Dynamo an den positiven Pol der Batterie gelegt wird. Die Stromstärke, mit der geladen wird, darf die von der Fabrik angegebene Ladestromstärke nicht übersteigen, da sonst mit einem Verbiegen der Platten und einer ernsten Beschädigung der Batterie zu rechnen ist. Diese Stromstärke ist so bemessen, daß die Ladung einer Batterie im allgemeinen in drei Stunden erledigt ist. Das Verhalten einer Akkumulatorenzelle während der Ladung veranschaulicht die Ladekurve (Bild 695). Auf der Wagerechten ist hier die Zeit, auf den Senkrechten sind die zu jedem Zeitpunkt herrschenden Spannungen aufgetragen. Fast unmittelbar nach dem Anschalten der Batterie an den Ladekreis steigt ihre Spannung auf 2,1 Volt. Während der nächsten Stunden wächst sie dann allmählich bis 2,4 Volt. Nun beginnt sie erheblich schneller zu steigen und erreicht in ziemlich kurzer Zeit 2,7 Volt. Zu diesem Zeitpunkt ist die Ladung beendet und die gesamte aktive Masse in der gewünschten Weise umgewandelt. Die weitere Stromzuführung über diesen Wert hinaus würde jetzt in der Hauptsache nur noch der Zersetzung des in der verdünnten Schwefelsäure enthaltenen Wassers in Wasserstoff- und Sauerstoffgas dienen und weiterhin die metallischen Bleiteile beider Plattenarten beschädigen.

Den Vorgang bei der Entladung zeigt die Entladekurve Bild 696. Die Spannung der frisch geladenen Batterie sinkt unmittelbar nach dem Einschalten auf 1,95 Volt und fällt dann ganz allmählich im Laufe der ersten zwei Stunden auf 1,9 Volt ab. Während der letzten Stunde geht der Spannungsabfall schneller vonstatten und erreicht schließlich den Wert, der zur Neuaufladung zwingt.

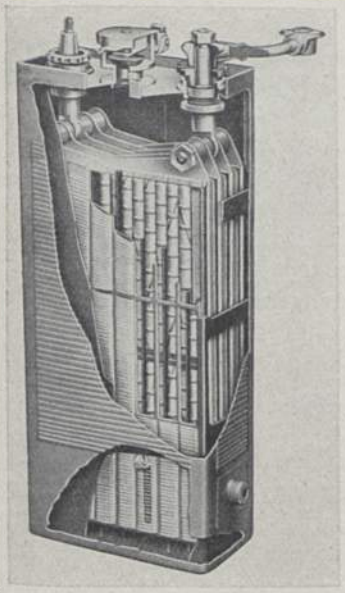
Bei der weiteren Betrachtung der Entwicklung müssen wir nun ortsfeste und ortsbewegliche Batterien betrachten. Blei ist ein recht schweres Metall, und alle Versuche, ein wesentlich leichteres, gleich gut geeignetes zu entdecken, und damit den Traum so vieler Erfinder vom leichten Akkumulator der Zukunft zu verwirklichen, sind bisher vergeblich gewesen. Aber andererseits ist Blei auch ein verhältnismäßig recht billiger Stoff, und bei ortsfesten Elementen, bei denen das Gewicht keine Rolle spielt, hat man den Akkumulator daher nach der Richtung der größten Haltbarkeit und Betriebszuverlässigkeit entwickelt. In welcher Weise das geschehen ist, mag die folgende Beschreibung des ortsfesten Akkumulators der AFA zeigen. Bei dieser Type sind die beiden Plattengruppen grundsätzlich verschieden. Die positiven Platten sind Großoberflächenplatten, deren Querschnitt und Ansicht die Bilder 698 und 701 zeigen. Es sind sogenannte durchsichtige Platten, d. h. sie enthalten keine zusammenhängende Mittelwand, sondern die Zwischenräume zwischen den einzelnen Bleirippen gehen offen von der einen zur anderen Seite der Platte hindurch. Dabei ist die Form der Rippen so gewählt, daß die Platte eine achtfache Oberflächenentwicklung hat, d. h. die wirksame Oberfläche ist achtmal so groß als die einfache Ansicht der Platte. Diese Platten werden in eisernen Formen aus einem Blei gegossen, das mehr als 99,9% chemisch reines Blei enthält. Sie werden danach nicht mit irgendeiner aktiven Masse bestrichen, sondern nach einem Verfahren formiert, das die AFA mit modernen elektrochemischen Mitteln aus dem alten Planté-Verfahren entwickelt hat. Die Formierung der Platten wird dabei in ungefähr ebenso vielen Tagen erreicht, wie das alte



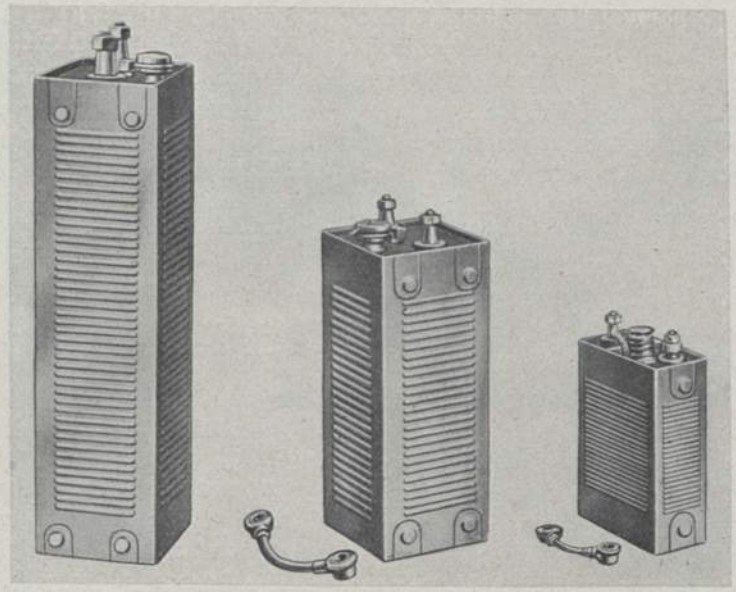
714. Starterbatterie für Kraftwagen
Accumulatoren-Fabrik A.-G., Berlin



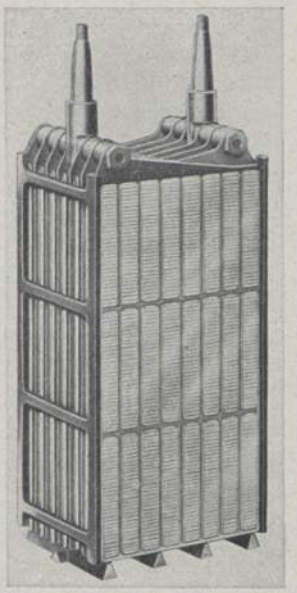

715. Varta-Anodenbatterie für Radiozwecke
Accumulatoren-Fabrik A.-G., Berlin



716. Edison-Akkumulator
Die Zelle und die erste negative Platte zum Teil weggebrochen, um den Aufbau zu zeigen



717. Einzelne geschlossene Edisonzellen
Erzeugnisse der Deutsche Edison-Akkumulatoren Company G. m. b. H., Berlin

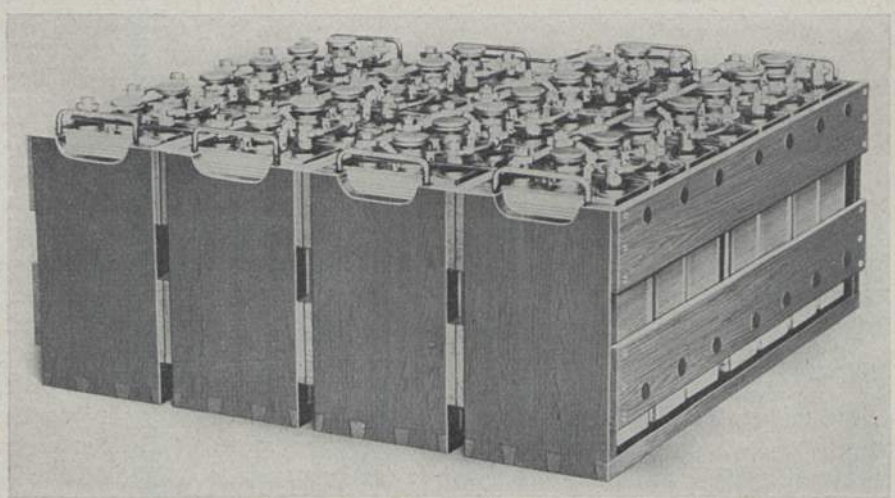


718. Plattenblock der Edisonzelle
fertig zum Einsetzen in das Gehäuse

Planté-Verfahren Monate beanspruchte. Sie liefert einen durch die ganze Spalttiefe hindurch gleichmäßig starken Bleisuperoxydbelag, der organisch mit dem metallischen Bleikörper der Platte verbunden ist. In den vorhergehenden Betrachtungen sahen wir, daß an der Oberfläche der positiven Platte während der Entladung Wasser gebildet wird und eine Verdünnung der Säure eintritt, während sich bei der Entladung der gegenteilige Prozeß abspielt. Infolge der durchgehenden Schlitze kann nun die Säure die Platte von allen Seiten her bestens bespülen, und die auftretenden Verschiedenheiten der Säuredichte können sich schnellstens ausgleichen.

Im Gegensatz zu der positiven Großoberflächenplatte ist die negative Platte (Bilder 700 und 703) eine Massekastenplatte. Da das Bleigestell der negativen Platten während des Ladens und Entladens nicht angegriffen wird, kann es an sich erheblich schwächer sein als dasjenige der positiven Platten. Es besteht aus zwei aufeinandergelegten und im weiteren Gange der Fabrikation durch Bleinieten fest miteinander verbundenen großfeldrigen Gittern aus Hartblei, die nach außen durch angeschmolzene perforierte Weißbleibleche verschlossen sind. Zwischen diesen beiden Plattenhälften liegt der aus metallischem Bleischwamm bestehende Massekuchen. Gerade die aktive Masse der negativen Platten zeigt die Neigung, im Laufe längeren Betriebes zusammenzusintern und hart zu werden, wodurch die Speicherfähigkeit der Zelle, ihre elektrische Kapazität, sinkt. Deshalb werden der negativen Masse besondere Spreizstoffe beigemengt, die das Sintern verhindern. In der Tat sind die negativen Platten in dieser Ausführung fast unverwüstlich. An manchen Stellen sind sie schon seit zwanzig Jahren im Betrieb und haben Tausende von Ladungen und Entladungen durchgemacht, ohne daß ihre Kapazität merklich nachgelassen hätte.

Die einzelne Akkumulatorenzelle wird nun aus einer größeren Anzahl positiver und negativer Platten in der Art zusammengestellt, wie das Schema in Bild 704 zeigt. Dabei ist die Zahl der negativen Platten stets um eins größer als diejenige der positiven, und die beiden äußersten Platten einer Zelle sind stets negativ. Beide Plattenarten enden oben in zwei kräftigen nach rechts und links auskragenden Haken oder Fahnen aus massivem Blei, mit denen sie freitragend aufgehängt werden, so daß der untere Rand der Platte sich noch wenigstens ein Zentimeter vom Boden des Elementengefäßes entfernt befindet. Das Akkumulatorengefäß besteht für kleinere Elemente aus Glas, Hartgummi oder Zelluloid. Für größere Zellen werden Holzkästen benutzt, die mit einem säurefesten Bleieinsatz ausgekleidet sind. Bei den erstgenannten Gefäßen können die Platten mit ihren Fahnen unmittelbar auf dem Gefäßrand hängen. Bei den Bleikästen müssen sie, um Kurzschluß zu vermeiden, auf besonderen Glasstützscheiben aufgehängt werden.



719. Edisonbatterie in offenen Tragen
Deutsche Edison-Akkumulatoren Company G. m. b. H., Berlin

Weiterhin sind die einzelnen Platten verschiedenen Vorzeichens sorgfältig gegen eine zufällige Berührung miteinander zu schützen. Dies geschieht durch dazwischengeschobene mit Holzstäbchen armierte Holzbrettchen (Bild 702), von der Größe der Platten. Diese Brettchen haben nur eine Stärke von einem halben bis zu einem Millimeter und sind, mit Schwefelsäure durchtränkt, für den Strom so durchlässig, daß sie kaum eine spürbare Erhöhung des Zellenwiderstandes hervorrufen. Sie verhindern nicht nur jeden Kurzschluß zwischen den Platten, sondern geben auch im Laufe des Betriebes ganz allmählich ihnen durch eine Imprägnierung einverleibte Stoffe ab, die dem Schrumpfen der negativen Masse entgegenwirken.

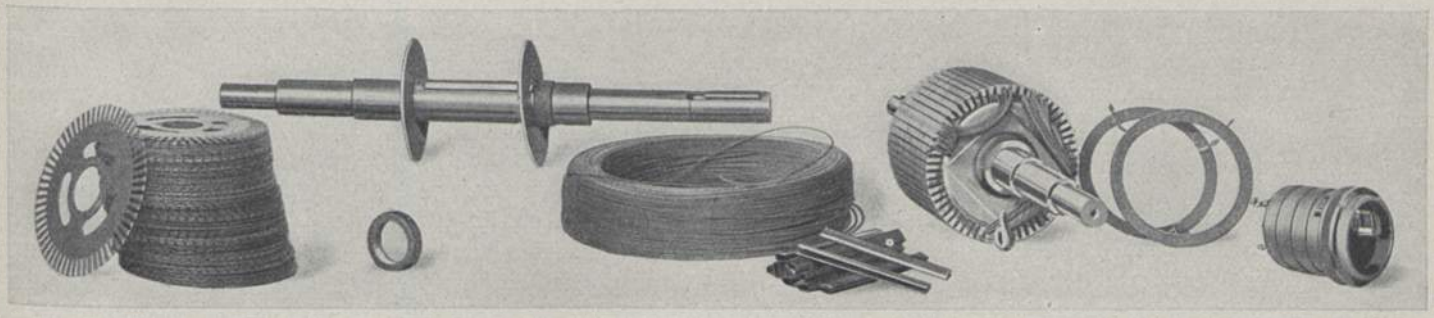
Da die einzelne Zelle während der Entladung die elektrische Energie mit einer Spannung von 1,95 bis 1,75 Volt abgibt, so muß man bei den in Gleichstromanlagen üblichen Spannungen stets eine größere Anzahl einzelner Zellen hintereinanderschalten, bei 110 Volt etwa 60 Zellen, um die gewünschte Netzspannung zu erreichen. Die Verbindung erfolgt dabei gewöhnlich in der Weise, daß man die positiven Fahnen der einen Zelle und die negativen Fahnen der nächsten an eine durchlaufende Bleileiste anschmilzt, wie es aus Bild 704 zu ersehen ist.

Die Batterien, die in Verbindung mit größeren Gleichstromzentralen arbeiten, besitzen gewöhnlich recht bedeutende Kapazitäten und auch dementsprechende Abmessungen. Die größten Zellentypen nehmen wohl pro Zelle ein Volumen von einem Kubikmeter ein. Das Beispiel einer solchen großen Batterie gibt Bild 705. Es zeigt die Batterieanlage „Alte Jakobstraße" der Berliner Elektrizitätswerke, welche aus drei Batterien von je 140 Elementen besteht. Jede dieser Batterien liefert bei dreistündiger Entladung 7776 Amperestunden. Der normale Entladungsstrom der einzelnen Batterie beträgt also fast 2600 Ampere. Die drei Batterien zusammen können während ihrer dreistündigen Entladung rund 6000 Kilowattstunden an das Netz abgeben. Im übrigen ist diese Batterie weder nach der Zahl ihrer Elemente noch nach ihrer Leistung in Amperestunden eine der größten. Die Stockholmer Elektrizitätswerke haben beispielsweise auf ihrer Tulestation eine Batterie von 270 Elementen, die 13 600 Amperestunden liefert, und eine zweite von der gleichen Elementenzahl mit einer Kapazität von 6900 Amperestunden. Die Wendelsteinbahn hat eine Batterie von 721 Elementen, die also eine mittlere Entladungsspannung von 1400 Volt besitzt. Selbstverständlich muß bei allen derartigen Batterien mit 100 und mehr Volt Spannung auf eine sorgfältige Isolation geachtet werden, und zwar um so mehr, als die bei der jedesmaligen Ladung auftretenden Schwefelsäurenebel die unangenehme Neigung besitzen, überall leitende Nebenschlüsse herzustellen. Die Aufstellung größerer ortsfester Batterien erfolgt daher in der Weise, daß zunächst einmal jedes einzelne Element auf Porzellanstücke gesetzt und dadurch gegen seine Unterlage isoliert wird, und daß schließlich auch noch die Holzgestelle, auf denen man die Batterie aufstellt, gegen den Fußboden isoliert werden. An der in Bild 705 gezeigten großen Batterie ist diese Art der Aufstellung und Isolation recht gut zu erkennen.

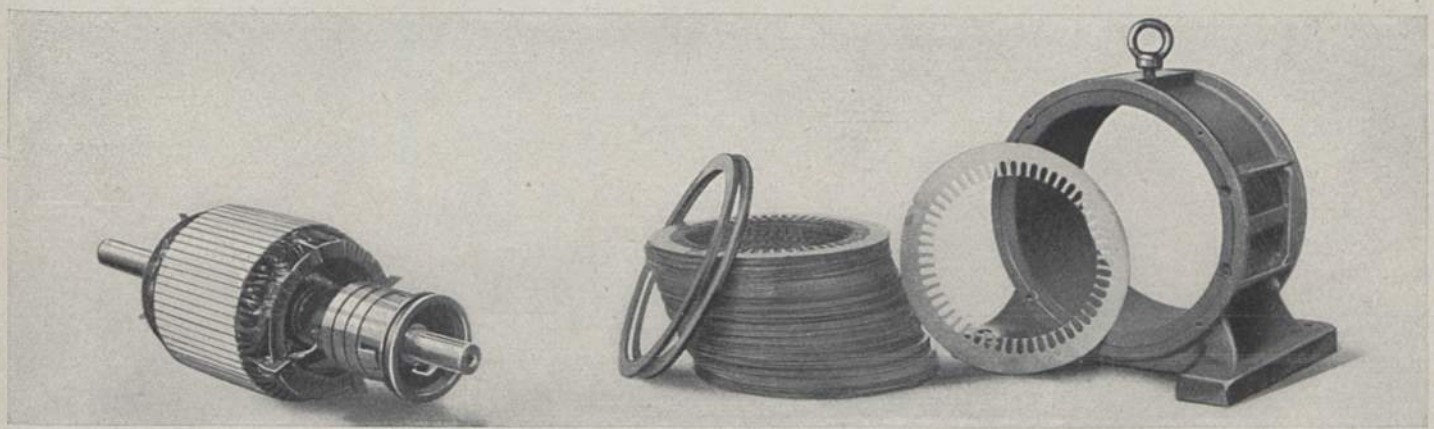
Die Verwendung der ortsfesten Batterien ist eine doppelte. Einmal sollen sie beim Betriebe der Elektrizitätswerke für eine längere Zeit von mehreren Stunden die Stromlieferung übernehmen. Entweder zu Zeiten sehr schwachen Betriebes, in denen es sich nicht lohnt, überhaupt die Maschinen laufen zu lassen, oder auch zu Zeiten des Hochbetriebes, wo dann die Batterien die Belastungsspitzen hergeben müssen, welche die Maschinen allein nicht zu leisten vermögen. Die andere Verwendung erfolgt als Pufferbatterie, um sehr plötzliche aber nur wenige Sekunden anhaltende Stromentnahmen durch die Batterie abzupuffern und die Maschinen zu entlasten. Während bei den erstgenannten Anwendungen Entladezeiten und Ladezeiten streng geschieden sind, ist das bei der Pufferbatterie kaum der Fall. In der einen Sekunde muß sie einen beträchtlichen Strom hergeben, in den nächsten Sekunden bekommt sie schon wieder Stromüberschuß von der Maschine und wird frisch aufgeladen. Für Gleichstrombetriebe mit sprunghaft wechselnder Belastung wie Bahnen und manche Bergwerksmaschinen bedeutet die Pufferbatterie ein sehr wichtiges Hilfsmittel.

Sobald es sich um ortsbewegliche Batterien handelt, spielt das Gewicht eine recht bedeutende Rolle und man kann die Zellen nicht mehr ausschließlich unter dem Gesichtspunkte größter Haltbarkeit konstruieren, sondern muß eine möglichst hohe Kapazität in Amperestunden bzw. Wattstunden pro Kilogramm Batteriegewicht zu erreichen versuchen. Bei solchen Batterien verwendet man deshalb auch für den positiven Teil Masseplatten. Es kommt eine Gitterplatte zur Verwendung (Bilder 706 und 707), in deren Maschen die aktive Masse in Gestalt von Bleioxyden eingestrichen wird. Für Zellen, die mit den üblichen Stromstärken und Zeiten entladen werden, wird das Gitter ziemlich engmaschig gewählt. Für Batterien, die nur sehr schwach beansprucht werden, etwa für den Betrieb elektrischer Uhren bestimmt sind, und deren Entladung sich über Monate erstreckt, kann das Gitter erheblich weitmaschiger gewählt werden. Als negative Platte wird vielfach die Kastenplatte der ortsfesten Elemente benutzt, bisweilen aber auch eine der positiven ähnliche Gitterplatte (Bild 708). Ein aus solchen Platten zusammengestelltes ortsbewegliches Element für elektrische Triebwagen zeigt Bild 709, ein anderes für Elektromobile Bild 710. Auch der moderne Benzinkraftwagen führt ja gegenwärtig eine vollkommene elektrische Anlage mit sich, bestehend aus einer mit dem Motor gekuppelten Dynamo und Batterien, die einem doppelten Zweck dienen. Sie speisen einmal die gesamte Wagenbeleuchtung und die elektrischen Hupen. Außerdem aber arbeiten sie beim Anlassen des Benzinmotors auf die Dynamo, die dann als Elektromotor läuft und den Benzinmotor anwirft oder startet. Schließlich dienen diese Batterien bisweilen auch noch als Zündbatterien, obwohl der Zündungsstrom für den Automobilmotor heut meistens von einer kleinen magnetelektrischen Maschine erzeugt wird. Die Bilder 711 und 714 geben Beispiele solcher Automobilbatterien.

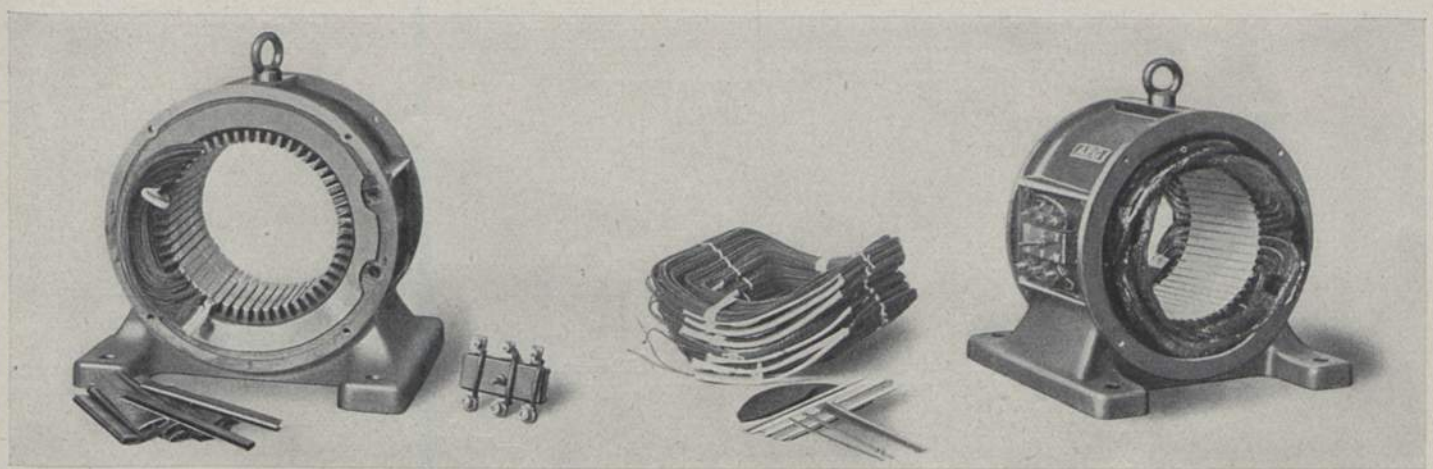
Die entschiedene Richtung vom Gleichstrom zum Wechselstrom, welche die Elektrotechnik während der letzten zwanzig Jahre genommen hat, ist der Neuaufstellung großer ortsfester Batterien in Verbindung mit Gleichstromkraftwerken nicht eben förderlich gewesen. Auch die elektrisch betriebenen Kraftfahrzeuge werden durch die leichteren und leistungsfähigeren Benzinwagen von Jahr zu Jahr immer mehr verdrängt. Dafür haben sich aber den ortsbeweglichen Akkumulatorenbatterien neue Anwendungsgebiete erschlossen, die in ihrer Gesamtheit den ebengenannten Ausfall vollkommen wettmachen dürften. Der transportablen Akkumulatorenanlagen in Hunderttausenden von Benzinkraftfahrzeugen wurde bereits Erwähnung getan. Dazu kommen die gleichen Anlagen in Motorbooten und Flugzeugen. Weiterhin gehen die Postverwaltungen aller Länder immer mehr dazu über, für den Betrieb der Telephon- und Telegraphenlinien, an Stelle galvanischer Elemente, Akkumulatoren zu verwenden. Schließlich aber muß als jüngstes und aussichtsreichstes Arbeitsgebiet für Akkumulatoren der Rundfunk genannt werden. Wie an so mancher anderen Stelle standen auch hier zunächst Akkumulatoren und galvanische



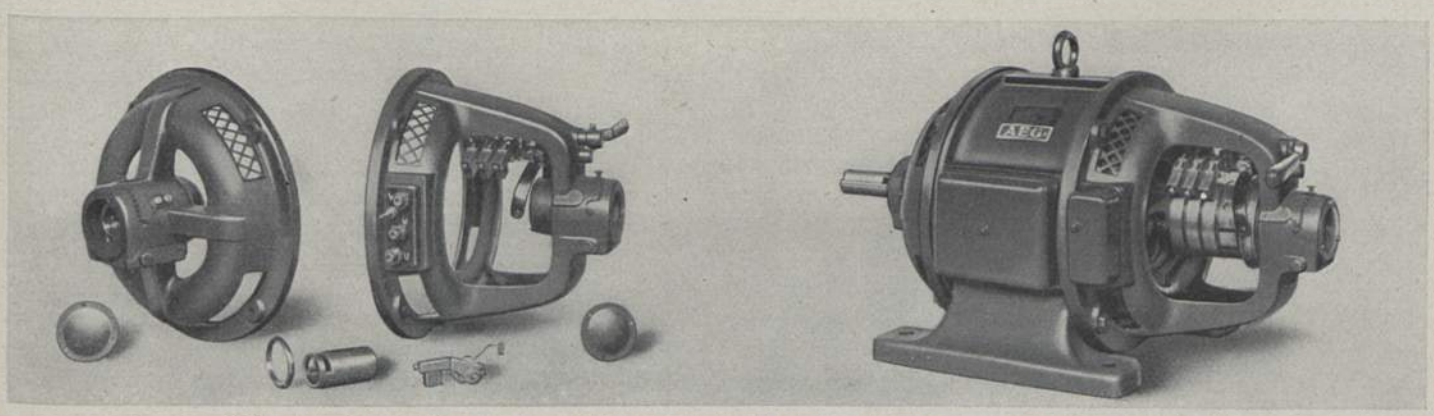
1. Material für den Aufbau des Eisenkörpers eines Ankers: Gestanzte Ankerblechscheiben, Motorwelle mit Schlußscheiben und Schrumpfringen, Windungsdraht und Mikanit-Formstücke für die Isolierung der Nut.n. Fertiger Eisenkörper des Ankers. Mit dem Aufbringen der Spulen ist begonnen. Da der Anker halb geschlossene Nuten besitzt, müssen die Windungen auf dem Ankerkörper selbst hergestellt werden. Ankerkappen und die Schleifringe mit automatischem Kurzschließer



2. Fertiger Anker. Material zum Aufbau des eisernen Teiles eines Stators: Gestanzte Statorbleche und Schlußscheiben, das gußeiserne, bearbeitete Gehäuse



3. Eisenkörper des Stators, mit dem Einbau der Spulen ist begonnen. Mikanit-Formstücke, Klemmenbrett und vorbereitete Spulen. (Man vergleiche schematische Spulendarstellung Bild 725.) Der fertige Stator

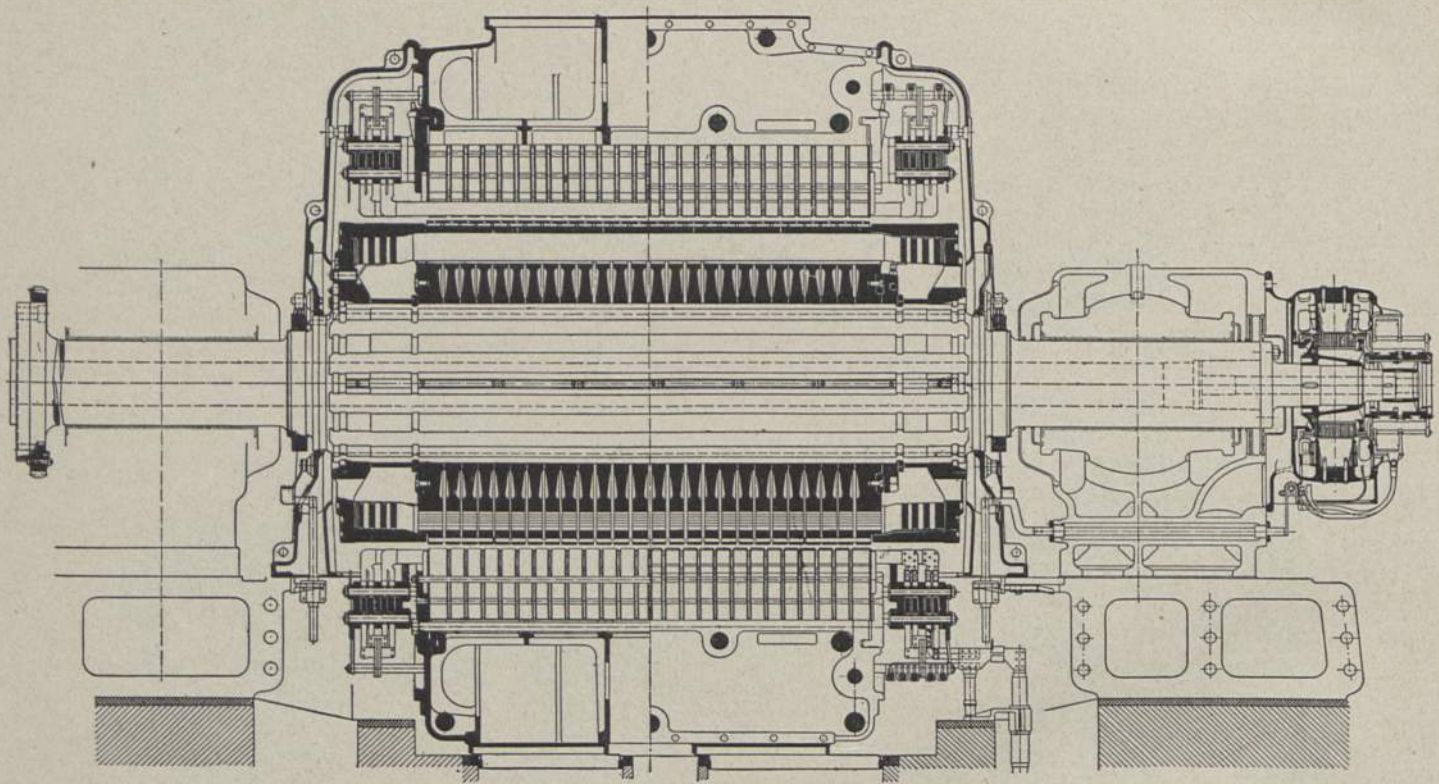


4. Lagerschilde, Lagerschalen, Schmierringe, Lagerverschlüsse und Bürstenhalter. Der fertige Drehstrom-Induktionsmotor

## 720. Werdegang eines Drehstrom-Induktionsmotors

Bauart der AEG, Berlin

Elemente miteinander im Wettbewerb. Die Anodenspannung der Empfangsapparate in Höhe von 60 bis 200 Volt wurde ausschließlich von Anodenbatterien geliefert, die aus 35 bis 70 winzigen galvanischen Trockenelementen zusammengesetzt waren. Für den Betrieb der modernen Lautsprecherröhren reichen diese Batterien aber nicht mehr aus, und der Betrieb mit ihnen stellt sich ganz unverhältnismäßig teuer. Hier gehört die Zukunft ganz zweifellos den Akkumulatorenbatterien, die auch als Anodenbatterien bereits in vollkommener Ausführung und in jeder gewünschten Spannung auf den Markt gebracht werden. Die Bilder 712 und 715 zeigen solche Rundfunkbatterien für die Heizung der Röhren und für die Lieferung der Anodenströme. Das Absatzgebiet, welches sich hier eröffnet, läßt sich ungefähr übersehen, wenn man schätzungsweise die Zahl der Rundfunkteilnehmer der ganzen Erde mit 25 Millionen annimmt.



721. Längsschnitt durch einen Siemens-Schuckert-Drehstrom-Generator von 60 000 Kilo-Volt-Ampere für das Kraftwerk Goldenberg

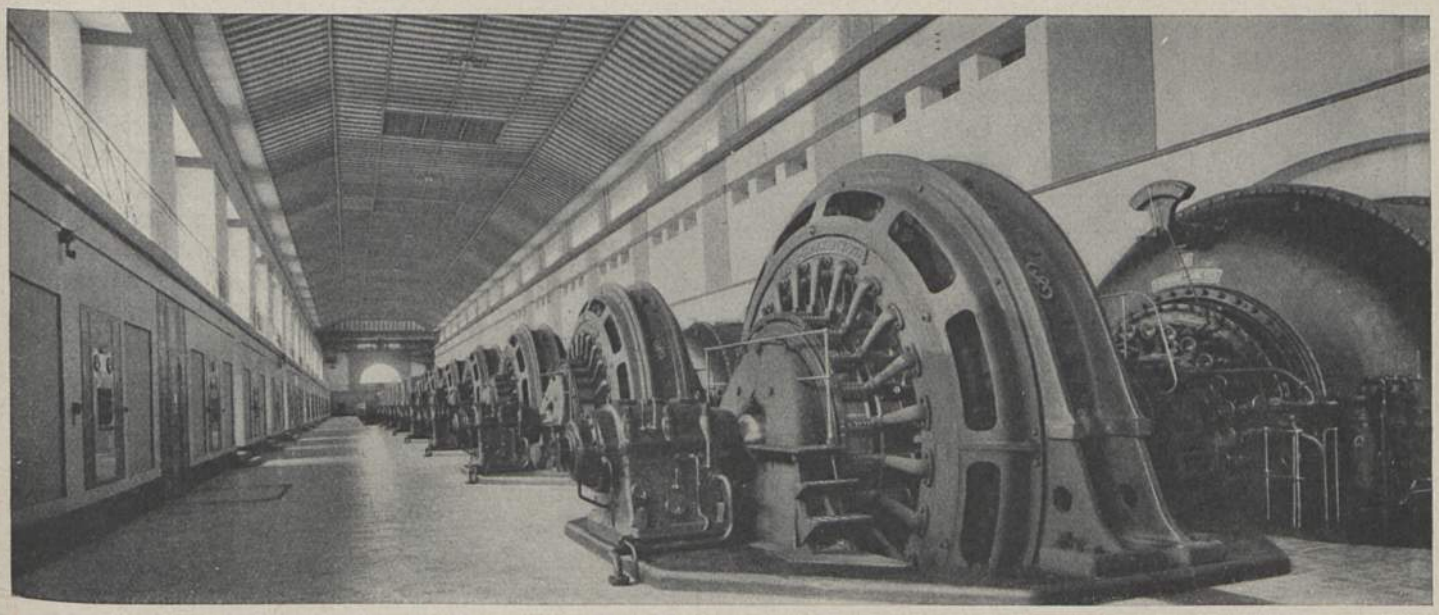
Seitdem die Technik sich mit der Frage der Akkumulatoren befaßte, sind wieder und immer wieder Versuche unternommen worden, das schwere Blei durch etwas Leichteres und zum mindesten ebenso Leistungsfähiges zu ersetzen. Es gibt kaum eine Kombination, die dabei nicht versucht worden wäre. In den neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts machte der Waddel-Enz-Akkumulator von sich reden. Es war eine Kombination von Kupfer- und Zinkelektroden in einem alkalischen Elektrolyten, die sogar vorübergehend für den Betrieb einer Straßenbahn in Verwendung war, aber sich gegen den reinen Bleiakkumulator doch nicht halten konnte. Um das Jahr 1910 erregte der Ziegenberg-Akkumulator Aufsehen, bei dem die eine Bleiplatte durch eine Zinkplatte ersetzt war. Leider zeigte es sich aber im Betriebe, daß dieser Akkumulator kein Sekundärelement im vollen Sinne des Wortes war. Zwar gab er mit frischen Zinkplatten ausgerüstet eine überraschend große Leistung her, aber die entladene Batterie ließ sich nicht durch einfache Ladung wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückversetzen, und so verschwand denn auch diese Erfindung nach kurzer Zeit.

Auch reine Kupferakkumulatoren mit zwei Kupferelektroden wurden namentlich für den Betrieb von Handlampen auf den Markt gebracht, mußten aber ebenfalls den Bleiakkumulatoren wieder Platz machen.

Nur eine einzige wirklich ernst zu nehmende Konkurrenz ist den Bleiakkumulatoren entstanden, und diese stammt von keinem geringeren als Edison her. Die Edisonzelle ist ein alkalischer Eisen-Nickel-Akkumulator. Mit dem älteren Bleiakkumulator hat sie die Eigenschaft gemein, wirklich eine Sekundärzelle zu sein, in der die elektrochemischen Vorgänge bei der Ladung und Entladung genau umgekehrt verlaufen und der frühere Zustand durch die Ladung vollkommen wiederhergestellt wird. Darüber hinaus aber unterscheidet sie sich fast in allem vom Bleiakkumulator.

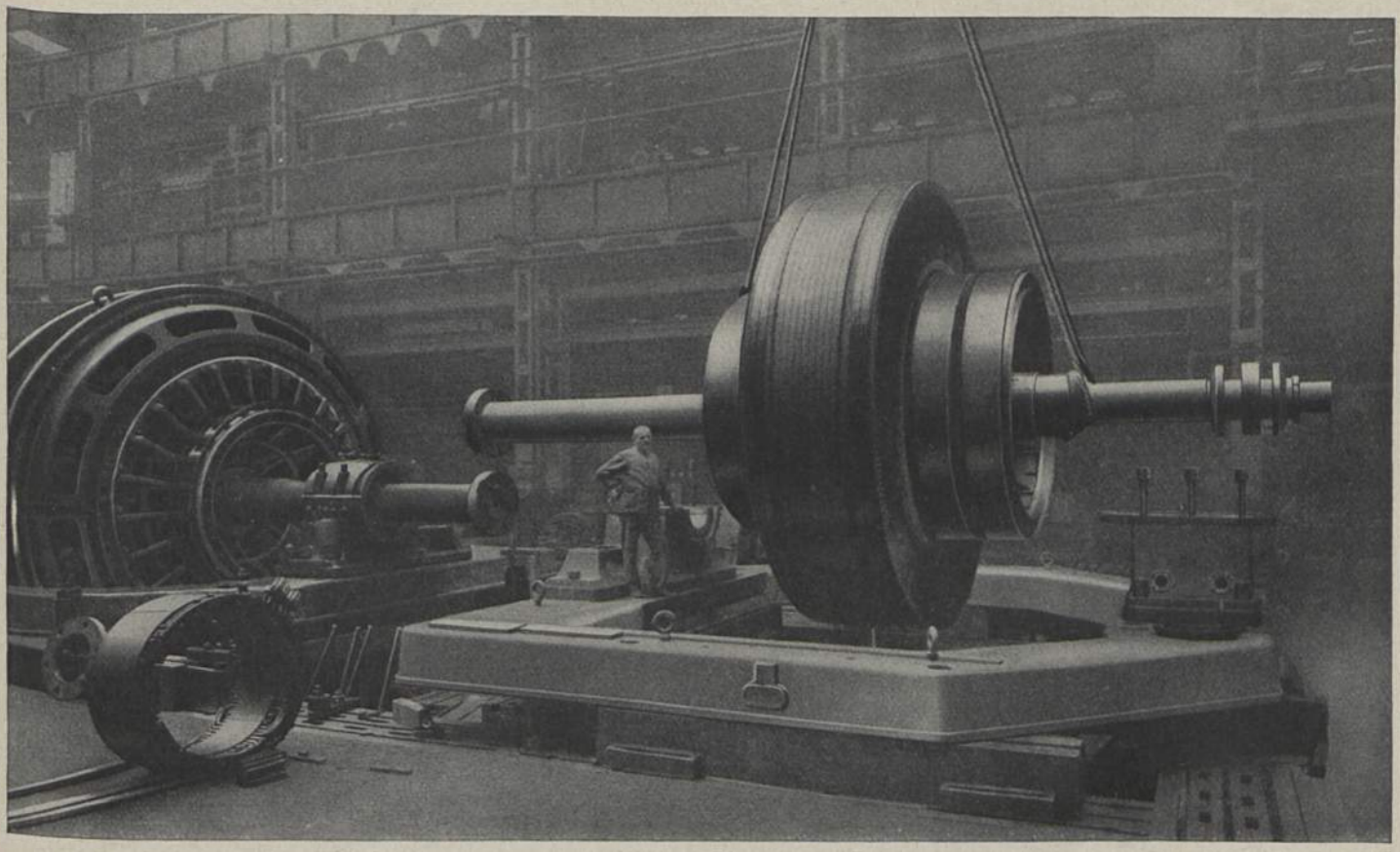
Die Flüssigkeit der Edisonzelle ist keine Säure, sondern eine starke Ätzkalilauge, also alkalischer Natur. Da diese Lauge die Neigung hat, aus der Luft Kohlensäure aufzunehmen und sich dabei in eine Lösung von kohlensaurem Kali zu verwandeln, muß die Zelle hermetisch gegen die Außenluft abgeschlossen sein. Da aber auch hier bei der Ladung Gas entwickelt wird, muß ferner ein Rückschlagventil vorhanden sein, das zwar dem inneren Überdruck ein Entweichen ins Freie gestattet, aber ein Hineintreten der Außenluft verhütet.

Die Schwefelsäure des Bleiakkumulators beteiligt sich, wie zu Beginn dieses Abschnittes ausgeführt wurde, ziemlich lebhaft an den chemischen Vorgängen in der Zelle. Dagegen nahm man früher an, daß ein alkalischer Elektrolyt lediglich als Stromleiter und allenfalls noch für den Transport des Sauerstoffes von der einen zur anderen Platte wirksam sei. Diese Ansicht läßt sich heut nicht mehr vollkommen aufrechterhalten. Es trifft aber zu, daß die Kalilauge sich viel weniger an den chemischen Vorgängen beteiligt als die Schwefelsäure.



722. Innenansicht des Maschinenhauses Töging am Inn
mit den größten deutschen Gleichstrom-Dynamomaschinen von je 8000 Pferdestärken. Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

Die aktive Masse der negativen Platte besteht aus feinen Flocken metallischen Eisens. Diese Masse ist mit hydraulischem Druck in Taschen aus feinem perforierten Eisenblech eingepreßt. Sie entspricht dem metallischen Bleischwamm des Bleiakkumulators. Die aktive Masse der positiven Platte ist Nickelhydrat oder Nickelhydroxyd. Ein Molekül dieser Verbindung enthält zwei Atome Nickel und sechs Hydroxyd-Radikale, deren jedes aus einem Atom Sauerstoff und einem Atom Wasserstoff zusammengesetzt ist. Das Nickelhydroxyd $Ni_2(OH)_6$ entspricht dem Bleisuperoxyd des Bleiakkumulators. Im Interesse einer besseren Stromleitung ist es ungefähr zu gleichen Teilen mit metallischen Nickelflocken gemischt und in röhrenförmige Taschen aus perforiertem, vernickeltem Eisenblech eingepreßt. Der Aufbau und die Zusammensetzung der Platten gehen aus Bild 716 hervor, die eine Edisonzelle in aufgebrochenem Zustande zeigt. Es ist hier



723. Einer der Trommelanker für das Kraftwerk Töging
in der Halle des Dynamowerks der Siemens-Schuckertwerke

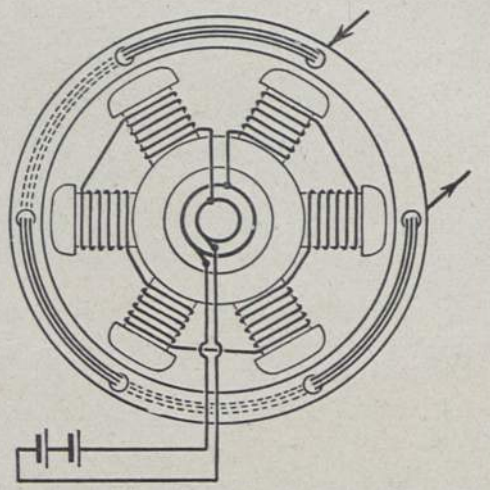
zu erkennen, wie die einzelnen die aktive Masse enthaltenden Metalltaschen in die Plattengitter eingesetzt und eingepreßt sind. Die beiden Gruppen der positiven und negativen Platten sind dann jede für sich schon innerhalb des Zellenkastens zusammengeschraubt und in der auch bei Bleiakkumulatoren üblichen Weise zusammengeschoben, wobei eine Berührung verschiedennamiger Platten durch zwischengeschobene Hartgummistücke verhindert wird (Bild 718). Der ganze Block ist dann weiterhin von Hartgummipaßstücken umgeben, die es gestatten, ihn in das aus Stahl oder vernickeltem Stahl bestehende Batteriegefäß einzusetzen, ohne daß irgendwo eine leitende Berührung zustande kommen könnte. Geschlossene Zellen mit aufgeschweißten Zellendeckeln zeigt Bild 717.

Die chemischen Vorgänge bei der Entladung der Edisonzelle gehen aus dem nachfolgenden Schema hervor.

$$Fe + Ni_2(OH)_6 =$$
$$Fe(OH)_2 + 2\,Ni(OH)_2$$

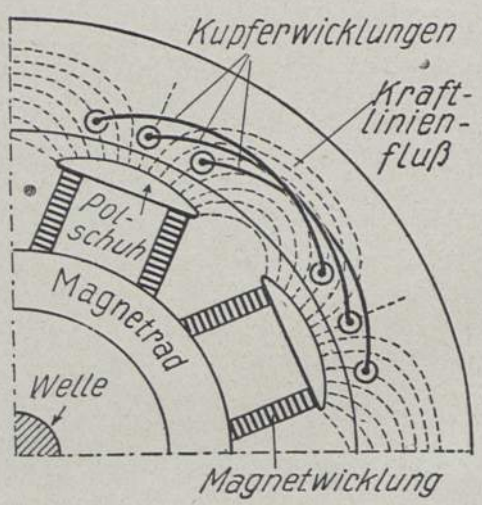
Es wandern dabei zwei Hydroxydradikale aus dem Nickelhydrat aus, gehen zum Eisen hinüber und bilden mit diesem Eisenhydrat, das in einem Molekül ein Eisenatom und zwei Hydroxydradikale enthält. Bei der Ladung kehrt sich dieser Vorgang wieder vollständig um. Im Gegensatz zum Bleiakkumulator gibt hier die jeweilige Dichtigkeit der Lauge keinen Aufschluß über den jeweiligen Zustand der Ladung oder Entladung, da sie wie gesagt nur wenig an den elektrochemischen Vorgängen teilnimmt.

Die elektromotorische Kraft einer Eisennickelzelle beträgt nur 1,36 Volt. Die wirkliche Entladespannung ist mit 1,2 Volt jedoch noch erheblich niedriger, da der Edisonakkumulator einen ziemlich hohen inneren Widerstand besitzt. Die geringere Spannung ist zweifellos ein Nachteil der Edisonzelle gegenüber der Bleizelle mit einer mittleren Entladespannung von 1,9 Volt. Die Haupteigenschaften dieser beiden Akkumulatorarten lassen sich wohl am besten vergleichen, wenn man ihren Raumbedarf, ihr Gewicht und ihren Preis auf die speicherbare Kilowattstunde bezogen, nebeneinander stellt. Für die Bleizelle muß dabei naturgemäß die beste ortsbewegliche Type mit Masseplatten gewählt werden. Der Vergleich zeigt, daß der Raumbedarf für die Kilowattstunde bei der Bleizelle 12,9, bei der Edisonzelle 16,5 Liter beträgt. Diese Werte gelten für die reinen Ausmaße der Zellen. Tatsächlich stellt sich das Verhältnis für den Edisonakkumulator noch etwas ungünstiger, da die Stahlkästen der einzelnen Zellen durch größere Zwischenräume isoliert werden müssen als die Hartgummi- oder Zelluloidgefäße der Bleibatterien. Man kann daher rechnen, daß eine Edisonbatterie rund 50% mehr Raum beansprucht als eine Bleibatterie. Im Gewicht sind beide Batterien fast gleichwertig. Für ein Kilogramm Batteriegewicht liefert die transportable Bleizelle 30, die Edisonzelle 29,5 Wattstunden. Um ein geringes ist also auch hier die Bleizelle überlegen und etwas leichter als die Edisonzelle. Was schließlich die Preise angeht, so bezahlt man eine Speicherfähigkeit von einer Kilowattstunde im Bleiakkumulator mit 103 M., im Edisonakkumulator mit 315 M. Eine Kritik der hier gegebenen Zahlen fällt für den Edisonakkumulator nicht gerade sehr vorteilhaft aus. Ebenso schwer wie der Bleiakkumulator, anderthalbmal so umfangreich und dreimal so teuer.



724. Schaltungsschema eines sechspoligen Drehstrom-Generators

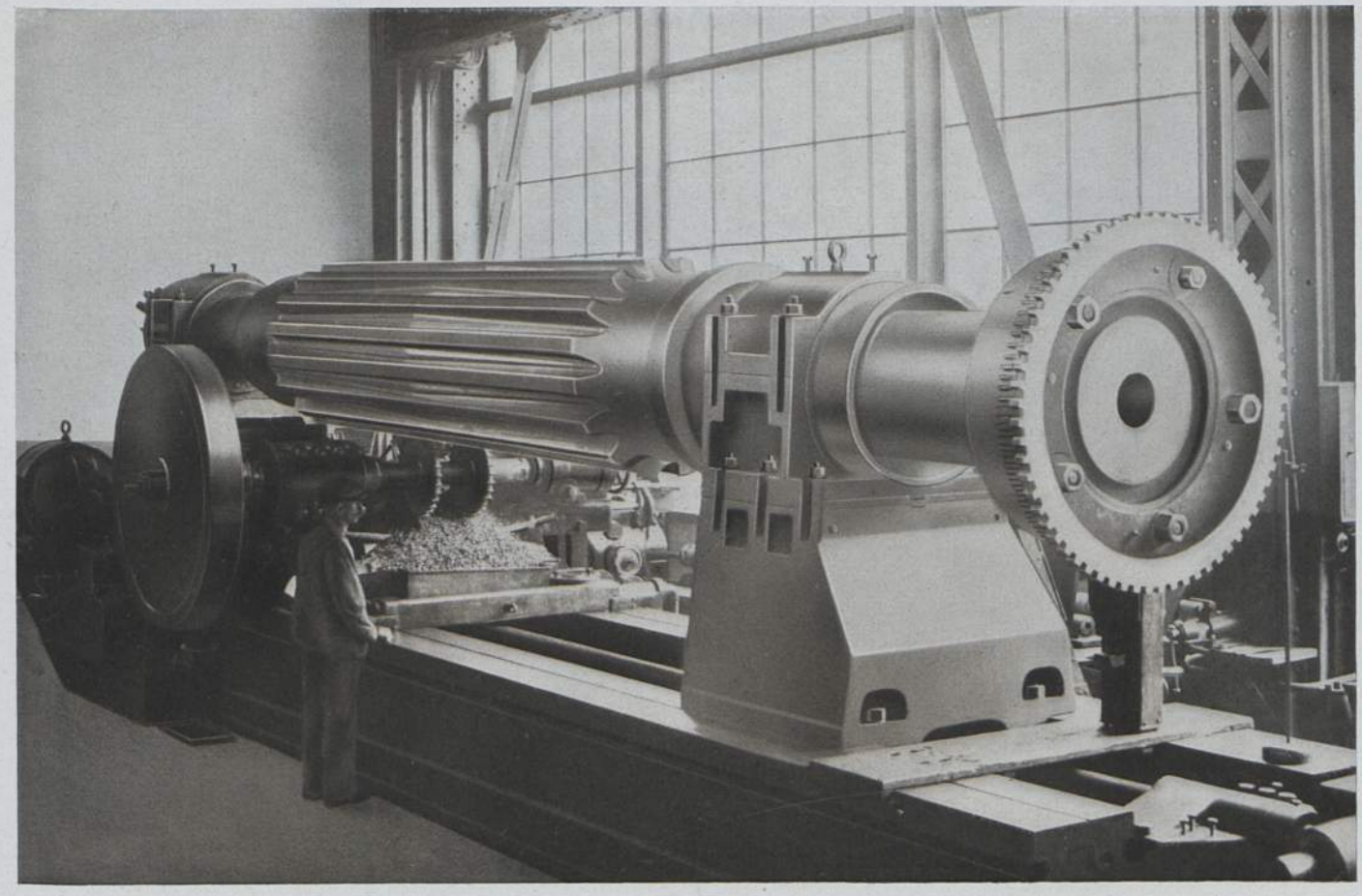
Das rotierende Polrad wird aus einer besonderen Gleichstromquelle erregt und induziert in den Wicklungen des Stators Drehstrom



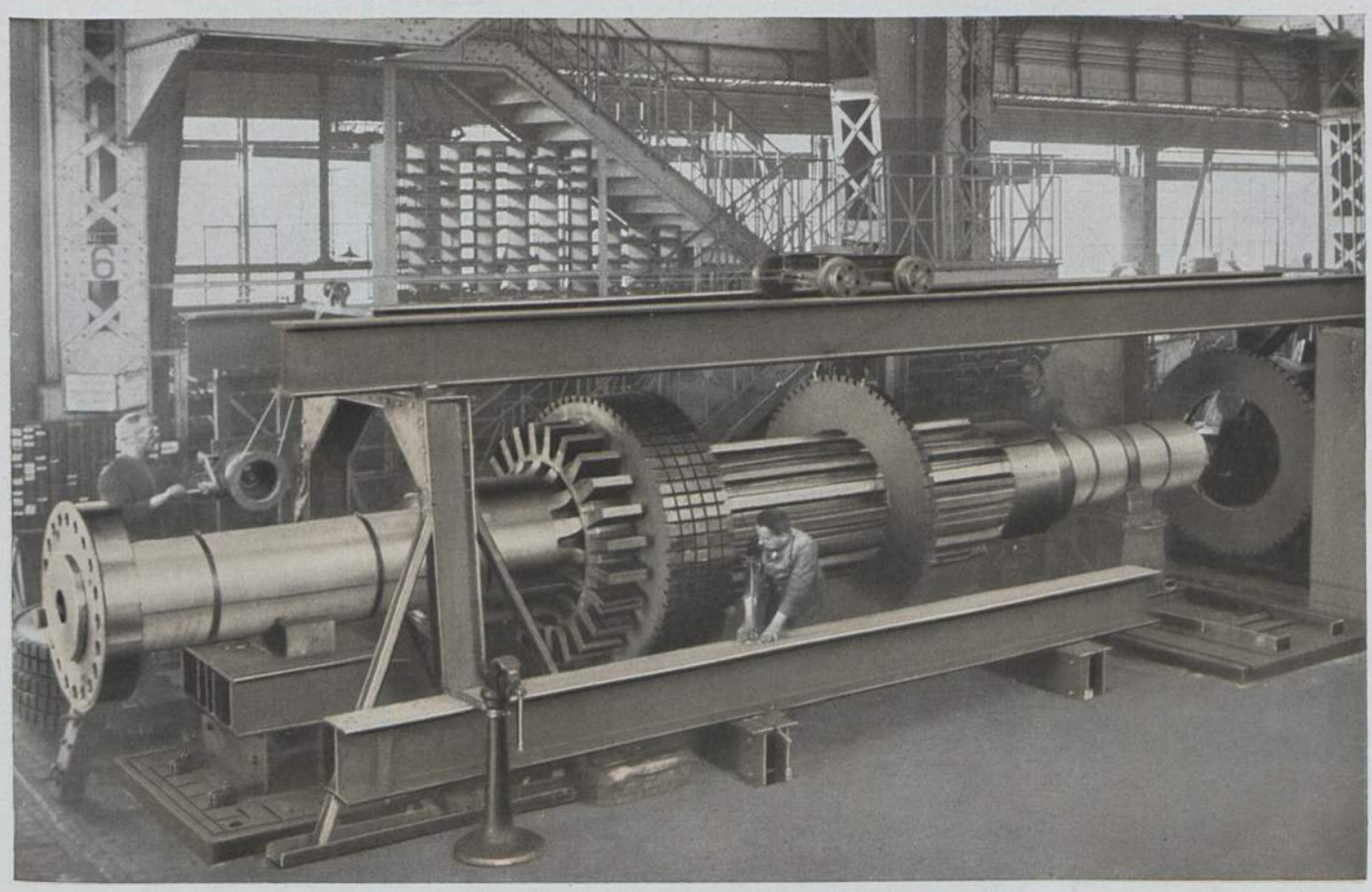

725. Verlauf des Kraftflusses zwischen Polrad und Stator und Einwirkung des Flusses auf die Dreilochwicklung des Stators

Um gleich alle ungünstigen Eigenschaften vorwegzunehmen, mag noch der Wirkungsgrad betrachtet werden. Beim Bleiakkumulator herrscht eine mittlere Ladespannung von 2,4 Volt und eine mittlere Entladespannung von 1,9 Volt, und man kann damit rechnen, daß ein in gutem Zustande befindlicher Bleiakkumulator etwa 77% der in ihn hineingegebenen elektrischen Energie bei der Entladung wieder nutzbar abgibt. Beim Edisonakkumulator ist das Verhältnis zwischen Lade- und Entladespannung ungünstiger. Einer mittleren Entladespannung von 1,1 Volt steht eine mittlere Ladespannung von 1,7 Volt gegenüber, und man erhält nur etwa 60% der eingeladenen Energie nutzbringend zurück.

Die Frage taucht auf, wie sich der Edisonakkumulator trotz dieser wenig günstigen Werte neben dem Bleiakkumulator überhaupt halten konnte. Die Antwort ist einfach gegeben. Der Edisonakkumulator ist von einer erfreulich großen Unempfindlichkeit gegenüber schlechter Behandlung. Man kann ihn vollkommen entladen, so daß seine Spannung bis auf Null hinabsinkt, kann ihn nach einer derartigen Entladung beliebig lange stehen lassen und bringt ihn durch eine kräftige Neuladung ohne weiteres wieder in seinen ursprünglichen betriebsfähigen Zustand, ohne daß seine Platten oder seine Kapazität irgendwelchen Schaden gelitten hätten. Gerade dadurch aber ist er dem Bleiakkumulator bedeutend überlegen, den man durch eine einzige zu starke Entladung erheblich schädigen kann und durch eine Behandlung der hier geschilderten Art vollkommen ruinieren würde. Es sind zahlreiche Fälle denkbar, wo die Verhältnisse gebieterisch eine weitere Beanspruchung des Akkumulators verlangen, als ursprünglich vorgesehen war. Man denke z. B. an einen elektrischen Kraftwagen, der noch mehrere Kilometer von seinem Ziel entfernt ist, während etwa die Nacht hereinbricht. Durch irgendwelche Umstände, wie aufgeweichte oder verschneite Wege, fand eine außergewöhnlich starke Stromentnahme aus der Batterie statt. Die Spannung der Bleibatterie ist auf 1,75 Volt pro Zelle gefallen. Der Fahrer, der jetzt auch nur noch ein Kilometer weiterfahren wollte, würde die Batterie dauernd schwer schädigen. Es bleibt ihm nichts anderes übrig, als bei Nacht und Nebel Vorspann zu holen, den Wagen abschleppen und die Batterie noch sofort in der Nacht laden zu lassen. Mit der Edisonbatterie kann er



1. Welle des Läufers auf der Fräsbank



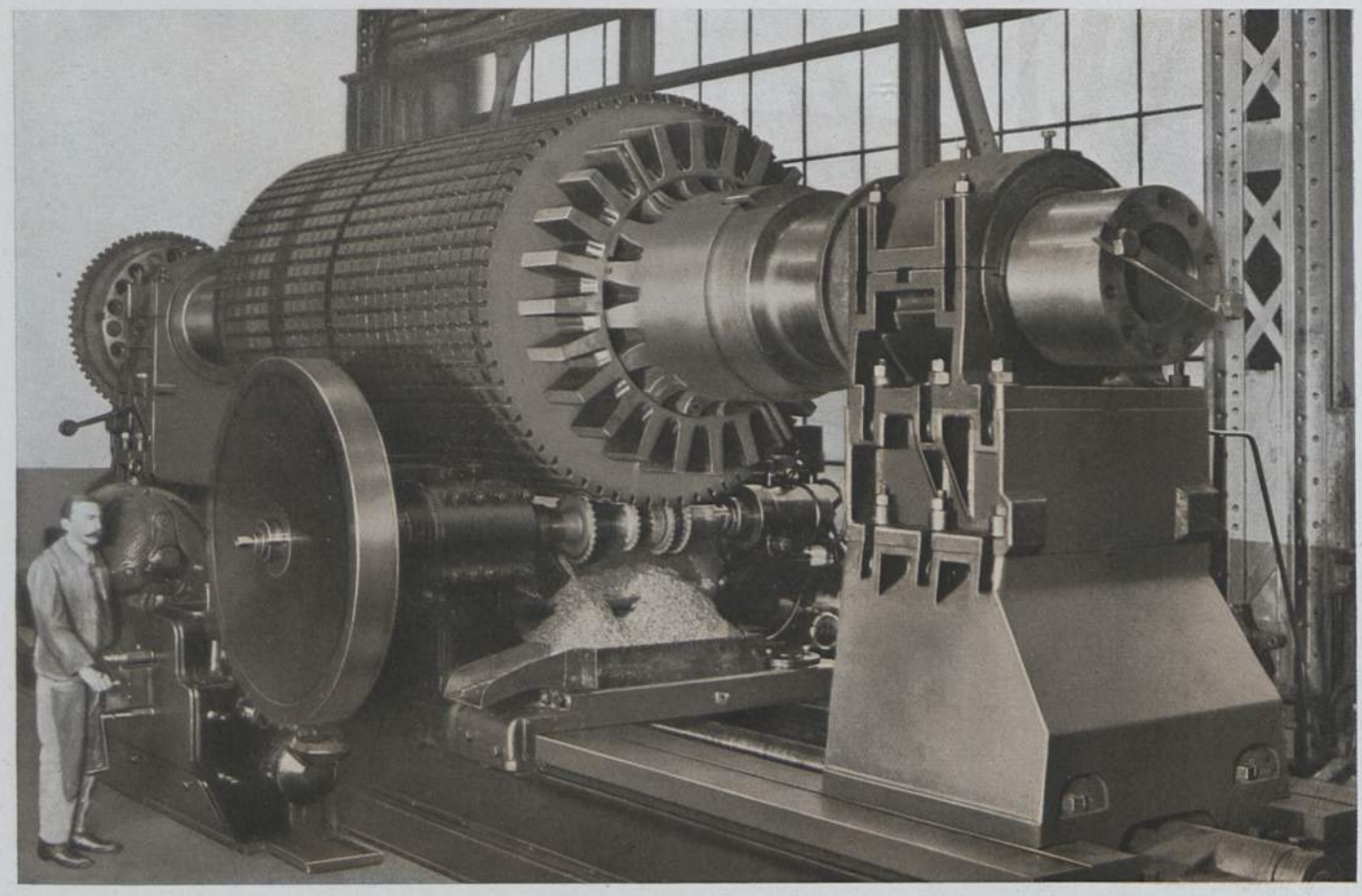
2. Aufschrumpfen der Stahlringe auf die gefräste Welle

**Wie der Rotor eines großen Drehstromgenerators entsteht**

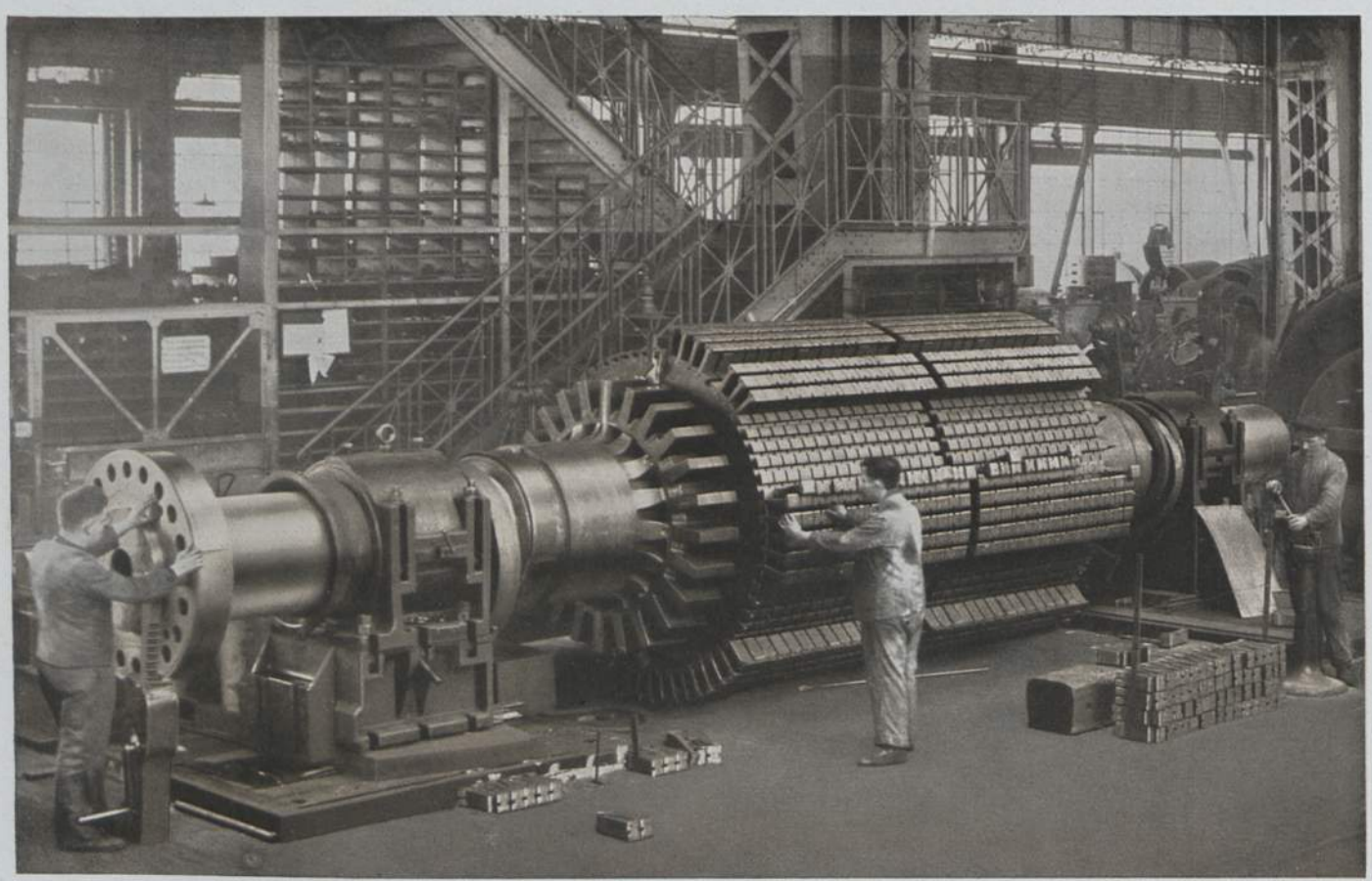
Dynamowerk der AEG, Berlin



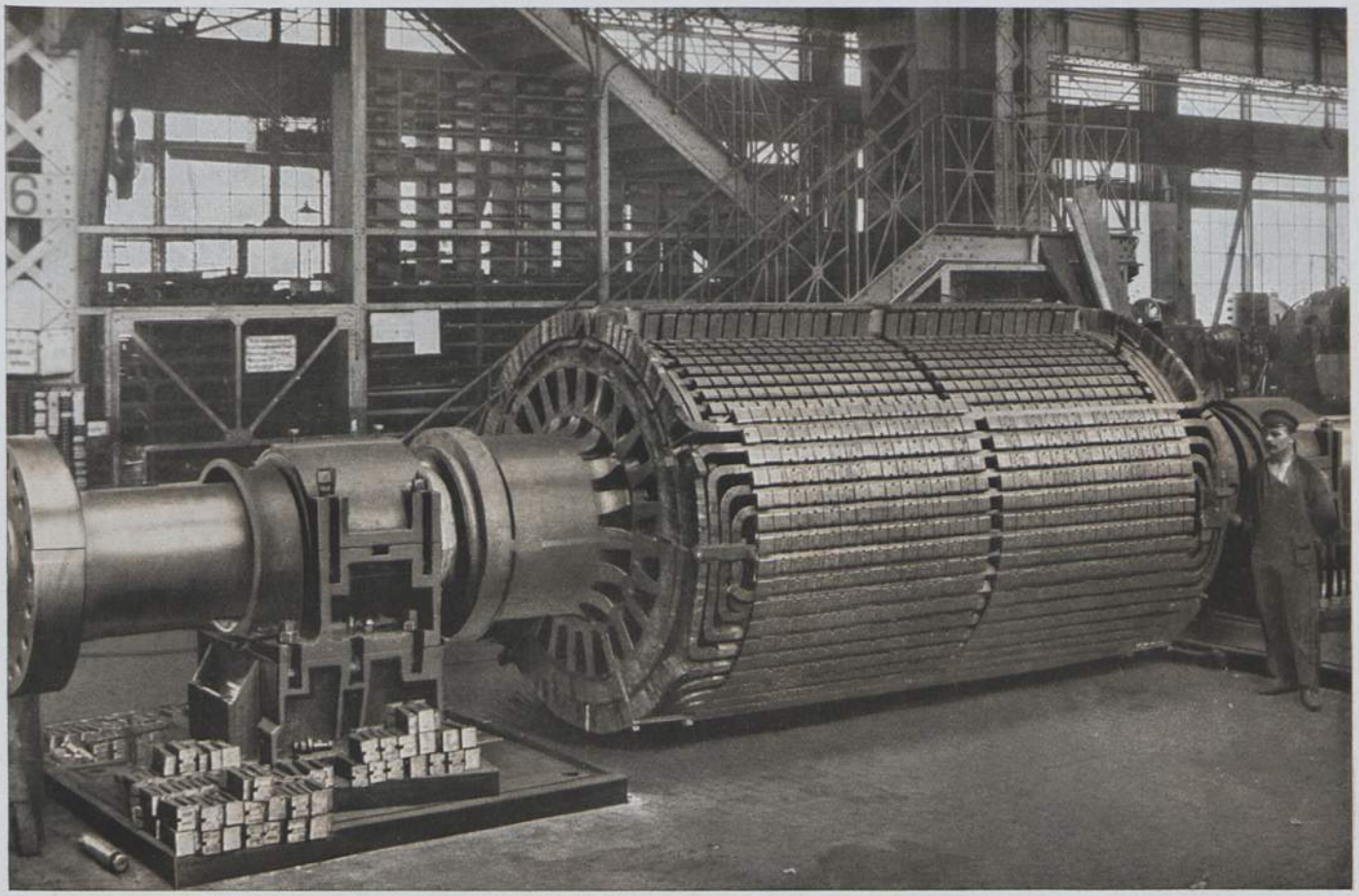
POLITECH
BIBLIOTE
GLOWN
WROCL



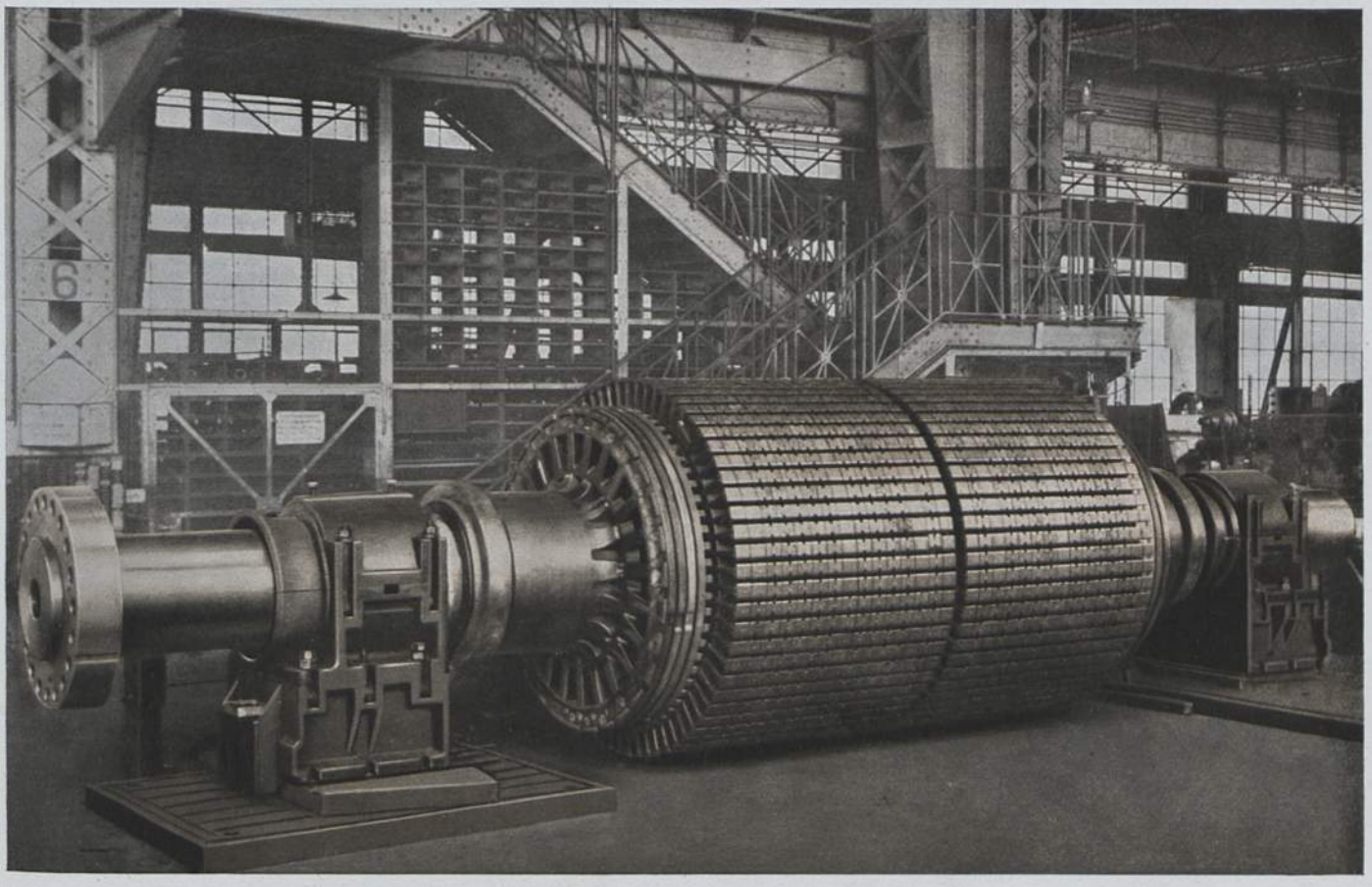
3. In die aufgeschrumpften Stahlringe werden auf der Fräsbank Schwalbenschwanznuten zur Befestigung des Stahlmantels eingefräst



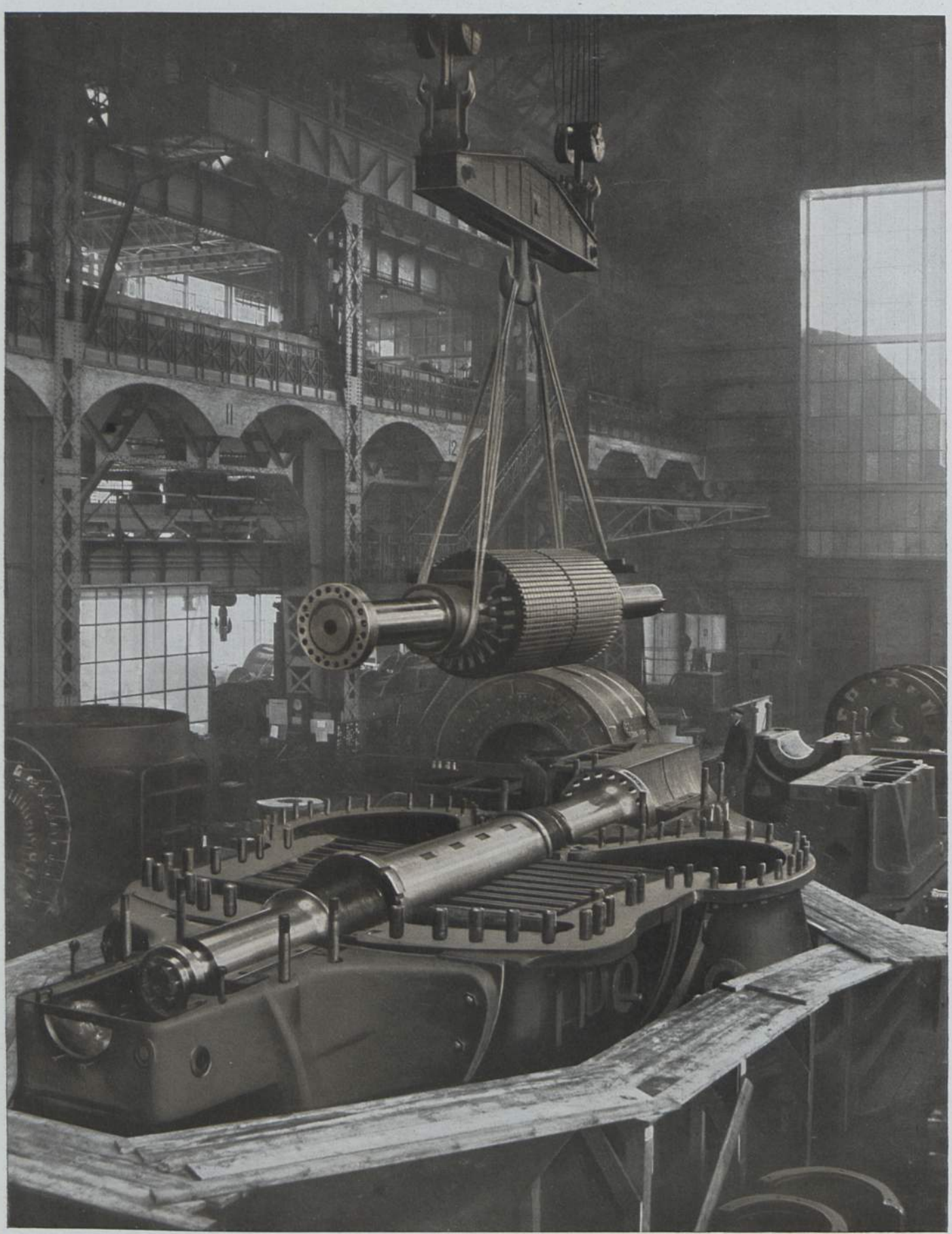
4. Der äußere Stahlmantel wird auf dem Läuferkörper aus einzelnen Stahlpaßstücken aufgebaut



5. Die nach dem Schablonenverfahren fertiggemachten Wicklungen werden auf den Läuferkörper zwischen die stählernen Paßstücke aufgebracht

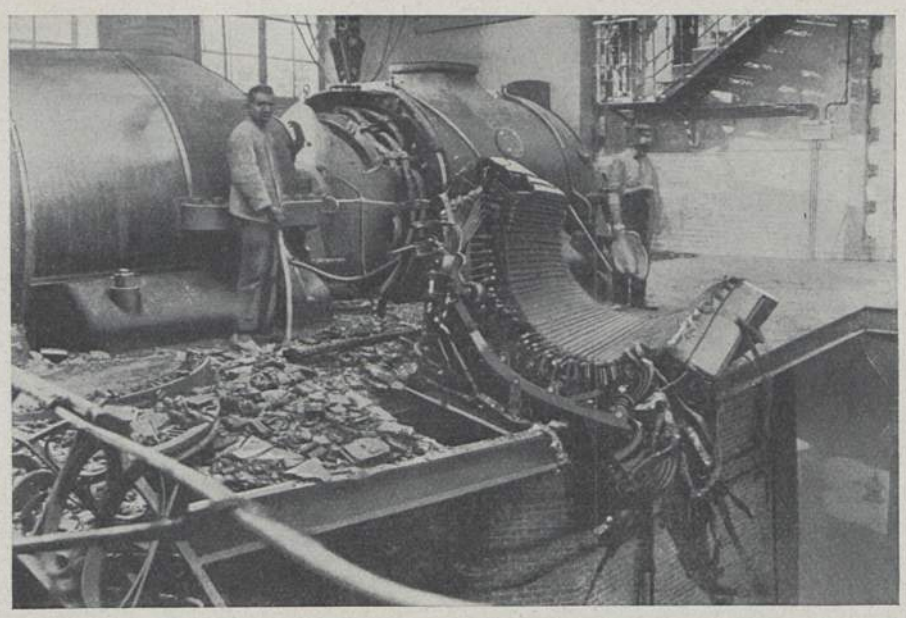


6. Der fertige Läufer. Die Kupferwicklungen und stählernen Paßstücke bilden einen massiven äußeren Mantel



7. Probemontage eines Generators mit dazugehöriger Druckstufenturbine. Der Rotor wird mit der Turbinenwelle direkt gekuppelt

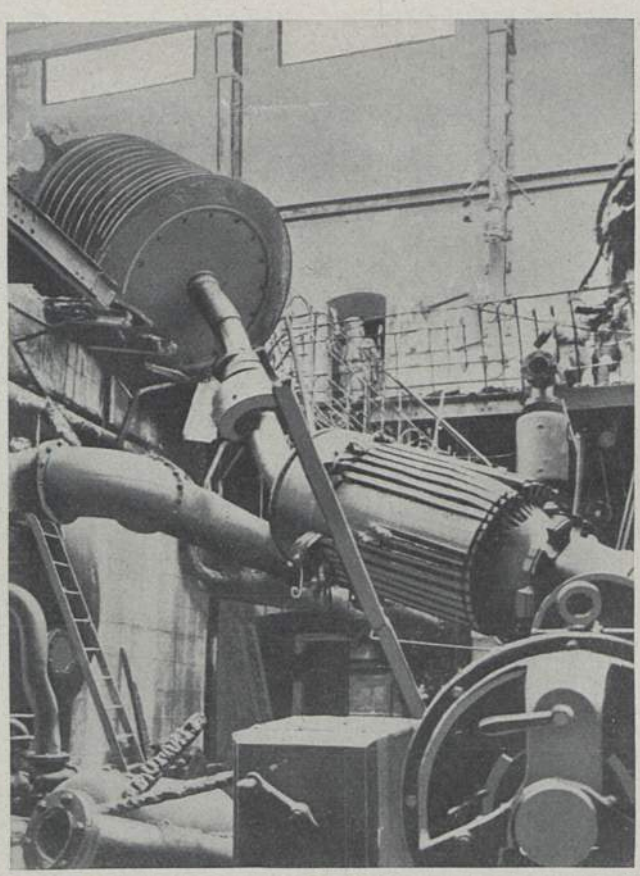
dagegen bis zur vollkommenen Ausschöpfung weiterfahren, wird wahrscheinlich das Ziel noch erreichen, und kann die Neuladung bewerkstelligen, wann es ihm bequem ist. Ähnliche Verhältnisse sind auch an anderen Stellen denkbar. Dazu kommt weiter eine an und für sich größere Lebensdauer der Edisonbatterie. Bei den ortsbeweglichen Bleibatterien hat man das geringe Gewicht, welches auf gleiche Leistung bezogen, ja kaum den vierten Teil des Gewichtes ortsfester Batterien beträgt, nur auf Kosten der Lebensdauer erreichen können. Im allgemeinen haben die positiven Platten dieser transportablen Bleibatterien nach einer dreihundertmaligen Ladung und Entladung derartig an Kapazität eingebüßt, daß sich die Auswechslung dieser Platten empfiehlt. Im Gegensatz dazu ertragen Edisonbatterien eine mehrtausendfache Ladung und Entladung, ohne daß ihre Kapazität eine merkliche Abnahme zeigt. Für lange Jahre genügt es hier, die Kalilauge einige Male im Jahr zu erneuern und die Batterie bleibt selbst unverändert. Aus diesem Grunde stellt sie sich aber trotz des höheren Anschaffungspreises schließlich doch im Betriebe billiger als die Bleibatterie, und eben deshalb wird sie auch heut noch trotz aller Fortschritte der Bleiakkumulatoren an vielen Stellen gern benutzt. Die beiden Typen des Bleiakkumulators und des Eisennickelakkumulators bestehen gleichberechtigt nebeneinander und geben die Möglichkeit, elektrische Gleichstromenergie zu speichern.



726. Explosion eines Drehstrom-Generators von 6000 Kilo-Volt-Ampere Leistung
Die Explosion begann an einer Rotorkappe und riß im weiteren Verlauf den ganzen Stator auseinander

*

Wir haben bisher die Entwicklung der Dynamomaschinen und Elektromotoren bis in die neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts verfolgt und gesehen, wie ihre Herstellung allmählich aus den Händen des Mechanikers in diejenigen des Maschinenbauers überging. Nur dadurch, daß man verhältnismäßig früh und zielbewußt die Arbeitsmethoden des allgemeinen Maschinenbaues auf die Fabrikation der elektrischen Maschinen anzuwenden begann, wurde ja überhaupt erst die schnelle Entwicklung möglich, welche die Elektrotechnik gerade in Deutschland durchmachte. Als Edison 1881 mit seiner dreihundertpferdigen Dynamo auf der Pariser Weltausstellung erschien, wurde diese Maschine in Europa als ein amerikanisches Wunder angestaunt. Als aber Edison zehn Jahre später zum Besuche nach Deutschland kam, fand er hier zu seiner Überraschung in dem Kraftwerk am Schiffbauerdamm tausendpferdige Dampfmaschinen, die mit ihren Dynamos direkt gekuppelt waren. Der Amerikaner hielt diese Maschinen für zu groß und meinte, daß sich eine dauernde günstige Vollbelastung derselben nicht erzielen ließ. Er stellte dann schließlich die echt amerikanische Frage, wieviel eine solche Maschine mit jeder Kurbelumdrehung verdiene. Erst als man ihm antwortete: Zehn Pfennige pro Umdrehung, war er befriedigt, erklärte die großen Maschinen für gut und führte sie schleunigst auch in seinen amerikanischen Kraftwerken ein.

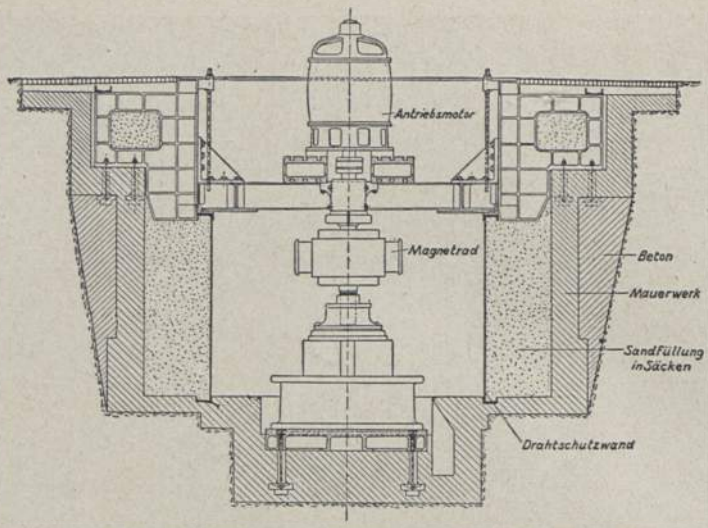


727. Explosion eines Drehstrom-Generators von 6000 Kilo-Volt-Ampere Leistung
Der Rotor des explodierten Generators stürzte in den Pumpenkeller des Werkes und riß den direkt mit ihm gekuppelten Rotor der Dampfturbine nach sich. Die schwere Maschinenwelle wurde vollkommen verbogen

Das war vor einem Menschenalter. Eine tausendpferdige Dampfmaschine war damals noch eine Aufgabe, an die der deutsche Maschinenbau nur mit Zögern herangging, obwohl man doch auch in Deutschland schon seit neunzig Jahren Dampfmaschinen baute. In etwa zehn Jahren von 1880 bis 1890 hatte sich die Dynamo von einer zehnpferdigen zu einer tausendpferdigen Maschine entwickelt, ihre Leistung verhundertfacht und die Industrie der Antriebsmaschinen auf diesem Wege mitgerissen.

Gehen wir ein Menschenalter weiter bis in die Jetztzeit. Zu den stärksten Dynamomaschinen, nicht nur Deutschlands, sondern der

Erde, zählen die im Walchensee-Kraftwerk. Es sind Drehstromgeneratoren von je 60 000 Kilo-Volt-Ampere Leistung, die mit Wasserturbinen direkt gekuppelt sind. Die effektive Leistung dieser Maschinen bei voller Belastung beträgt 25 000 elektrische Pferdestärken. Im Laufe des letzten Menschenalters hat sich die Stärke der Dynamomaschinen also verfünfundzwanzigfacht. In gleichem Tempo mußte die Leistung der Antriebsmaschinen gesteigert werden, gleichviel, ob es sich dabei um Großgasmaschinen, Dampfturbinen oder Wasserturbinen handelte. Dabei ist ein Ende dieser Entwicklung noch keineswegs abzusehen. Schon heute ist der Bau von Drehstrom- und Wechselstromgeneratoren mit Leistungen von 100 000 Kilo-Volt-Ampere im Gange, und auch das wird nicht dauernd die obere Grenze bedeuten.

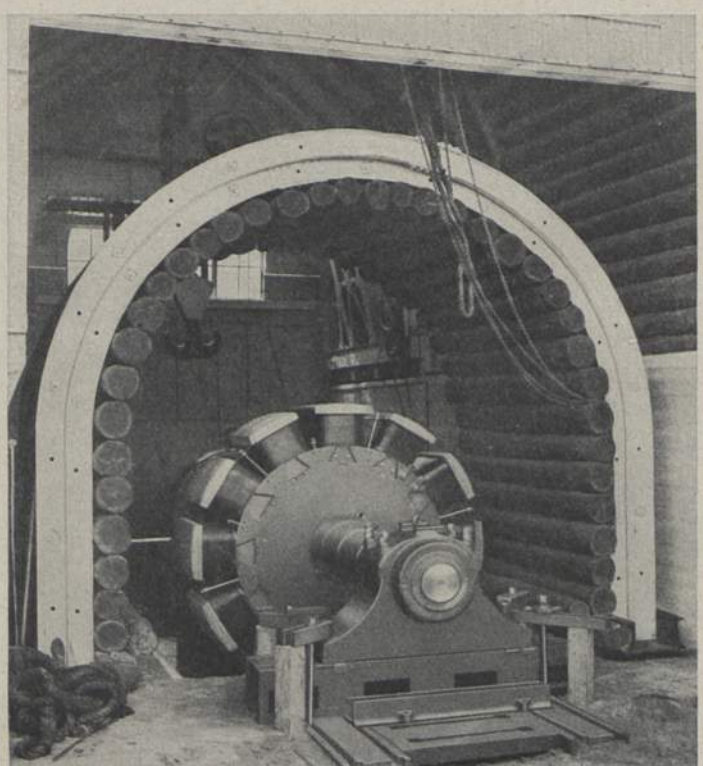



728. Prüfstand der AEG für große Rotoren

Beachtenswert bleibt dabei die von Jahr zu Jahr immer besser werdende Ausnutzung des Konstruktionsmaterials der Generatoren. Diese Ausnutzung hängt einerseits unmittelbar von der Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine ab. Eine Dynamo, die mit doppelter Tourenzahl läuft, gibt zum mindesten die doppelte Leistung einer mit einfacher Tourenzahl laufenden Maschine der gleichen Größe. Aus diesem Grunde zeigten die ersten mit Riemenantrieb arbeitenden Schnelläufer der achtziger Jahre eine verhältnismäßig hohe Ausnutzung des in ihnen eingebauten Materials, und als man aus Betriebsgründen zum direkten Antrieb und zu geringeren Tourenzahlen überging, sank die Ausnutzung zunächst. Weiter aber hängt sie auch von dem bestmöglichen Aufbau der Maschine ab. Welche Fortschritte dabei erreicht wurden, mögen die folgenden Zahlen zeigen. Der erste Generator für die Hochspannungszentrale Rheinfelden aus dem Jahre 1895 hatte für je ein Kilo-Volt-Ampere Leistung ein Gewicht von 51 Kilogramm, während ein Generator gleicher Gesamtleistung und Umdrehungszahl heute nur 12,7 Kilogramm pro Kilo-Volt-Ampere wiegen würde. Weiter haben aber auch die modernen Antriebsmaschinen und insbesondere die Dampfturbinen derartig hohe Tourenzahlen erreicht, daß sie den bei dem alten Riemenantrieb üblichen der Dynamomaschinen nicht mehr nachstehen. Wie sich die Ausnutzung des Konstruktionsmaterials hier gestaltet, mögen die folgenden Zahlen zeigen. Bei einem Generator von 5000 Kilo-Volt-Ampere und 500 Umdrehungen aus dem Jahre 1908 beträgt das Gewicht für ein Kilo-Volt-Ampere 5,8 Kilogramm, bei einem Generator gleicher Leistung und Umdrehungszahl aus der jetzigen Zeit dagegen nur 3,5 Kilogramm. Von 750 tourigen Wasserkraftgeneratoren liegen Ausführungen vor, bei denen der Aufwand an elektrischem Material nur 3,1 Kilogramm für das Kilo-Volt-Ampere beträgt.

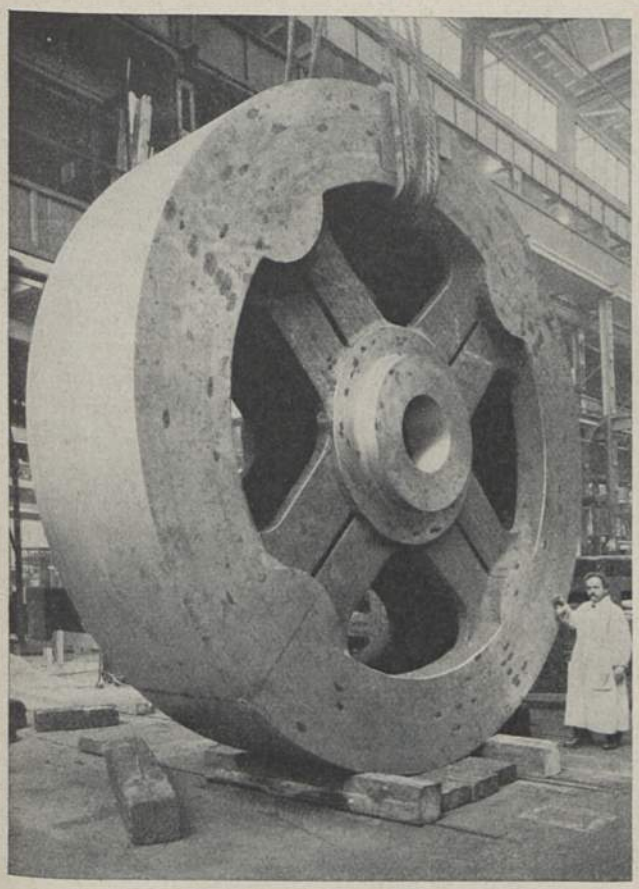
Eine derartige Bauart stellt natürlich nicht nur die größten Anforderungen an die Festigkeit aller Bauteile, sondern verlangt auch noch genau durchdachte Ventilationsvorrichtungen, um die dabei in den stromdurchflossenen Teilen der Maschine auftretenden bedeutenden Wärmemengen abzuführen und schädliche Erhitzungen zu vermeiden. Wir haben ja gesehen, wie sehr schon die Leute von Siemens & Halske bei ihren ersten Maschinen mit dieser Erwärmung zu kämpfen hatten.

Betrachten wir zunächst einmal die Baustoffe, die bei jeder modernen elektrischen Maschine zur Anwendung kommen. Summarisch pflegt man zu sagen: Eisen, Kupfer und Baumwolle. Aber beim Eisen sind wieder drei Arten zu unterscheiden: Gußeisen oder auch bisweilen Gußstahl für das äußere, elektrisch gar nicht und mechanisch nur in mäßigen Grenzen beanspruchte Gehäuse. Schmiedestahl bester Qualität für die Maschinenwelle und den Ankerkörper, soweit er nicht Foucault-Strömen ausgesetzt ist. Magnetisch hochwertiges Spezialeisen in Form von 0,5 Millimeter starken Dynamoblechen endlich für den elektrisch wirksamen Teil der Maschine, in dem Foucault-Ströme auftreten könnten.

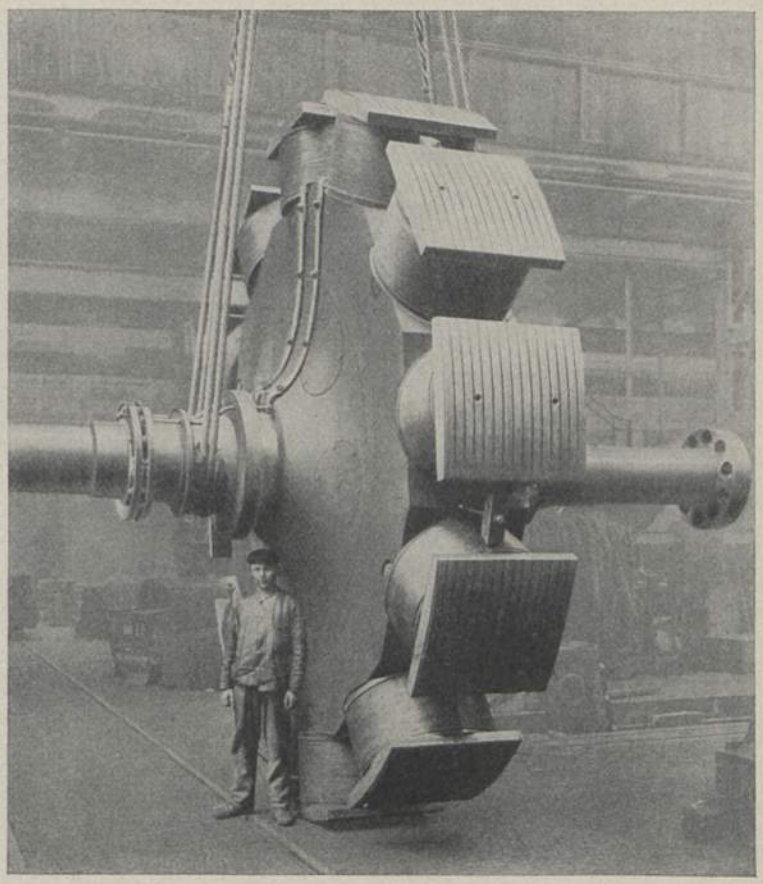


729. Schleuderstand der Siemens-Schuckertwerke für große Rotoren

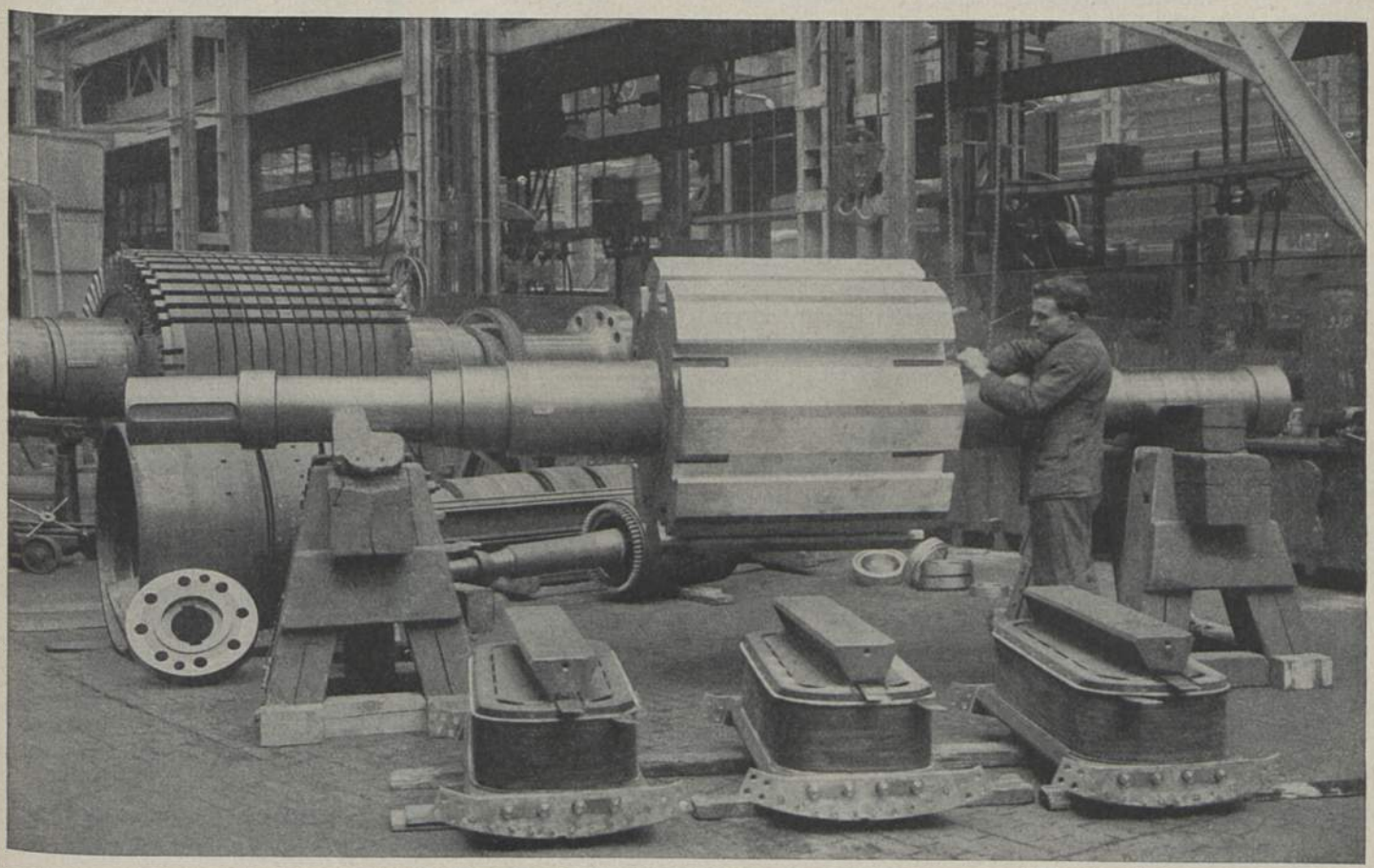
Kupfer für die Windungen, für Anker- und Feldwicklungen bei Gleichstrommaschinen, für Läufer- und Ständerwicklungen bei Wechselstrommaschinen, für Kollektorlamellen und Schleifringe. In allen Fällen ein elektrolytisch raffiniertes Kupfer mit einem Reinkupfergehalt von mehr als 99,9%. Je nach der Art der Maschine und Wicklung kommt es in Form von besponnenen Kupferdrähten oder auch in derjenigen blanker Kupferschienen zur Verwendung. Von fadenstarkem Kupferdraht, der die Wicklungen der kleinsten hauswirtschaftlichen Motoren bildet, bis zu den schwersten Kupferschienen finden sich hier alle Formen und Arten. Subtile Frauenarbeit ist die



730. Stahlgußkörper eines schweren Polrades
Die Nuten zur Aufnahme der Schwalbenschwänze müssen noch in den Radkranz eingefräst werden

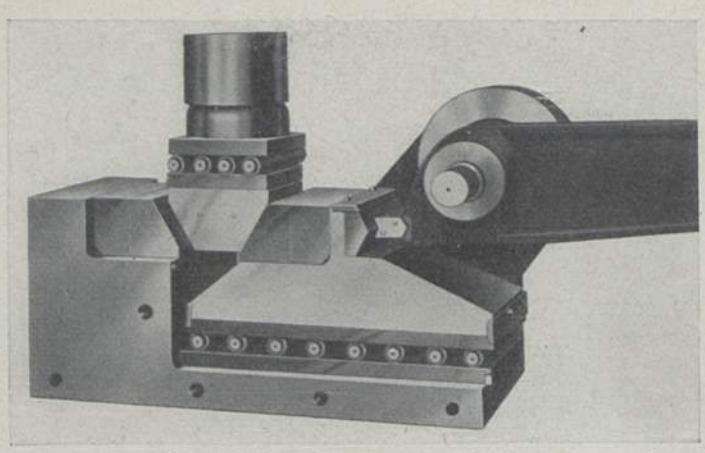


731. Rotor eines Drehstrom-Generators von 12 000 Kilo-Volt-Ampere
im Dynamowerk der Siemens-Schuckertwerke



732. Polrad eines Drehstrom-Generators
Die Pole (im Vordergrund des Bildes) werden mittels schwalbenschwanzförmiger Ansätze am Radkörper befestigt. Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

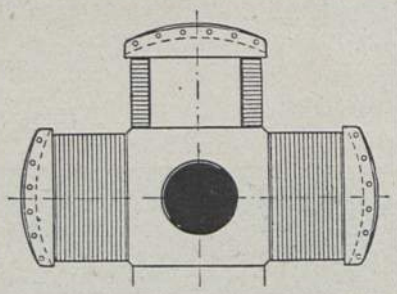
Herstellung der Wicklungen aus den feinsten Drähten und wird mit Hilfe zierlicher und hochempfindlicher Spulvorrichtungen bewerkstelligt. Die volle Kraft eines Mannes, ja häufig Maschinenkraft ist dagegen vonnöten, um die Wicklungen eines Großgenerators aus dem in Schienenform ausgewalzten Kupfer herzustellen, das dabei hochkantig gebogen werden muß.



733. Versuchsanordnung für die Beanspruchung der Schwalbenschwänze
AEG, Berlin

Baumwolle schließlich. Es ist alles darunter zu verstehen, was beim Bau der Maschine an Isolierstoffen gebraucht wird. In vielen Fällen ist es wirklich Baumwolle, insofern die isolierten Drähte der Wicklungen mit Baumwolle besponnen sind. Bei sehr feinen Drähten tritt häufig Seide oder auch Emaille an die Stelle der Baumwolle. Bei den aus Kupferschienen gebogenen Wicklungen kommt Papier als Isolierstoff zwischen den einzelnen Windungen zur Anwendung. Glimmer, Preßspan, Schellack und Leinewand spielen weiterhin eine Rolle. Schließlich ist der Spezial-Isoliermassen und Isolierstoffe zu gedenken, die zu Hilfe genommen werden müssen, um auch bei Hochspannungsmaschinen den Strom von verbotenen Wegen fernzuhalten. Das alles verbirgt sich unter dem Schlagwort Baumwolle.

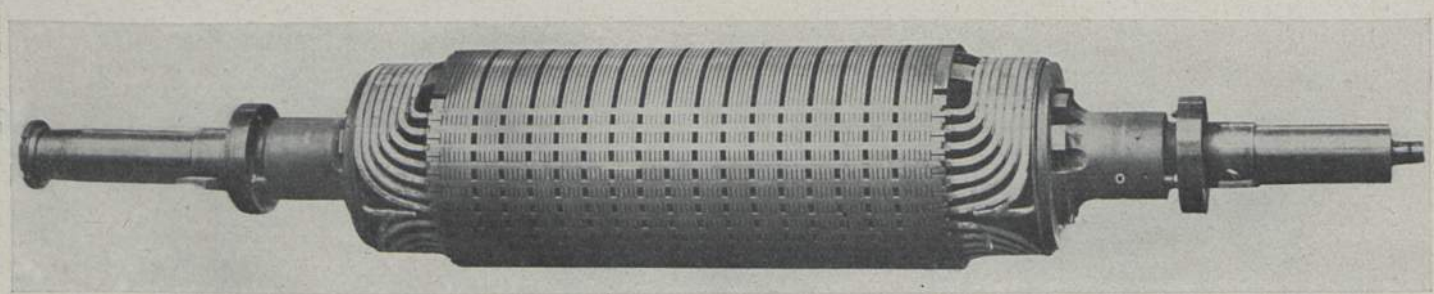
Verfolgen wir nun zunächst einmal an einer Reihe während der einzelnen Fabrikationsstadien gemachter photographischer Aufnahmen den Aufbau eines kleineren Drehstrominduktionsmotors der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft. Bild 720, 1 zeigt das für den Läufer notwendige Baumaterial. Links oben liegt die Motorwelle mit den beiden Ankerschlußplatten. Sie besteht aus Schmiedestahl und ist auf der Drehbank nach den Methoden des modernen Präzisionsmaschinenbaus auf winzige Bruchteile eines Millimeters genau abgedreht und abgeschliffen. Das gleiche gilt von den beiden Läuferschlußscheiben. Links davon liegt ein Stapel Läuferbleche. Sie bestehen aus 0,5 Millimeter starkem Spezialblech, das zwecks elektrischer Isolation in besonderen Maschinen auf der einen Seite mit Seidenpapier beklebt wurde. Aus den so vorbereiteten Blechbahnen wurden die einzelnen Blechscheiben auf besonderen Stanzmaschinen ausgestanzt. Diese Stanzmaschinen bilden im Elektromaschinenbau ein Kapitel für sich. Soweit es sich um nicht allzu große Stanzformen und um ein Massenfabrikat handelt, wird die einzelne Scheibe jedesmal mit einem einzigen Schlag ausgestanzt. Das setzt natürlich voraus, daß ein besonderer „Schnitt" für die betreffende Blechform angefertigt wurde, d.h. einerseits eine Patrize, d.h. ein genaues scharfkantiges Abbild der gewünschten Blechform aus gehärtetem Werkzeugstahl und andererseits eine Matrize dieser Form, in welche die Patrize genau hineinpaßt, so daß sie aus einem auf die Matrize gelegten Dynamoblech die gewünschte Form ausstanzt.



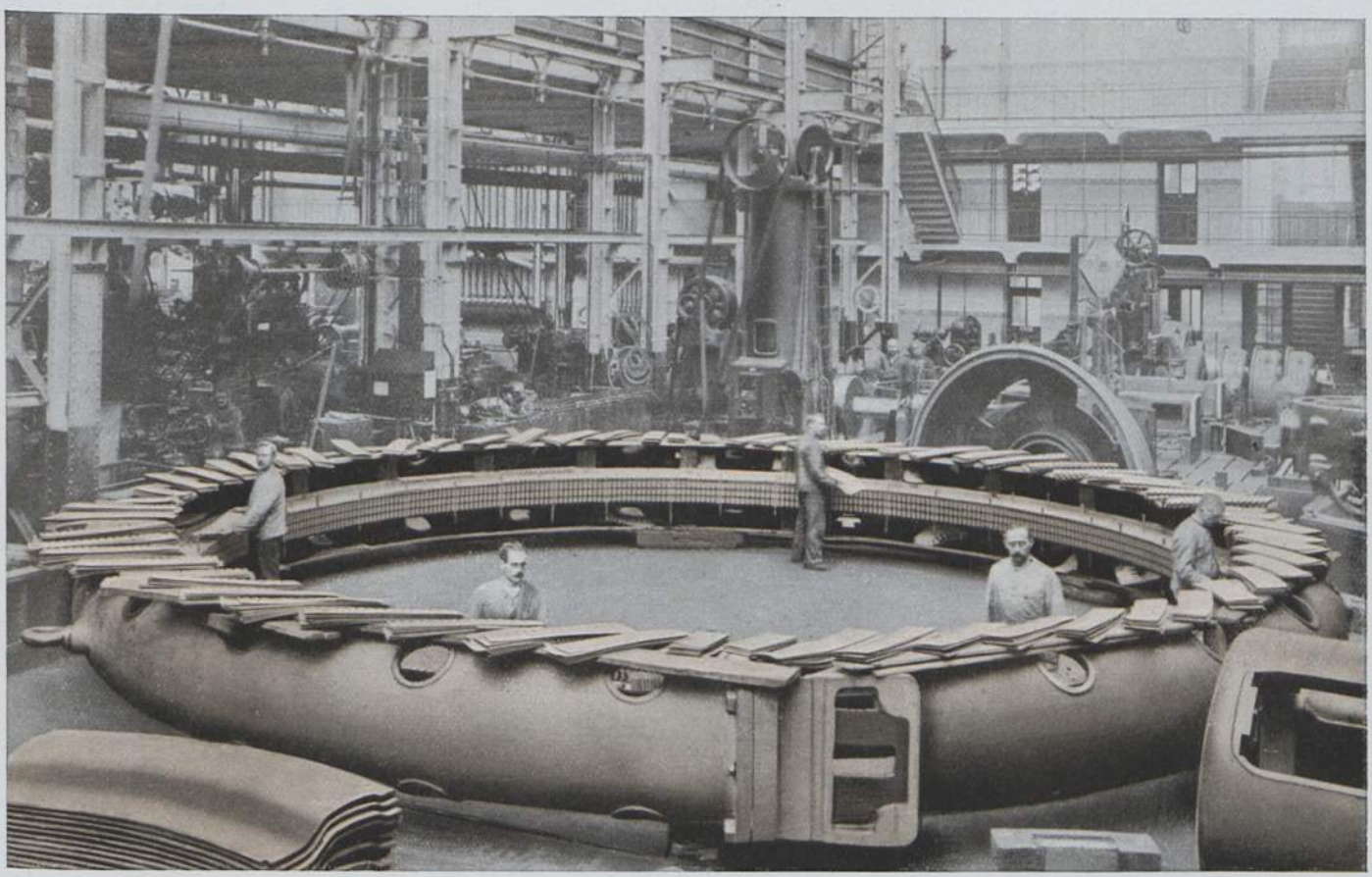
734. Läufer mit ausgebildeten Polen, aus einem Stück geschmiedet

Häufig aber wird nach diesem Verfahren nur eine kreisrunde Blechscheibe mit einer mittleren Aussparung für die Ankerwelle ausgestanzt, während man das Ausstanzen der Nuten am Rande automatischen Stanzmaschinen überläßt, die diese Arbeiten mit Hilfe von pneumatischen Saugvorrichtungen fast vollkommen selbsttätig wie lebendige Menschen ausführen. Von einem Stapel vorgestanzter Scheiben nehmen sie mit einem Saugarm eine Scheibe ab, legen sie auf den Maschinentisch und stanzen Nut für Nut, wobei die Scheibe nach jedem Stanzschlag um eine Nuten- und Zahnbreite weiter gedreht wird. Die fertige Scheibe wird automatisch auf einen anderen Stapel gelegt, eine neue vom ersten Stapel genommen, und das Spiel geht weiter. Diese Art der Herstellung ist zwar zeitraubender, erspart aber die Herstellung der teuren und leicht verletzlichen Schnitte für die ganze Blechform.

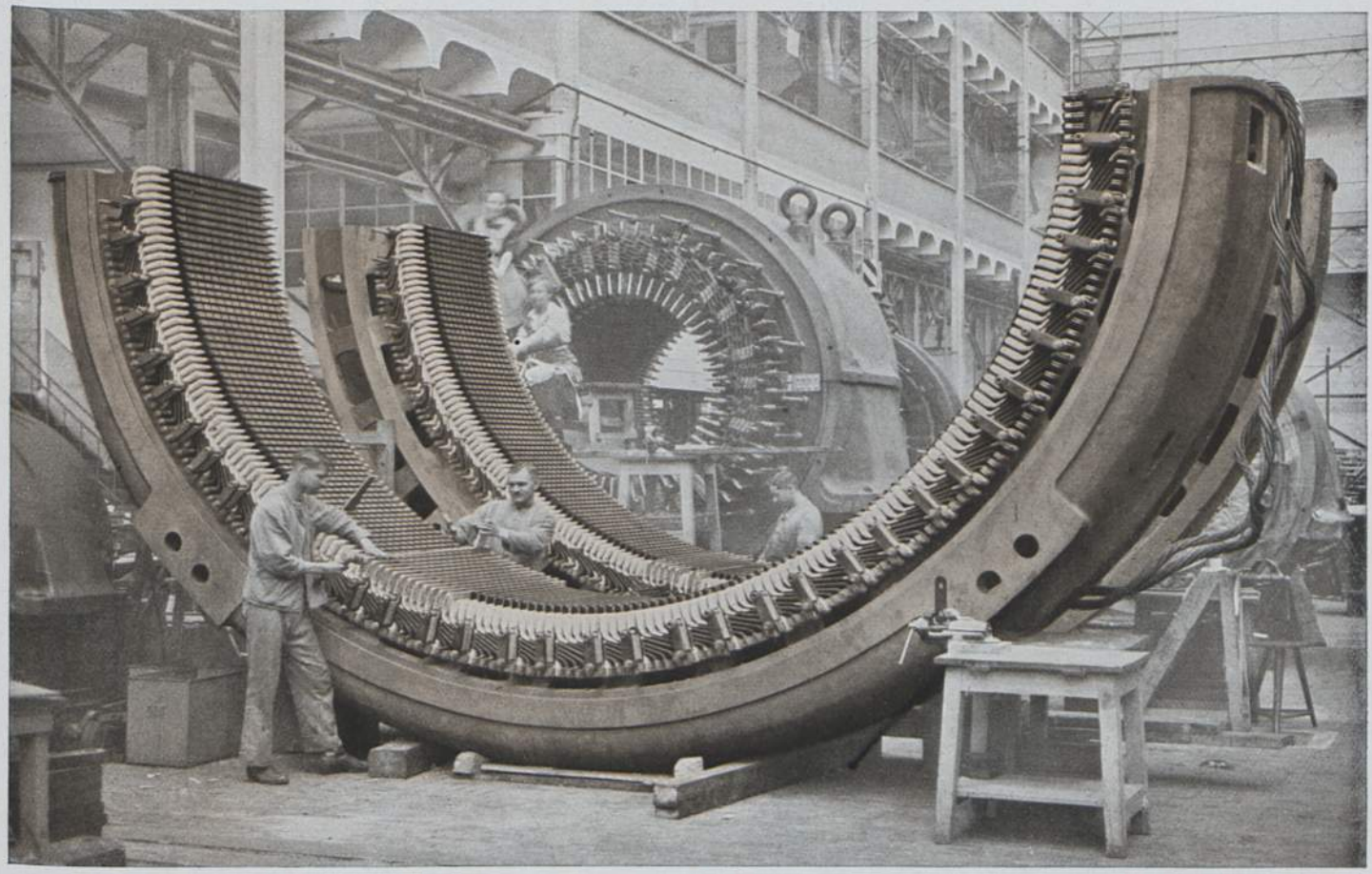
In Bild 720, 1 rechts sind die Bleche auf die Läuferwelle geschoben und zwischen den Endplatten hydraulisch zusammengepreßt. Schrumpfringe wurden nachgeschoben. Es sind dies Ringe (im Bild der Ring unter der Welle), deren lichte Weite etwa ein zehntel Millimeter geringer ist als der Durchmesser der Welle. Auf etwa 300 Grad Celsius angewärmt, lassen sie sich jedoch leicht auf diese aufschieben. Dort erkaltet und dadurch wieder enger geworden, sitzen sie unverrückbar fest und halten auch den ganzen Ankerkörper an seiner Stelle. Ganz rechts im Bild liegt die aus Stahl und Isolierstoff gebildete Büchse



735. Zweipoliger zylindrischer Läufer
Brown, Boveri & Cie. A.-G., Mannheim

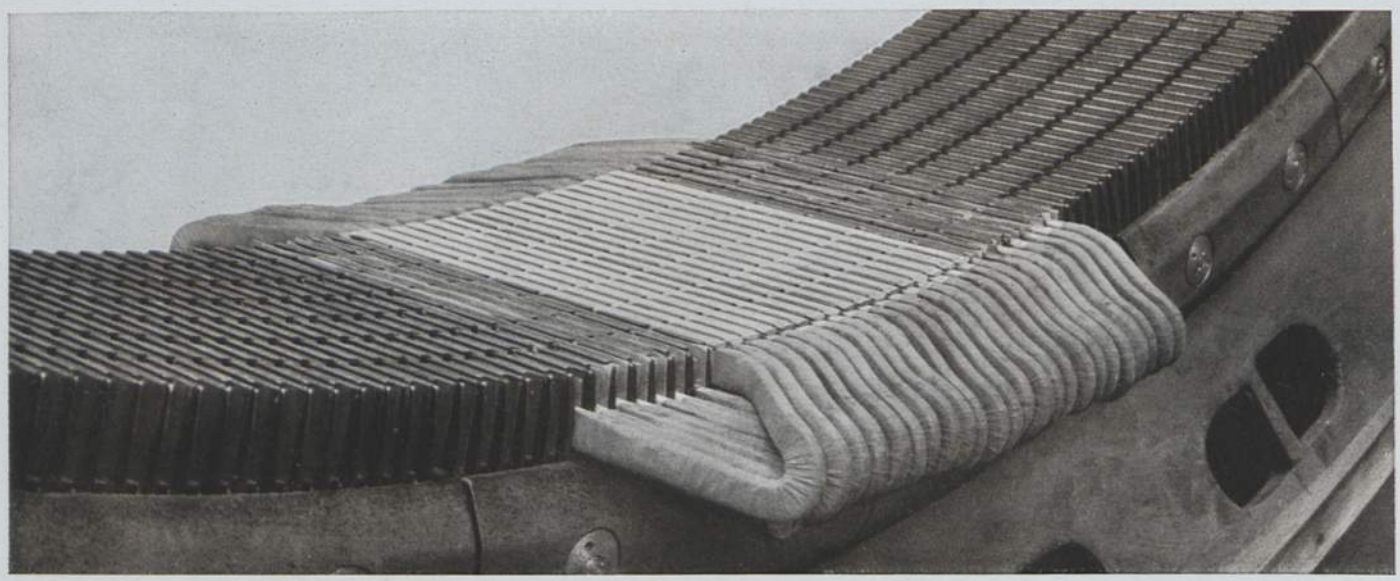


1. Aufbau des aktiven Eisenkörpers eines großen Stators

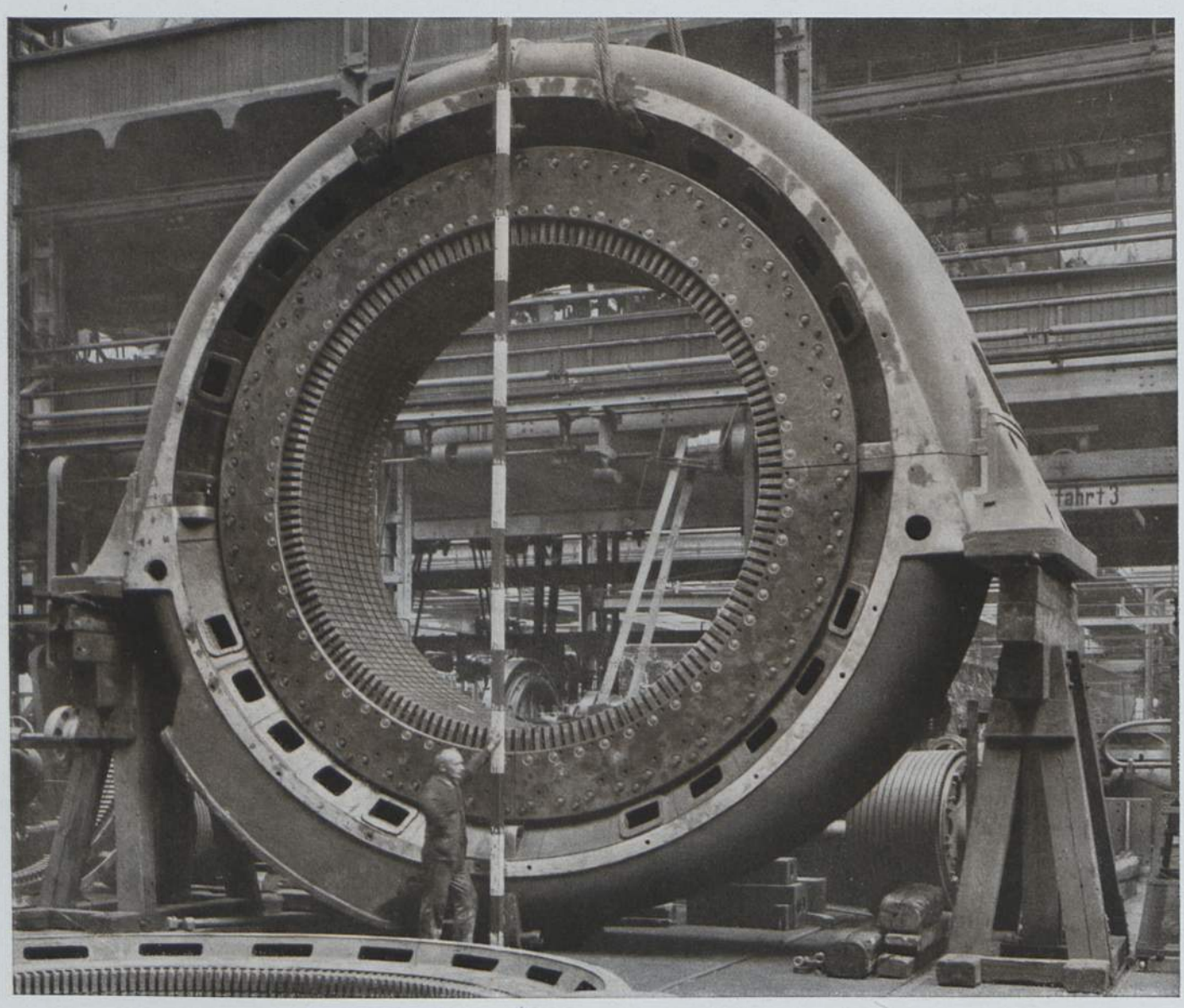


2. Einbringen der fertigen Spulen in den Ständer eines Drehstromgenerators von 10 000 Kilo-Volt-Ampere. Das Gehäuse hat 6,8 Meter Durchmesser, 1,2 Meter Breite und 43 Tonnen Gewicht. Zwei Mann sind nötig, um die Spulen mit Hammer und Setzeisen in die Nuten zu bringen und diese zu verkeilen

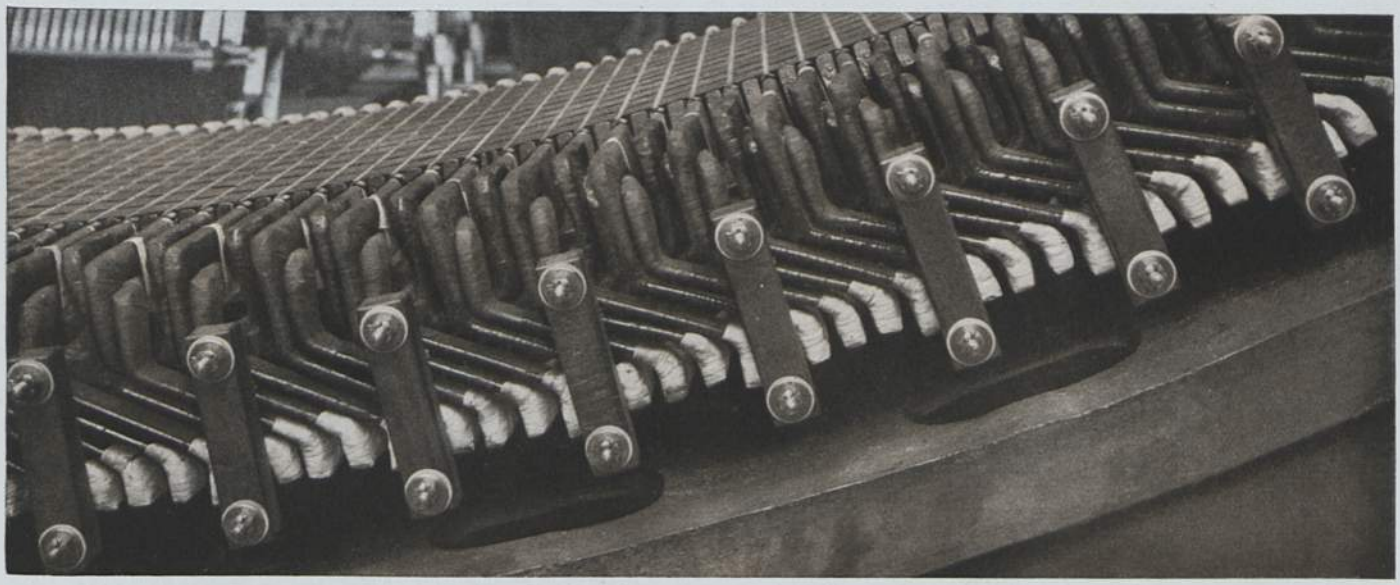
Statorbau im Dynamowerk der Siemens-Schuckertwerke, Berlin



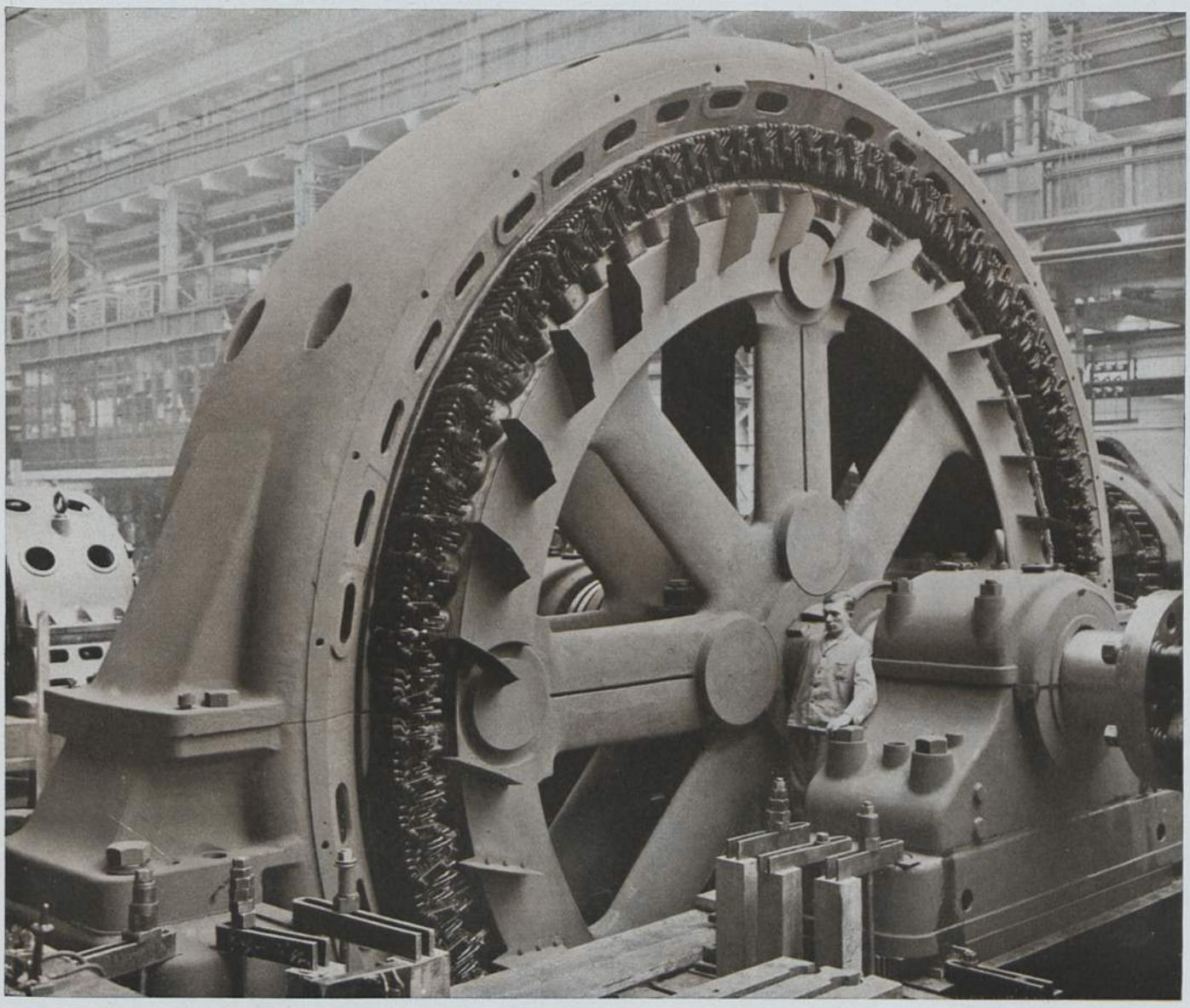
3. Teilansicht eines Stators mit eingelegten Spulen
Diese sogenannten Formspulen sind vor dem Einlegen nach dem Schablonenverfahren fertiggemacht



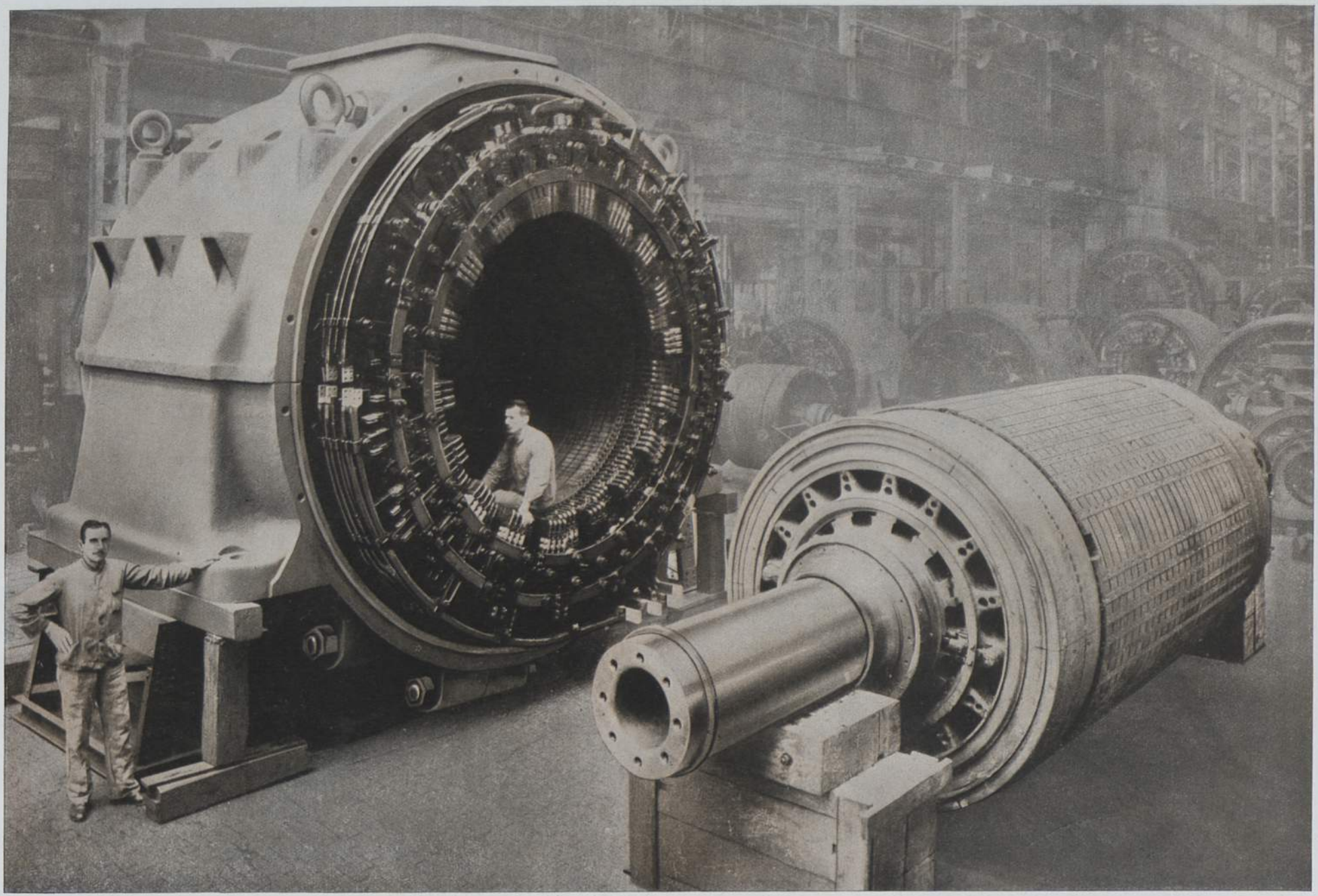
4. Stator eines der großen Einphasenwechselstrom-Generatoren von 16 650 Kilo-Volt-Ampere für das Walchensee-Werk



5. Teilansicht der Wicklung eines Stators
Beachtenswert ist die Festlegung der Wicklungsköpfe durch besondere Zugstangen und Druckstücke



6. Großer Drehstromgenerator von 13 000 Kilo-Volt-Ampere, langsam laufend für direkte Kupplung mit einem Dieselmotor bestimmt
Bemerkenswert sind die Ventilatorflügel am Läufer

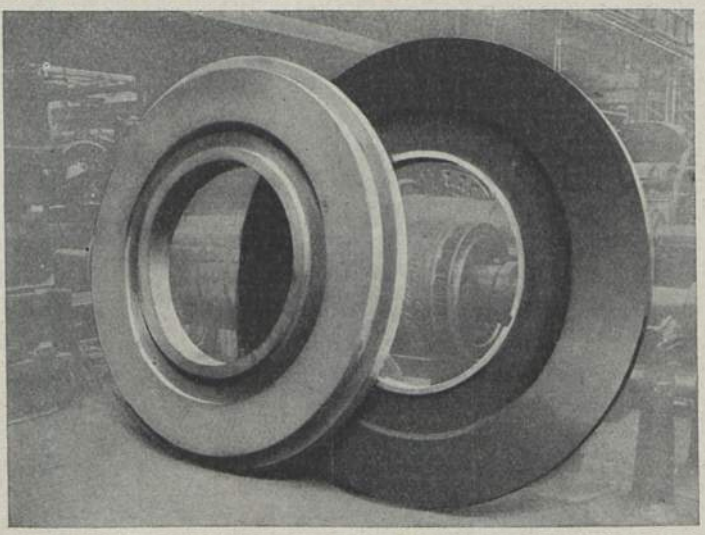


7. Stator und Rotor eines Drehstrom-Generators für das Walchensee-Werk

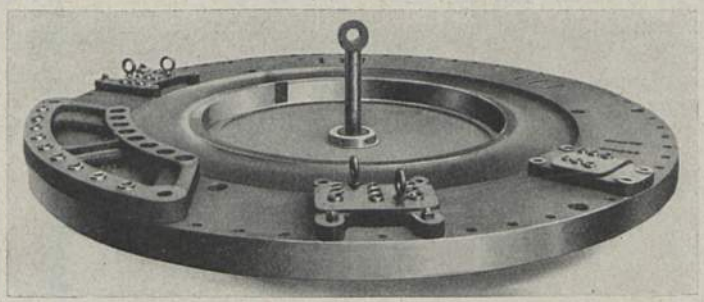
mit den drei Kupferschleifringen, die in ihrem Inneren die auf Seite 397 erwähnte Kurzschlußvorrichtung enthält. In der Mitte ist ein Bund isolierten Drahtes sichtbar, aus dem die Ankerwicklungen hergestellt werden. Daneben liegen aus Mikanit gepreßte Isolierhülsen, die vor der Einbringung der Wicklungen in die einzelnen Ankernuten eingeschoben werden, um eine unbedingt zuverlässige Isolation des gesamten Kupfers vom eisernen Körper der Maschine zu erhalten.

Die Nuten des hier dargestellten Läufers sind halb geschlossen. Die Läuferspulen können daher nicht nach dem sonst gebräuchlichen Verfahren der Schablonenherstellung vor dem Aufbringen auf den Anker vollkommen fertiggemacht, sondern müssen in halbfertigem Zustande aufgebracht werden, wie das weiterhin aus Bild 720, 3 bei der Bewicklung des Ständers ersichtlich ist.

Bild 720, 2 zeigt links den fertigen Läufer. Die Wicklung ist aufgebracht und mit drei Abzweigungen an die drei Schleifringe angeschlossen. Ganz rechts ist das erste Fabrikationsstadium des Ständers zu sehen, der gußeiserne Gehäusekörper, der auf der Drehbank, Hobelmaschine und Bohrmaschine sorgfältig bearbeitet wurde. Links davon ein Stapel gestanzter Blechringe für den Aufbau des aktiven Ständereisens. Daran lehnen die beiden stählernen Schlußringe für das Blechpaket. In Bild 720, 3 ist man dabei, die Ständerwicklungen einzubringen. In der Mitte zeigt das Bild einzelne Spulen der Wicklung, die in besonderen Schablonen vorgewickelt wurden und durch leinene Bänder ungefähr zusammengehalten werden. Darunter Mikanitstreifen für den Verschluß der Nuten. Links davon Mikanithülsen für die Auskleidung der Nuten und die Platte mit je drei Klemmen für den Anschluß der drei Ständerpole und der drei Netzpole. Beim Stator rechts auf dem Bilde ist die Wicklung vollendet und die Klemmenplatte angebracht. Bild 702, 4 zeigt links die noch fehlenden Teile des Motors. Es sind die beiden Lagerschilde mit der Bürstenbrücke, die beiden Schlußkappen, eine Lagerbuchse nebst zugehörigem Schmierring und einem Bürstenhalter. Rechts schließlich sind auch diese Teile montiert. Der Läufer liegt in seinen Lagern. Der Motor ist fertig und bereit, in das Prüffeld zu wandern, wo er auf seine elektrischen und mechanischen Eigenschaften einer letzten Probe unterworfen wird.

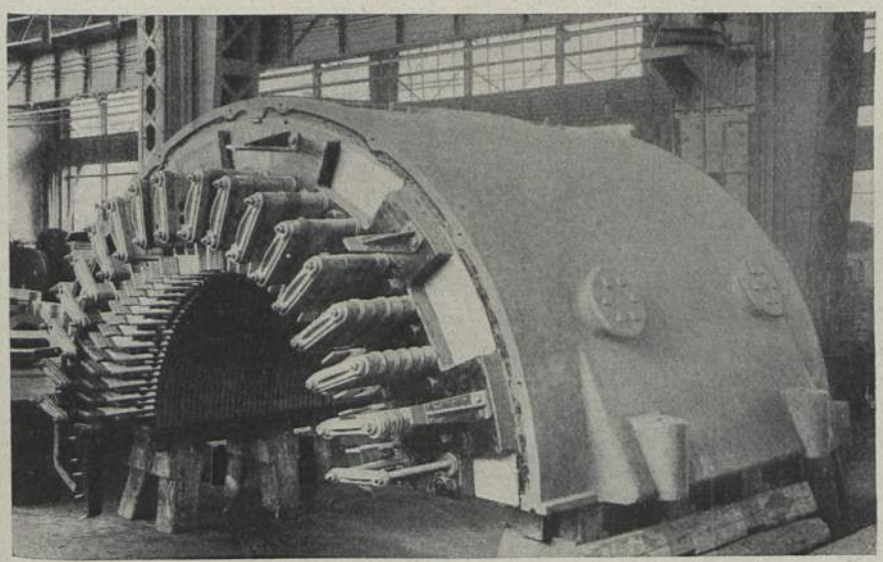


736. Zwei Stahlringe des großen Goldenberg-Generators für 60 000 Kilo-Volt-Ampere



737. Bearbeitung der Ringe mittels Bohrlehren
Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

Was hier in ausführlicher Form am Beispiele eines kleineren Motors beschrieben wurde, vollzieht sich in ähnlicher Weise auch bei dem Bau jedes anderen Typs, gleichviel, ob es sich dabei um Stromerzeuger (Generatoren) oder um Stromverbraucher (Motoren) handelt. Gleichviel auch, ob die Maschinen für Gleichstrom, für Wechselstrom oder für drei-

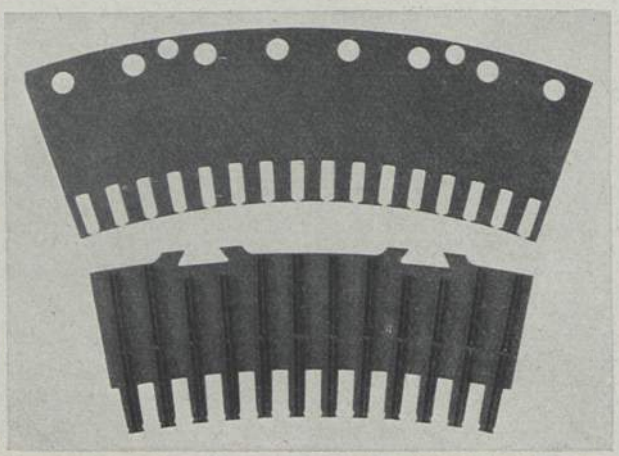


738. Die obere Ständerhälfte eines großen Drehstrom-Generators mit eingebrachten Wicklungen
Die Wicklungen bestehen aus schweren Kupferschienen

739. Einlegen der Spulen in den Ständer einer Drehstrommaschine
Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

phasigen verketteten Wechselstrom (Drehstrom) bestimmt sind. Wie bereits mehrfach ausgeführt, geht die Entwicklung seit Jahrzehnten in der Richtung zugunsten des Wechsel- und Drehstromes. Nur dort, wo Gleichstrom unbedingt notwendig ist, beispielsweise bei der elektrochemischen Gewinnung des Aluminiums, müssen große Gleichstrommaschinen verwendet werden. So finden sich denn auch die größten bisher überhaupt in Deutschland gebauten Gleichstromdynamos, acht an der Zahl, in dem Wasserkraftwerk Töging am Inn. Jede dieser Maschinen, die von den Siemens-Schuckertwerken gebaut wurden, liefert bei einer Klemmenspannung von 400 Volt einen Strom von 15 000 Ampere, leistet also 6000 Kilowatt, was einer mechanischen Leistung von 8000 Pferdestärken entspricht. Bild 722 gibt einen Blick in das Maschinenhaus von Töging. Bild 723 zeigt den fertigen Trommelanker einer dieser Maschinen im Dynamowerk von Siemens-Schuckert. Das Bild des danebenstehenden Monteurs läßt wohl die gewaltigen Abmessungen des Ankers erkennen, die noch bedeutend von denjenigen des Magnetfeldes übertroffen werden. Und trotzdem sind diese Riesenmaschinen nur schwach gegenüber den größten Drehstromgeneratoren, die, wie gesagt, bereits mit dem Vierfachen dieser Leistung ausgeführt wurden.

Das Schema eines Drehstromgenerators geht aus den Bildern 721 und 724 hervor. Ebenso wie die Gleichstromdynamo besteht auch der Drehstromgenerator aus einem magnetischen Feld, gegen das sich die Spulen einer anderen Wicklung bewegen und infolgedessen induziert werden. Der Aufbau des Drehstromgenerators erfolgt aber grundsätzlich umgekehrt wie der eines Gleichstromerzeugers. Während bei letzteren das magnetische Feld feststeht und der Trommelanker in ihm rotiert, dreht sich bei dem Drehstromgenerator und ebenso bei jedem Wechselstromgenerator das in Form eines Polrades ausgeführte magnetische Feld, während der induzierte Teil, der dem Anker der Gleichstromdynamo in elektrischer Hinsicht entspricht, feststeht und das rotierende Feld in Form eines Kranzes umgibt. Bild 724 zeigt ein sechspoliges Feld und läßt gleichzeitig erkennen, daß die Erregung dieser Pole, die Speisung ihrer Wicklungen von einer besonderen Gleichstromquelle aus zu erfolgen hat. Die Stromzuführung erfolgt dabei durch zwei auf der Maschinenwelle sitzende Schleifringe mit den zugehörigen Bürsten. Bild 725 gibt eine Darstellung des Kraftlinienflusses zweier benachbarter Pole des Magnetrades und zeigt außerdem die Anordnung der durch diesen Kraftfluß induzierten Kupferwicklungen in dem feststehenden äußeren Kranz. Bei der Betrachtung dieses Schemas darf man natürlich nicht vergessen, daß die aus den Polschuhen des Magnetrades austretenden Kraftlinien zusammen mit dem Polrade rotieren, als ob sie starr mit ihm verbunden wären, daher auch fortwährend neue Windungen des Kranzes schneiden und fortwährend neue elektromotorische Kräfte und Ströme in ihnen hervorrufen. Daß dabei in den drei Stäben der in Bild 725 gezeigten Wicklung drei in ihrer Phase zeitlich gegeneinander verschobene Ströme auftreten müssen, weil die drei Windungen dieselbe Stelle des Kraftfeldes zu verschiedenen Zeitpunkten schneiden, bzw. im selben Zeitpunkt von verschiedenen Stellen des Kraftfeldes geschnitten werden, dürfte gleichfalls leicht zu erkennen sein. Schließlich dürfte aus diesem Bild noch hervorgehen, daß die in den über dem oberen Polschuh befindlichen Wicklungen induzierten elektromotorischen Kräfte sich mit den in den zugehörigen drei Windungen induzierten Kräften, die sich über dem nächsten andersnamigen Pol befinden, addieren müssen. Nehmen wir an, daß in den oberen drei Windungen die Ströme aus der Papierebene hinaus auf den Beschauer zufließen, so werden sie in den folgenden drei Windungen vom Beschauer hinweg senkrecht in die Papierebene hineinfließen. Wir wollen dabei annehmen, daß sich die drei bogenförmigen Verbindungen zwischen den Windungsstäben auf der vorderen, dem Beschauer zugekehrten Seite befinden. Dann kann man sich diese Dreilochwicklung leicht fortgesetzt denken, indem die je drei Windungen über den benachbarten in Bild 725 nicht mehr dargestellten Magnetpole auf der dem Beschauer abgewandten Seite mit den je drei hier gezeigten Windungen verbunden sind. Auch hier würden sich die Spannungen wieder addieren, und so leuchtet es wohl ein, daß man vielpolige Drehstromgeneratoren bauen kann, in deren ruhenden Wicklungen Spannungen bis zu 20 000 Volt induziert werden. Dabei macht es sich vorteilhaft geltend, daß gerade diejenigen Maschinenteile und -windungen, in denen derartig hohe Spannungen und auch recht kräftige Ströme induziert werden, ruhen, während das mit Gleichstrom von viel niedrigerer Spannung gespeiste Magnetrad rotiert. Man kann im ruhenden Teil naturgemäß viel besser isolieren und sich gegen alle unangenehmen Begleiterscheinungen einer derartig hohen Spannung viel besser schützen.



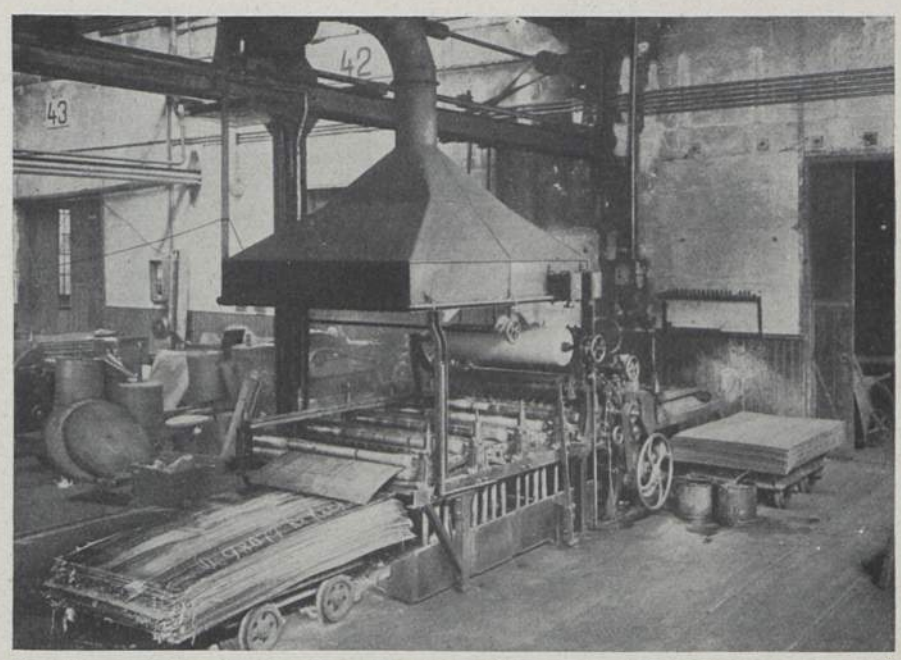
740. Gestanzte Bleche

Es zeigte sich an Hand der in Bild 724 und 725 gegebenen schematischen Darstellungen, daß in der Wicklung des feststehenden Teiles eines Drehstromgenerators ein Drehstrom erzeugt wird, wenn das Magnetrad in ihm unter Aufwand mechanischer Arbeit gedreht und dadurch ein magnetisches Drehfeld erzeugt wird. Wenn man nun umgekehrt in die Wicklung des Drehstromgenerators von außen her Drehstrom hineinschickt, so muß dieser ja nach allem, was wir bereits (Abschnitt 31, S. 394) über den Drehstrom hörten, ebenfalls ein magnetisches Feld erzeugen, dessen Drehachse mit der Maschinenwelle unseres Generators zusammenfällt. Auf Seite 395 wurde auch bereits mitgeteilt, daß ein Stahlmagnet, den man drehbar in einem magnetischen Drehfeld unterbringt, der Drehung dieses Feldes folgen muß. Stahlmagneten kann man stets durch Elektromagneten ersetzen. Wir tun es, indem wir in unserem Falle dem Polrad des Drehstromgenerators in der üblichen Weise Gleichstrom zuführen, während die Wicklungen des feststehenden Teiles mit Drehstrom gespeist werden. Und nun zeigt sich, daß der Drehstromgenerator genau so umkehrbar ist wie die Gleichstromdynamo, ebenso wie diese auch als Motor arbeiten kann.

Wir lernten auf Seite 396 bereits den Drehstrom-Induktionsmotor kennen, dessen Ständer ebenfalls mit Drehstrom

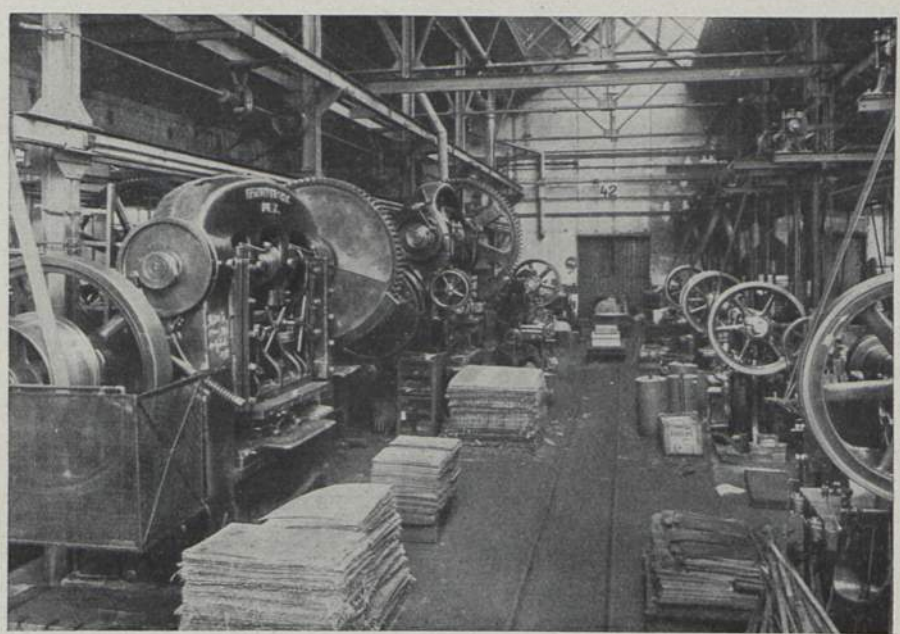
gespeist wird, während sein Läufer unter dem Einfluß der in ihm induzierten Ströme in Bewegung gerät. Der Drehstrom-Induktionsmotor folgt dem Drehfeld zwar auch, aber er folgt ihm stets mit einer gewissen Schlüpfung, die mit der Belastung des Motors steigt. Nehmen wir etwa an, daß das Drehfeld tausend Touren in der Minute macht, so wird ihm der Läufer mit 970 Touren und 3% Schlupf, mit 950 Touren und 5% Schlupf usw. folgen, je nachdem er weniger oder mehr zu ziehen hat. Weil also bei dem Drehstrom-Induktionsmotor die Zeiten für einen Feldumlauf und eine Drehung des Läufers nicht zusammenfallen, bezeichnet man ihn mit einem griechischen Ausdruck auch als Asynchronmotor. Dabei bedeutet synchron „gleichzeitig", und das „A" entspricht unserem deutschen „Un". Es ist ein Motor, bei dem Felddrehung und Läuferdrehung ungleichzeitig verlaufen. Im Gegensatz dazu arbeitet der Drehstromgenerator, wenn sein Ständer mit Drehstrom und sein Läufer mit Gleichstrom gespeist wird, als ein Synchronmotor. Die Pole seines Magnetrades folgen dem Drehfeld genau mit dessen Tourenzahl. Wird die Belastung des Motors so groß, daß ein solches Folgen nicht mehr möglich ist, so fällt der Synchronmotor plötzlich außer Tritt, verliert damit seine Zugkraft und bleibt stehen. Besonders leicht kommt das beim Anlaufen unter Last vor und das Anwendungsgebiet der Synchronmotoren ist daher beschränkt. Man sucht dem Außertrittfallen entgegenzuarbeiten, indem man seinem rotierenden Teil eine besonders starke Schwungmasse gibt, um der Maschine über kleinere gelegentliche Überlastungen hinwegzuhelfen.

Daß man trotz dieser Eigenschaften des Synchronmotors dennoch ziemlich häufig Gebrauch von ihm macht, hängt mit der schon des öfteren behandelten Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom und dem übel berüchtigten Kosinus φ zusammen. Jede einfache induktive Belastung eines Wechselstrom- oder Drehstromnetzes ist geeignet, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung zu vergrößern, und zwar im Sinne einer Nacheilung des Stromes hinter der Spannung. Dadurch kann aber der Kosinus φ recht ungünstige Werte erreichen, gelegentlich bis unter 0,5 sinken. Das bedeutet aus dem Mathematischen in das Technische und Wirtschaftliche zurückübersetzt, daß das Elektrizitätswerk seine Maschinengrößen und Kabelquerschnitte für mehr als das Doppelte derjenigen Leistung einrichten muß, die es wirklich als Energie verkaufen kann. Diese Zustände haben bereits dazu geführt, daß man in Wechselstromwerken den größeren Teilnehmern nicht nur die wirklich geleistete Energie, die sogenannte Wirkleistung, in Rechnung stellt, sondern auch die durch den Kosinus φ bedingte Scheinleistung oder Blindleistung. Teilnehmer, die durch ihre Maschinen den Kosinus φ verschlechtern, müssen zuzahlen. Diejenigen, die ihn verbessern, erhalten Preisnachlässe.

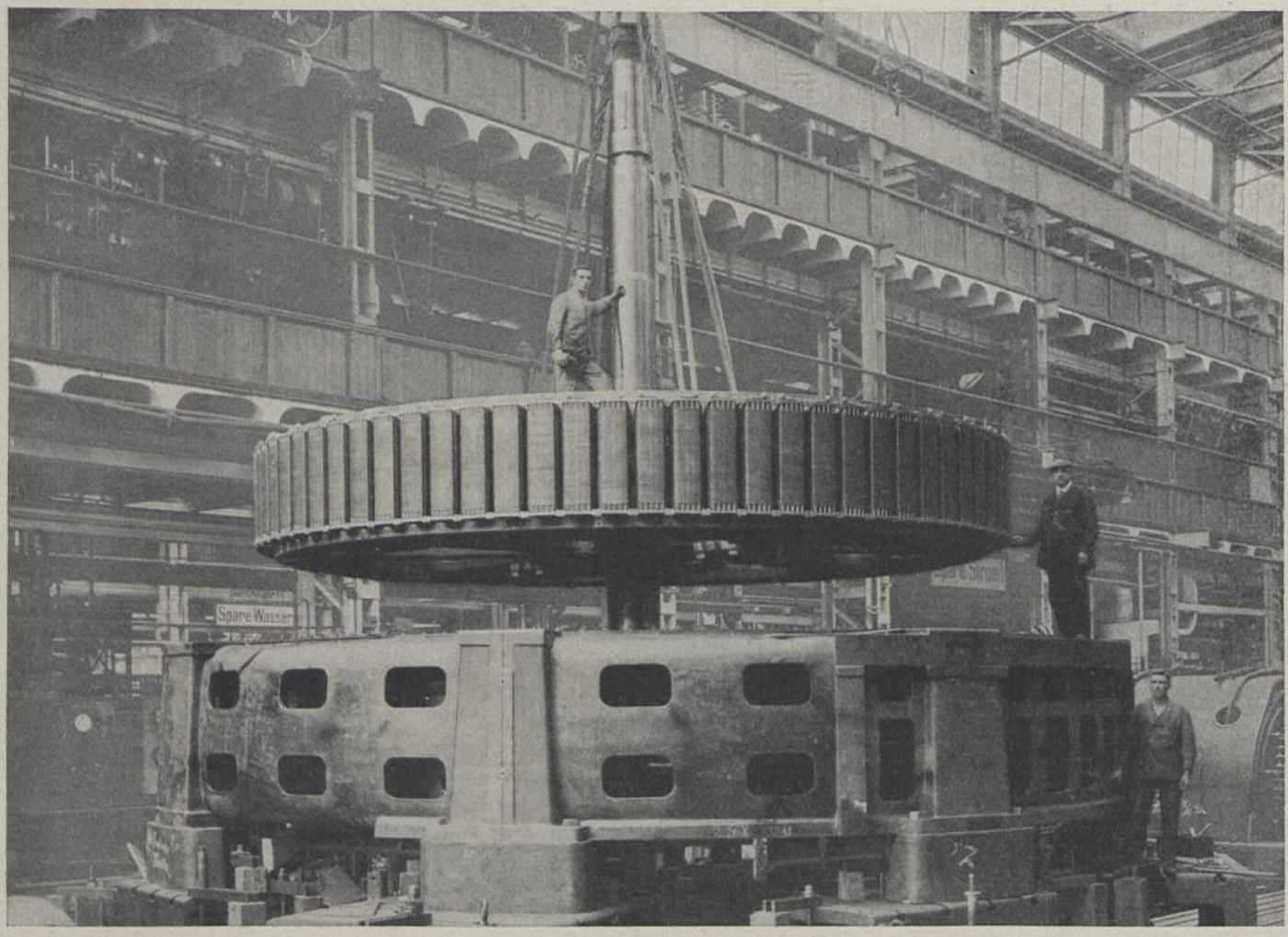


741. Maschine zum Bekleben der Dynamobleche mit Seidenpapier im Werk von Brown, Boveri & Cie.

Nun ist aber der Drehstrom-Synchronmotor ein Apparat, der unter Umständen solche Verbesserung hervorruft. Seine Wirkung hängt ganz von der Erregungsstärke seines Polrades ab. Wird dies Polrad verhältnismäßig schwach erregt, nur mit einer geringen Gleichstromstärke gespeist, so wirkt er ähnlich wie der Drehstrom-Induktionsmotor phasenverschlechternd auf das Netz. Bei einer gewissen Stärke der Erregung wirkt er weder gut noch böse. Der Kosinus φ ist für ihn gleich 1, er bringt die Phasen von Strom und Spannung weder näher zusammen, noch treibt er sie weiter auseinander. Aber schon diese Wirkung ist vom Standpunkt des Elektrizitätswerkes, dem begreiflicherweise alle induktiven Belastungen unwillkommen sind, und



742. Stanzersaal von Brown, Boveri & Cie.




743. Einhängen des Polrades in den Ständer eines liegenden Drehstrom-Generators für Turbinenantrieb mit stehender Welle
Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

gegenüber dem Drehstrom-Induktionsmotor recht gut. Und man kann noch weiter gehen, indem man das Magnetrad besonders stark erregt, den Motor, wie der Fachausdruck lautet, übercompoundiert. In diesem Falle wirkt er ebenfalls phasenverschiebend, aber im umgekehrten Sinne, indem er den Strom der Spannung voreilen läßt und dadurch die gegensätzliche Wirkung einer in seiner Nähe befindlichen induktiven Netzbelastung wieder gutmacht. Aus diesem Grunde bezeichnet man den Synchronmotor gelegentlich geradezu als Phasenschieber und zieht ihn dem Asynchronmotor vor, da er auf die Größe der Stromrechnungen einen sehr vorteilhaften Einfluß ausübt.

Bei der Berechnung und Konstruktion von Drehstromgeneratoren ist die Tourenzahl, die gewöhnlich in Umdrehungen pro Minute angegeben wird, eine sehr maßgebende Größe. Sie bestimmt nicht nur die Abmessungen und das Gewicht, sondern auch die Formgebung und Bauausführung der rotierenden Teile in einschneidender Weise. Die heute für Drehstromgeneratoren hauptsächlich in Betracht kommenden Antriebsmaschinen zerfallen in Großgasmaschinen, Wasserturbinen und Dampfturbinen. Im allgemeinen kommt nur direkte Kupplung in Betracht, so daß die Tourenzahl der Antriebsmaschine auch die Tourenzahl des Stromgenerators bestimmt. Die geringsten Umdrehungszahlen bis zu etwa 200 in der Minute haben die Großgasmaschinen. Die Drehzahlen der Wasserturbinen bewegen sich etwa zwischen 100 und 750, diejenigen der Dampfturbinen zwischen 500 und 3000.

Die bei den verschiedenen Drehzahlen auftretenden Fliehkräfte, auch wohl Zentrifugalkräfte genannt, nehmen vor allen Dingen die Aufmerksamkeit des Konstrukteurs in Anspruch. Es ereignete sich nicht nur in der Heroenzeit der Elektrotechnik (vgl. Seite 375), daß ein Anker unter der Wirkung der Fliehkraft explodierte. Daß etwas Derartiges auch in neueren Zeiten vorkommt, zeigen die Bilder 726 und 727. Es handelt sich um einen Vorfall aus dem Jahre 1923, bei dem ein 6000-Kilowatt-Generator für 1500 Umdrehungen in einer Weise explodierte, welche die kühnste Phantasie übertraf. Nur durch einen glücklichen Zufall waren Menschenleben dabei nicht zu beklagen. Es explodierte hier der Läufer, dessen eine Endkappe unter der Wirkung der Fliehkraft zerriß. Die mit der Kraft von Granatstücken losgehenden Trümmerteile zerschlugen auch das umgebende Ständergehäuse und kippten einen Teil davon beiseite, wie Bild 726 es zeigt. Die weiterfliegenden Stücke zerschmetterten darüber hinaus das eine Schild einer danebenstehenden Dynamo. Schließlich stürzte der explodierte Läufer, nachdem er die Lager zerrissen hatte, in einen Pumpenschacht des Maschinenraums und riß dabei den größten Teil der ihn antreibenden Dampfturbine hinter sich her (Bild 727), wobei die starke stählerne Maschinenwelle vollkommen verbogen wurde. Daß dabei auch noch die Pumpmaschinen stark lädiert wurden, versteht sich am Rande.

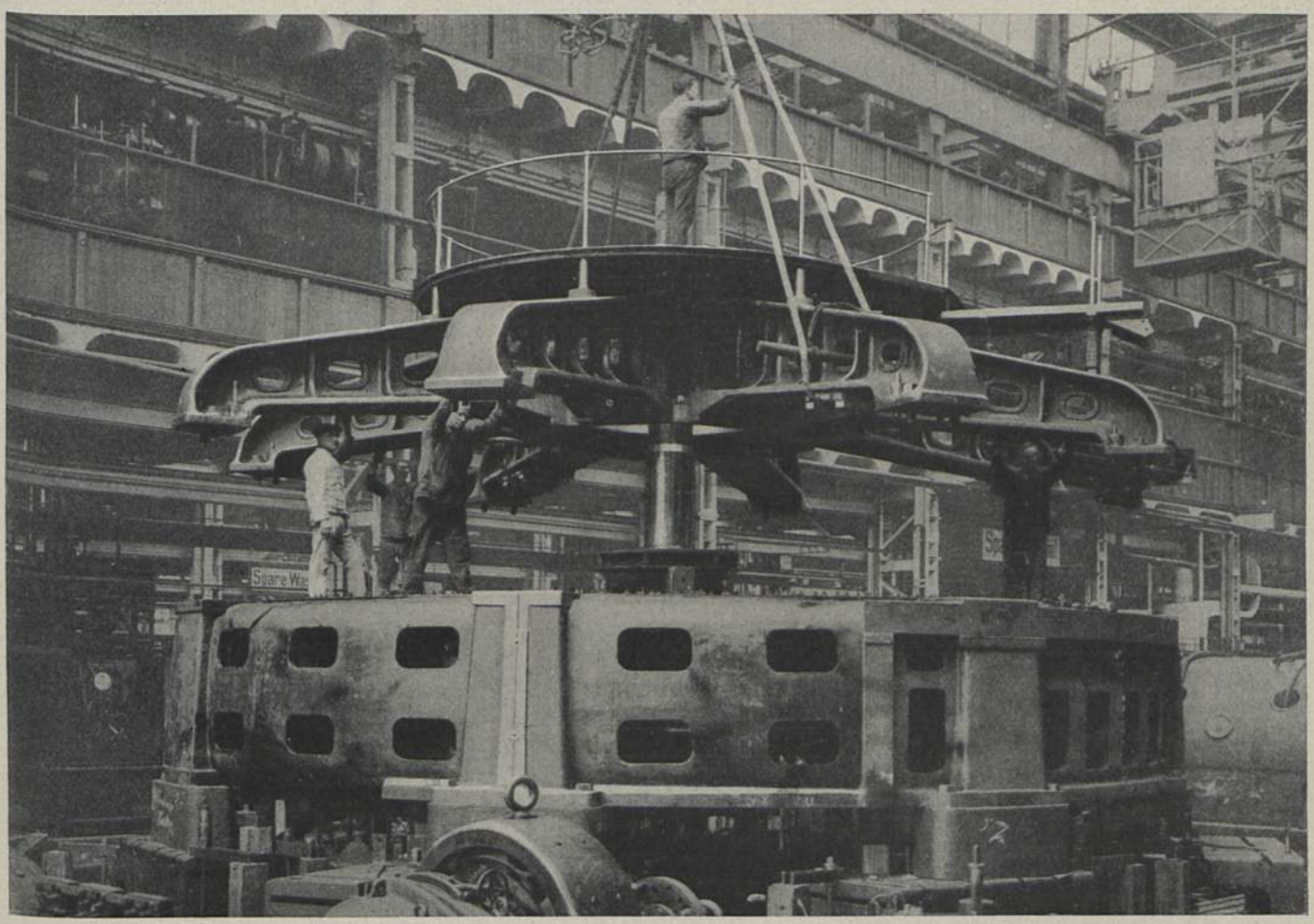
Selbstverständlich sollten derartige Unfälle nicht vorkommen und gehören auch zu den größten Seltenheiten. Der hier geschilderte Fall findet seine Erklärung nur in einer Verkettung

unglücklicher Umstände. Es muß angenommen werden, daß bei einer plötzlichen Entlastung des Stromgenerators aus unbekannten Gründen sowohl der Regulator als auch das Schnellschlußventil an der Dampfturbine versagt haben. Infolgedessen ist die Turbine durchgegangen, d. h. ihre Drehzahl ist plötzlich auf das Doppelte oder gar Dreifache ihres normalen Wertes angestiegen, und der entsprechend gesteigerten Fliehkraft war zunächst die Kappe des Läufers nicht gewachsen.

Ist aber überhaupt erst einmal eine Explosion erfolgt und ein größeres Stück von einem Läufer abgeflogen, so ist das Ende der Zerstörungen nicht mehr abzusehen. Denn durch das Fehlen der abgeflogenen Teile ist ja das Gleichgewicht, die Ausbalancierung und Auswuchtung des rotierenden Maschinenteiles schwer gestört. Eine genaue Auswuchtung des rotierenden Teiles ist aber eine der wichtigsten Voraussetzungen im modernen Elektromaschinenbau. Man stelle sich ein in allen Einzelheiten genau ausbalanciertes Schwungrad vor, welches nun so in seinen Lagern läuft, daß es nur einen stets gleichbleibenden, nach unten gerichteten und seinem Gewichte entsprechenden Druck auf seine beiden Lager ausübt. Man würde sogar die beiden oberen Lagerdeckel abschrauben können, und dies Schwungrad müßte immer noch in den beiden Lagerunterschalen sicher weiterlaufen. Nun aber störe man das Gleichgewicht, indem man etwa an einer Stelle des Radkranzes einen Eisenbarren anschraubt. Die Fliehkraft dieses Barrens ist nun durch andere Teile der Radmasse nicht ausgeglichen. Sie wird jedesmal vom Radmittelpunkte aus nach derjenigen Stelle des Radumfanges, an dem sich der Barren gerade befindet, wirken und bestrebt sein, das Rad aus den Lagern herauszureißen und Zerstörungen aller Art anrichten.

Um derartige Erscheinungen im Keime zu ersticken, werden die drehenden Maschinenteile einer Elektromaschine in der Fabrik bereits genau ausbalanciert. Es genügt aber nicht ein einfaches Ausbalancieren, bei dem der Läufer etwa in äußerst leichtgängigen Kugellagern gelagert ist und nun in jeder Lage, in die man ihn dreht, ruhig stehenbleiben muß. Etwas Derartiges wäre erst eine statische Ausgleichung, eine Ausgleichung im Ruhezustande. Noch wichtiger als diese ist aber die dynamische Ausgleichung, d. h. die Ausgleichung der rotierenden Massen im Bewegungszustande. Um diese vorzunehmen, wird die Welle des Läufers in federnde Lager gelegt, und der Läufer wird in Drehung versetzt. Jetzt macht sich jede ungleiche Massenverteilung unmittelbar durch Bewegung der Lager bemerkbar und kann durch vorsichtiges Wegnehmen von Baumaterial vom Läufer beseitigt werden. Man nennt diesen Vorgang das Auswuchten der Maschine. Er erfolgt auf besonderen Vorrichtungen im Prüffeld.

Gegen die Gefahr einer Läuferexplosion sucht man sich wie überall im Maschinenbau durch „mehrfache Sicherheit" zu schützen. Man baut so, daß das Material bei normaler Tourenzahl nur mit einem Teil seiner wirklichen Festigkeit beansprucht wird. Aber wenn diese Maßnahme auch für alle Vorkommnisse des normalen Betriebes reichliche Sicherheit schafft, so bleiben doch noch jene Zufälle übrig, bei denen die Tourenzahl eines Generators infolge irgendwelcher Störungen an den Regulatoren der Antriebsmaschine plötzlich stark ansteigt. Man



744. Aufsetzen des Lagersterns auf den Drehstrom-Generator mit stehender Welle
Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

sucht auch ihnen zu begegnen, indem man jeden fertigen Läufer oder zum mindesten jeden neuen Läufertyp in der Fabrik mit dem Anderthalbfachen oder Doppelten der normalen Drehzahl ausprobiert. Das sind natürlich recht kritische Versuche, bei denen man mit Explosionen in viel stärkerem Maße rechnen muß als bei normalem Betrieb. Diese Versuche werden daher unter besonderen Vorsichtsmaßregeln vorgenommen. Läufer mit senkrechter Welle probiert man in Schleudergruben (Bild 728) aus, in denen das rotierende Magnetrad allseitig vom massiven Erdreich bzw. den Betonmauern der Grube umgeben ist. Für Läufer mit wagerechter Welle benutzt man Schleuderstände nach Bild 729. Schwere eiserne Schienenträger sind mit einer Auskleidung von schwerem Rundholz versehen und fangen hier bei einer etwaigen Explosion jeden Splitter und jedes Sprengstück zuverlässig auf.

Diese Schleudergruben und Schleuderstände sind übrigens keineswegs nur zum Schönaussehen vorhanden. Es ist häufig notwendig, die Schleuderprobe mit besonders für diesen Zweck gefertigten Läufermodellen so weit zu treiben, bis wirklich eine Explosion eintritt, der mit immer weiter gesteigerter Drehzahl rotierende Läufer von der Fliehkraft zerrissen wird und seine Sprengstücke in die Schutzwand einschlagen. Die Drehzahl, bei der die Explosion eintrat, hat man genau gemessen. Die zerreißenden Fliehkräfte, die bei dieser Drehzahl auftreten sollen, hat man durch Rechnung ermittelt. Jetzt stellt man aus den Sprengstücken des explodierten Läufers Probestäbe her und beansprucht sie auf der Zerreißmaschine, bis sie zu Bruche gehen. Stimmen die dabei gemessenen Werte nun mit denen überein, die nach der Rechnung bei der kritischen Drehzahl in dem explodierten Läufer auftreten mußten, dann weiß man, daß auch die Rechnung richtig war und hat neue Sicherheit für andere Konstruktionen.

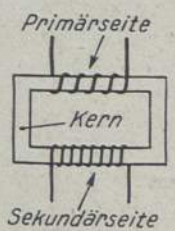
Für Läufer mit geringeren Drehzahlen bis zu etwa 400 Umdrehungen konstruiert man nun die Magneträder auf die aus Bild 732 ersichtliche Art. Die einzelnen Magnetpole enden dabei in „Schwalbenschwänze" und werden durch Verkeilung mit dem Läuferkörper verbunden. Diese Befestigung hat zweifellos den Vorteil, daß ein Pol unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft nur wegfliegen kann, wenn entweder der Schwalbenschwanz oder das zwischen zwei Schwalbenschwänzen stehende Läuferstück abreißen. Aber auch diese Möglichkeit, sosehr sie zunächst aus dem Bereiche jeder Wahrscheinlichkeit zu liegen scheint, muß sorgfältig durchgerechnet werden. Ist doch beispielsweise bei einem Siemens-Generator von 1500 Kilo-Volt-Ampere und 900 Umdrehungen die Fliehkraft, die den einzelnen 1700 Kilogramm schweren Pol aus dem Rad herausreißen will, 1,3 Millionen Kilogramm groß, und in ähnlichen Werten bewegen sich diese Kräfte auch bei anderen Maschinen.

Bild 731 zeigt einen Siemens-Läufer für 12 000 Kilo-Volt-Ampere und 250 Umdrehungen. Die Figur des Mannes gibt ein gutes Größenverhältnis. Deutlich sichtbar ist hier die Führung der beiden Speiseleitungen von den beiden obersten Magnetpolen zu den beiden Schleifringen. Auch diese Leitung unterliegt natürlich der Fliehkraft und ist, wie ersichtlich, durch starke Verschraubungen gesichert. Beachtenswert ist, daß hier auch die äußersten Polflächen, die Polschuhe, unterteilt sind, da in ihnen infolge der Rückwirkung des im Ständer induzierten Drehstromes Wirbelströme auftreten könnten.

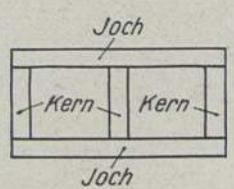
Bei der Schwalbenschwanzbefestigung treten aber nicht nur die einfachen Reißkräfte auf, sondern der Schwalbenschwanz wird auch gewaltig gedrückt. Man macht deshalb auch mit

745—749. Schematische Darstellung des Aufbaus von Transformatoren

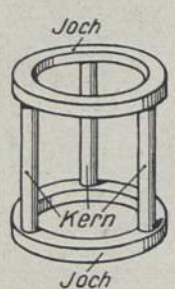
745. Einfacher Kerntransformator: Der aus Dynamoblechen aufgebaute Eisenkern trägt zwei voneinander getrennte Wicklungen. Der Primärwicklung wird elektrische Energie zugeführt, der Sekundärwicklung entnommen. 746. Drehstrom-Kerntransformator: Durch zwei Joche sind hier drei Kerne verbunden, deren jeder sowohl die Primär- wie die Sekundärwicklung je einer Phase trägt. 747. Andere Anordnung des Drehstrom-Kerntransformators: Die drei Kerne liegen nicht in einer Ebene, sondern im Raum. Die beiden Joche sind ringförmig ausgebildet. 748. Einphasiger Manteltransformator: Gegenüber dem Kerntransformator sind die Rollen von Eisen und Kupfer vertauscht. Primär- und Sekundärspule liegen aufeinander und werden von dem Eisen mantelförmig umgeben. 749. Schenkelquerschnitt eines Großtransformators: Ein kreisförmiger Querschnitt wird durch mehrere rechteckige Blechpakete annähernd erreicht



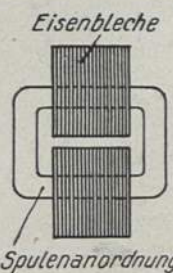
745



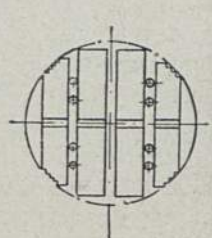
746

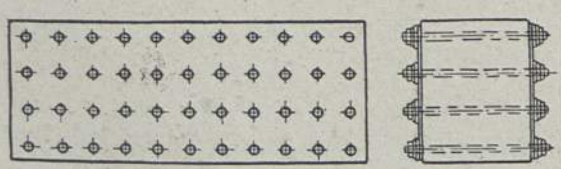


747



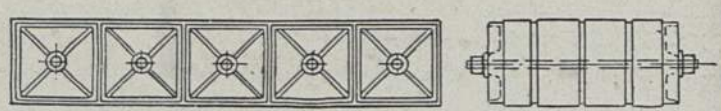
748


749



750. Ältere Art der Blechverspannung eines Transformatorenjoches

Die mehrfachen Spannbolzen geben die Möglichkeit eines Kurzschlusses, der gleichbedeutend mit einem Eisenbrand und der Zerstörung des Transformators ist



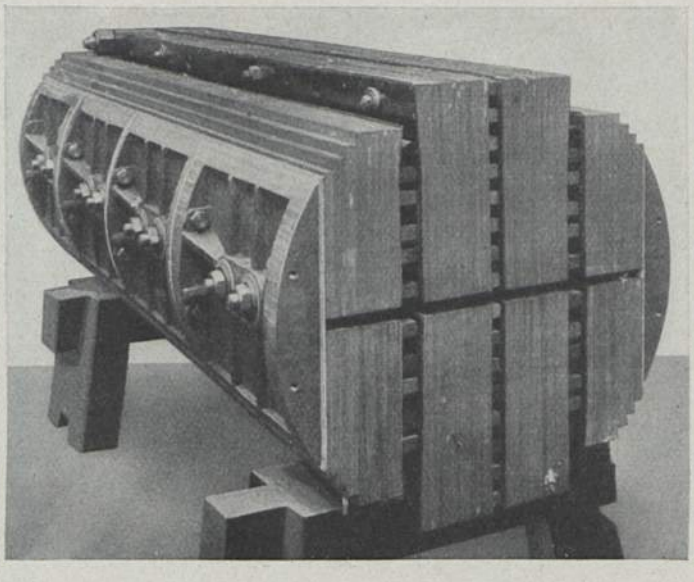
751. Neuere Art der Blechverspannung

Nur ein einziger Bolzen. Kurzschluß und Eisenbrand unmöglich

der Schwalbenschwanzform besondere Belastungsversuche, wie Bild 733 zeigt. Der Schwalbenschwanz wird sowohl von oben wie von der Seite Pressungen bis zu 1000 Kilogramm pro Quadratzentimeter, d. h. einem Druck bis zu 1000 Atmosphären, unterworfen und sein Verhalten bei dieser Beanspruchung genau studiert.

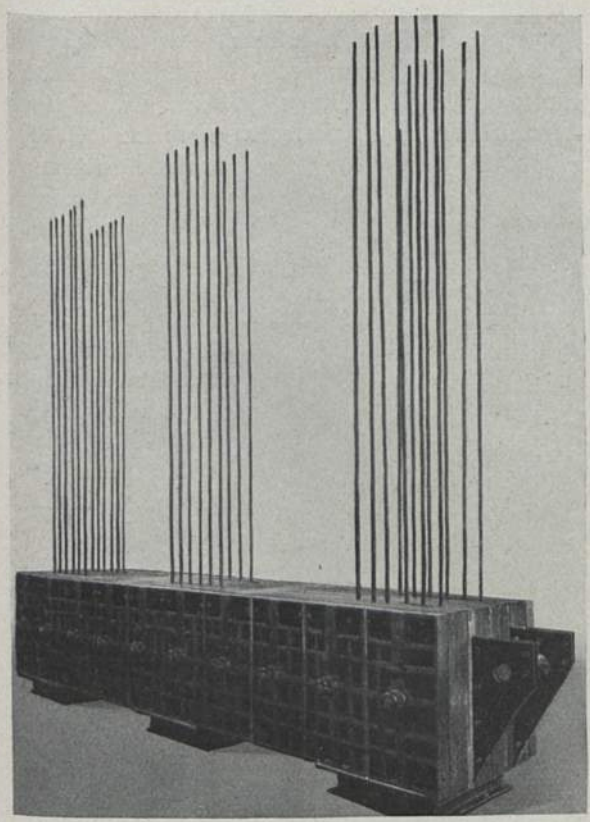
Für höhere Tourenzahlen, wie sie beispielsweise schnellaufende Wasserturbinen erfordern, behält man zwar die Form eines Polrades mit einzelnen Polen bei, aber das Ganze wird aus einem einzigen Stahlgußstück gefertigt, wie Bild 730 es veranschaulicht. Hier müßte die Fliehkraft schon imstande sein, den einzelnen Pol in seinem ganzen Querschnitt abzureißen, wenn wirklich eine Explosion eintreten soll.

Aber bei den höchsten vorkommenden Umdrehungszahlen, namentlich beim Antrieb durch Dampfturbinen, versagt auch diese Form. Bei Tourenzahlen von etwa 800 an aufwärts bleibt nichts anderes übrig, als für den Läufer die Körperform größter Drehfestigkeit, d. h. die einfache Walzen- oder Zylinderform zu wählen. Daß es auch möglich ist, eine derartige Walze so mit Gleichstromwicklungen zu belegen, daß sie an ihrem Umfange ausgeprägte Magnetpole zeigt, mag Bild 735 veranschaulichen, das einen zweipoligen Läufer der Firma Brown, Boveri & Cie. A.-G., Mannheim, darstellt. Der Läufer gehört zu einem Drehstromgenerator von 8000 Kilo-Volt-Ampere und ist für eine Drehzahl 3000 bestimmt. Man sieht in der Abbildung, wie eine Gruppe von Wicklungen die obere Hälfte des Zylinders umschlingt und in dieser einen von unten nach oben gerichteten Kraftfluß hervorruft, während eine zweite Wicklungsgruppe die untere Zylinderhälfte umgibt und diesen Kraftfluß noch verstärkt. Beachtenswert bleibt auch die Unterteilung der äußeren eisernen Läuferschicht in einzelne Scheiben, wodurch schädliche Wirbelströme unterdrückt werden und eine gute Ventilation unterstützt wird.



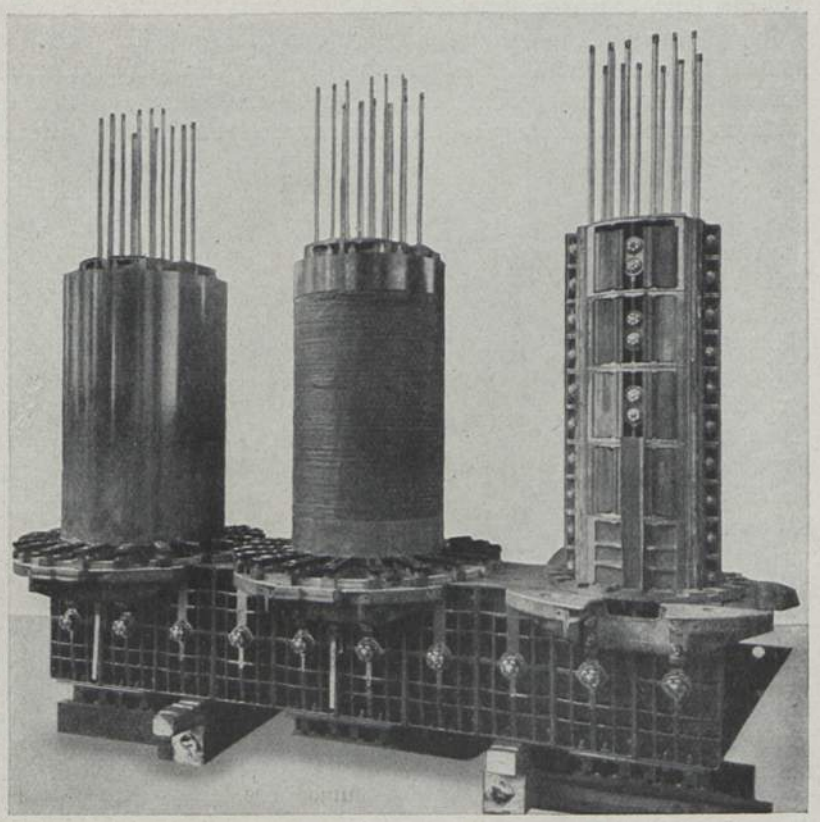
752. Schenkel eines Großtransformators,
nach dem im Bild 749 gegebenen Schema aufgebaut

Die Ventilation bleibt immer eine sehr wichtige Angelegenheit, denn die schönste Konstruktion wird zwecklos, wenn sich die Wärme während des Betriebes in unzulässiger Weise in der Maschine staut und die Wicklungen verkohlen. Aber schließlich



753. Dreischenkliger Drehstrom-Transformator im Bau

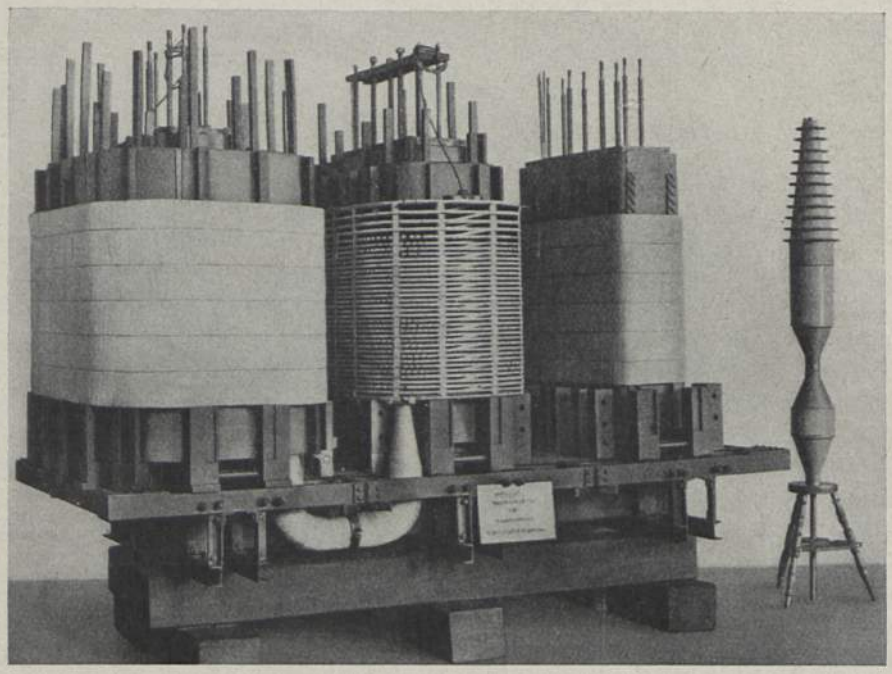
Das untere Joch ist vollendet. Aus ihm ragen die zahlreichen Zugstangen empor, die zur festen Verspannung der Joche und Schenkel dienen. AEG, Berlin



754. Dreischenkliger Drehstrom-Transformator im Bau

Rechter Schenkel: Durch hölzerne Paßstücke der Kreisform genähert. Mittlerer Schenkel: Innere Niedervoltspule montiert. Linker Schenkel: Gearzylinder über die Niedervoltspule gestülpt. AEG, Berlin

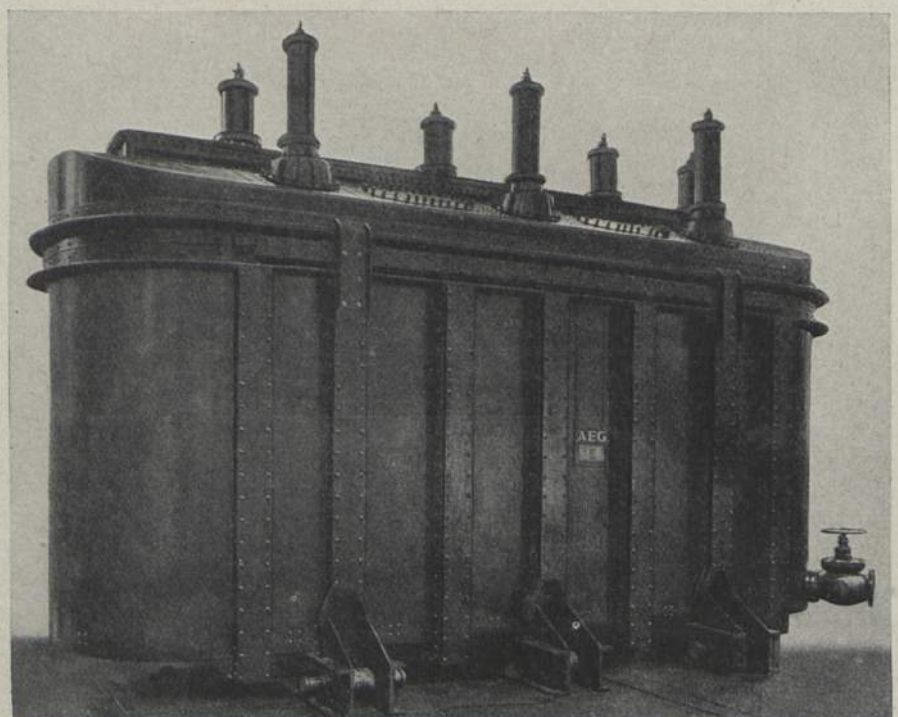
wirkt ja jeder rotierende Läufer wie eine Art Kreiselpumpe, die bestrebt ist, die Luft an der Achse von außen her einzusaugen und dann in radialer Richtung nach außen hin wegzuschleudern. Durch die Anlage geeigneter Kanäle kann man diese Wirkung bedeutend unterstützen und eine derartige Durchlüftung des rotierenden Läufers erzielen, daß jede gefährliche Erwärmung sicher unterdrückt wird. Dabei saugen die großen Generatoren entweder durch die eigene Ventilationswirkung oder auch mit Hilfe eines Zusatzventilators bis zu 100 Kubikmeter Luft in der Sekunde ein und geben sie erwärmt wieder ab. Um was für Wärmemengen es sich dabei handelt, mag aus dem Umstande erhellen, daß man diese warme Abluft in Wasserkraftwerken während des Winters zur Beheizung des ganzen Maschinenhauses benutzt und gewöhnlich ohne Zusatzheizung auskommt.



755. Baustadium eines dreischenkligen Drehstrom-Transformators der AEG, Berlin

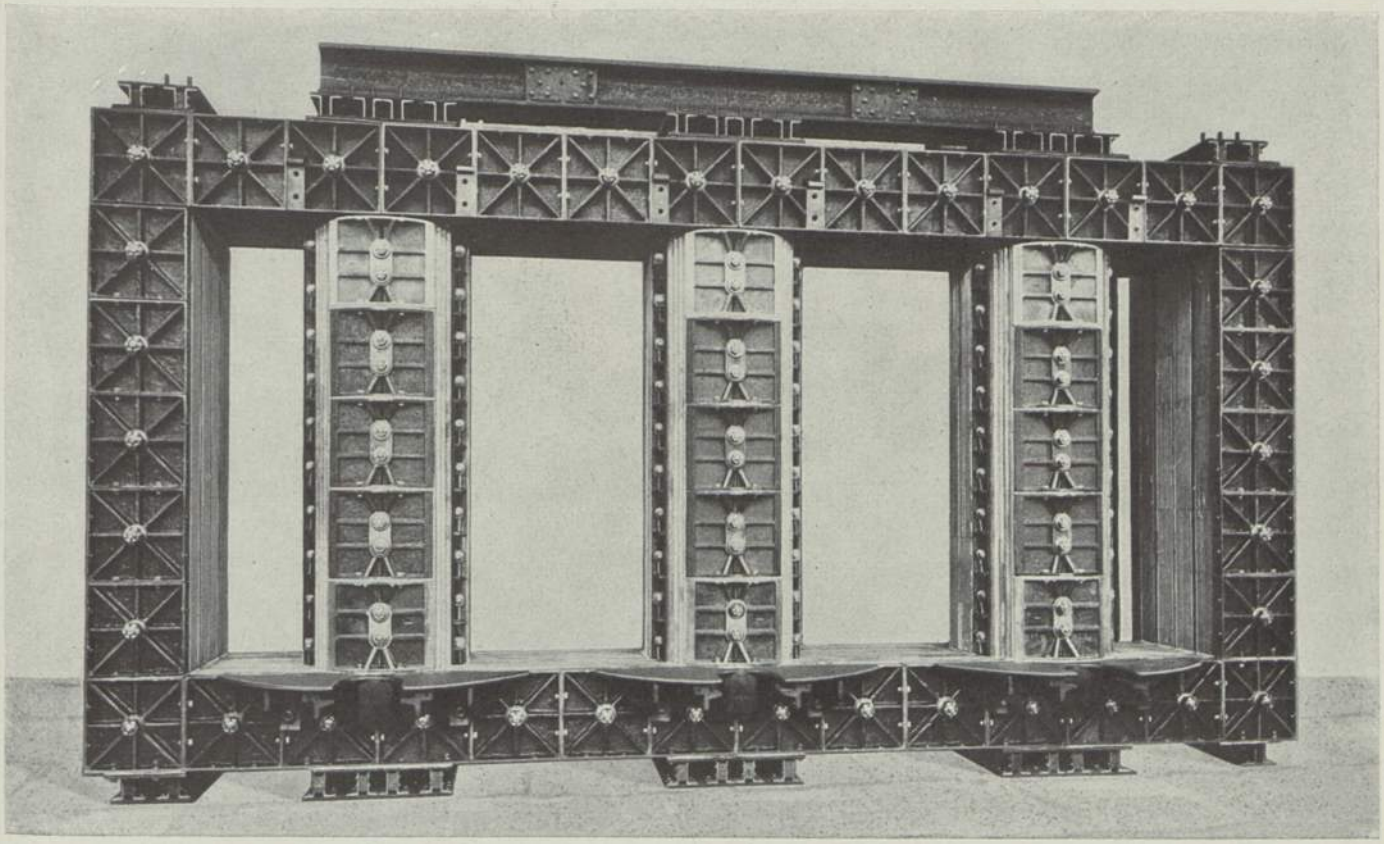
Rechter Schenkel: Innere Hälfte der Niedervoltwicklung. Mittlerer Schenkel: Hochvoltwicklung. Linker Schenkel: Äußere Hälfte der Niedervoltwicklung

Im folgenden soll nun der Bau der größten Maschinen für 25 000 Pferdestärken im einzelnen verfolgt werden. Die Fabrikation beginnt mit der stählernen Achse, die ein Schmiedestück von größten Abmessungen ist. Bei einer ungefähren Länge von fast 9 Metern und einem Gewicht von 36 Tonnen hat sie in ihrem mittleren Teil einen Durchmesser von 1200 Millimetern. Diese Welle wird auf der Drehbank zunächst genau rund und in ihren verschiedenen Teilen auf die verschiedenen Durchmesser gedreht und geschliffen. Danach kommt sie auf eine Fräsbank (Tafel XXIII, 1), auf der in dem mittleren Teil der Welle Längsnuten eingefräst werden, so daß dies Stück äußerlich beinahe an ein Zahnrad erinnert. Diese Nuten sind aber die Hauptventilationskanäle, durch welche die Frischluft von den beiden Wellenenden her in die Maschine einziehen soll. Ihr Querschnitt verjüngt sich nach der Wellenmitte zu. Die zwischen ihnen stehenden Stege haben dagegen über die ganze Wellenlänge genau den gleichen Durchmesser. Auf die so vorbereitete Welle wird nun der stählerne Läuferkörper weiter aufgebaut. Da es sich beim Läufer ja um Gleichstrom und eine gleichbleibende Magnetisierung handelt, kann Stahl genommen werden. Aus Festigkeitsgründen muß bester und zähester Stahl gewählt werden. Eine Unterteilung dieses Stahlkörpers in einzelne Scheiben von etwa 12 Zentimeter Stärke erfolgt aus mehr als einem Grunde. Unter anderem, weil man diese einzelnen Scheiben viel besser durchschmieden kann als etwa eine zusammenhängende Walze. Dabei treten bei der Bearbeitung der einzelnen Scheiben auf der Drehbank alle etwaigen Materialfehler auch mit untrüglicher Deutlichkeit zutage, so daß man gewiß ist, auf diese Weise einen Drehkörper größter Festigkeit zu gewinnen. Die einzelnen fertig bearbeiteten Stahlscheiben werden dann auf die vorgearbeitete Welle aufgeschrumpft, d. h. in erhitztem und dementsprechend ausgedehntem Zustande aufgeschoben, so daß sie nach dem Erkalten unverrückbar festsitzen (Tafel XXIII, 2).

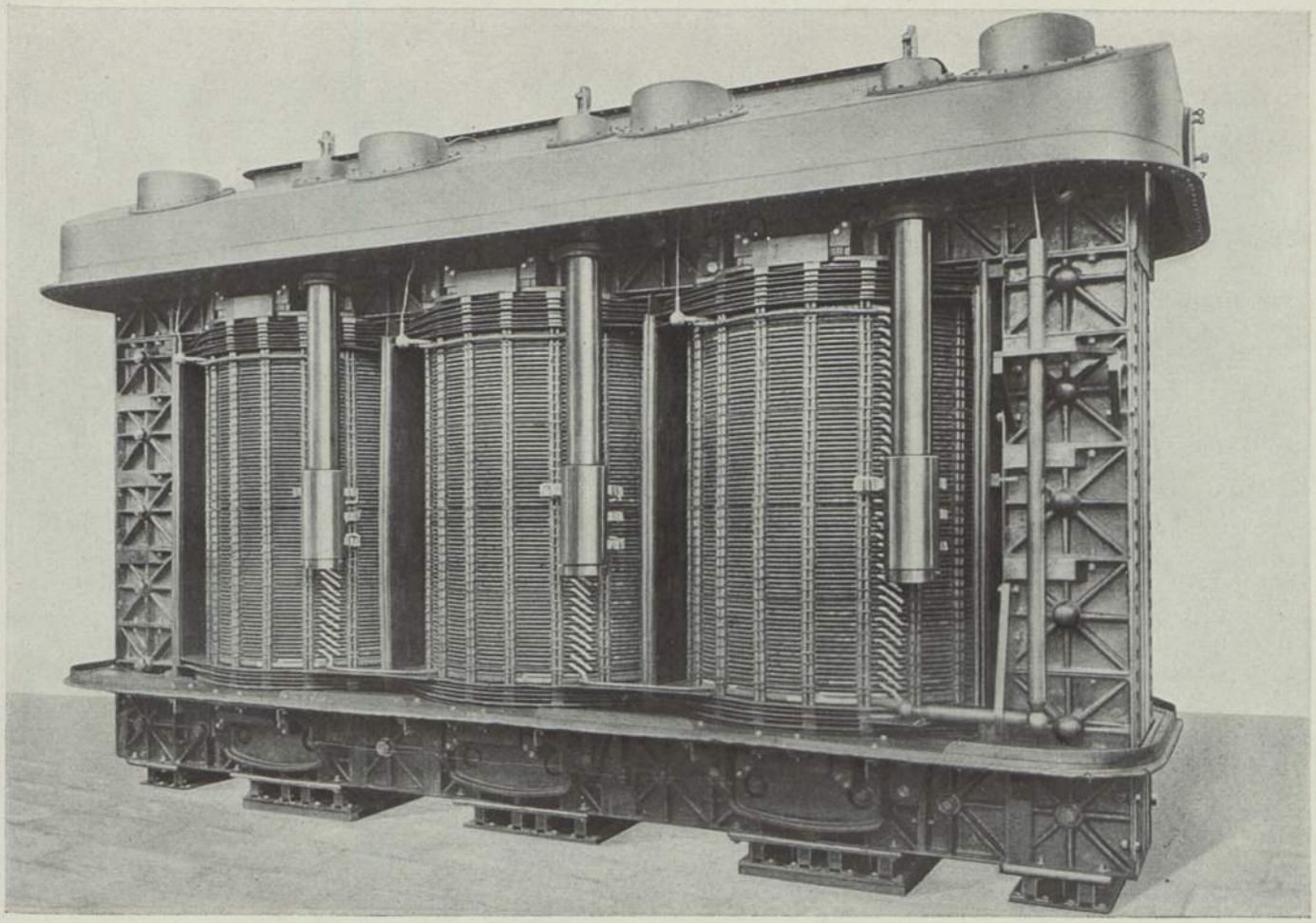


756. Der fertige Transformator im Ölkasten

Die Bilder dieser Tafel veranschaulichen die einzelnen Stadien des Baues eines Rotors der großen Generatoren, die von der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft für das Walchenseewerk geliefert wurden. Die Bilder 721, 736, 737 und Bild 7 auf Tafel XXIV zeigen den Bau einer ähnlichen Maschine von 60 000 Kilo-Volt-Ampere Dauerleistung bei

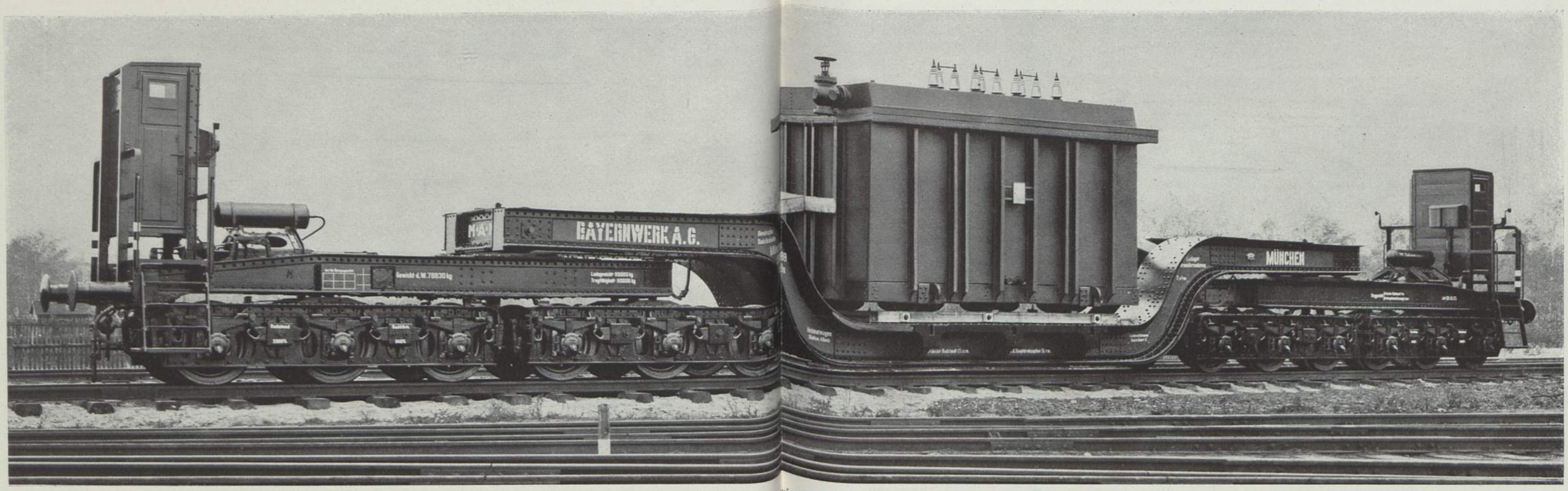


1. Eisenkörper eines fünfschenkligen Drehstrom-Transformators für 30 000 Kilo-Volt-Ampere. Zum besseren Ausgleich des magnetischen Flusses besitzt der Transformator außer den drei mittleren Schenkeln, welche die Wicklungen der drei Drehstromphasen tragen, noch zwei äußere unbewickelte Schenkel. AEG, Berlin

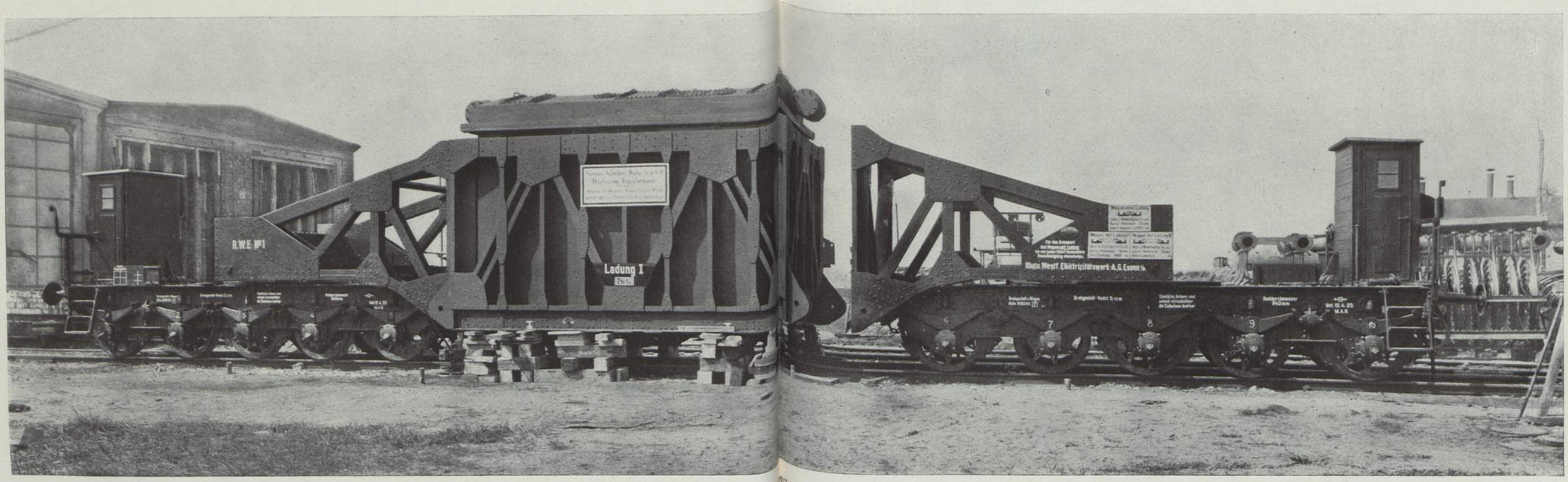


2. Baustadium eines fünfschenkligen Drehstrom-Transformators der AEG für 30 000 Kilo-Volt-Ampere

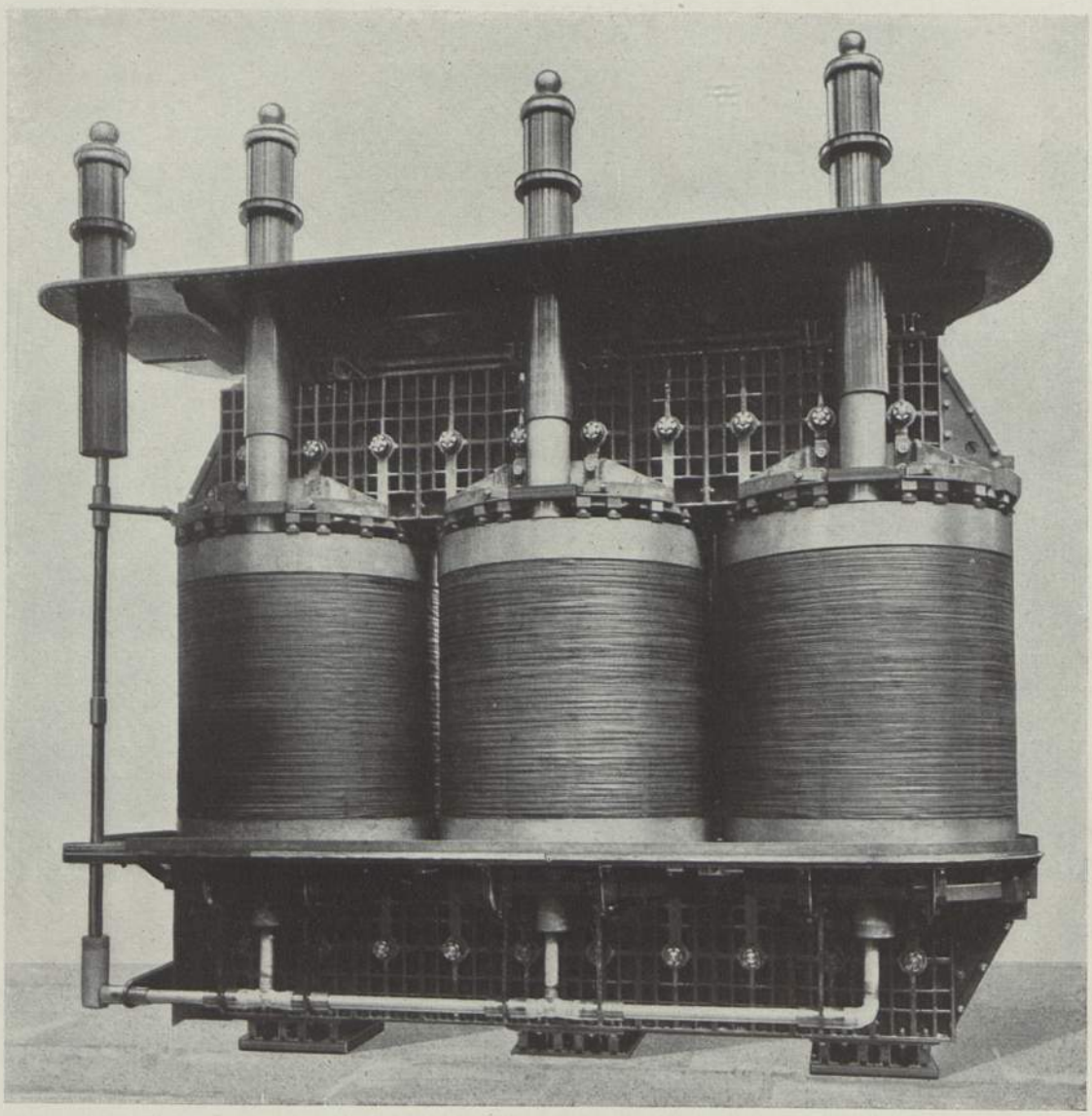
## Transformatorenbau



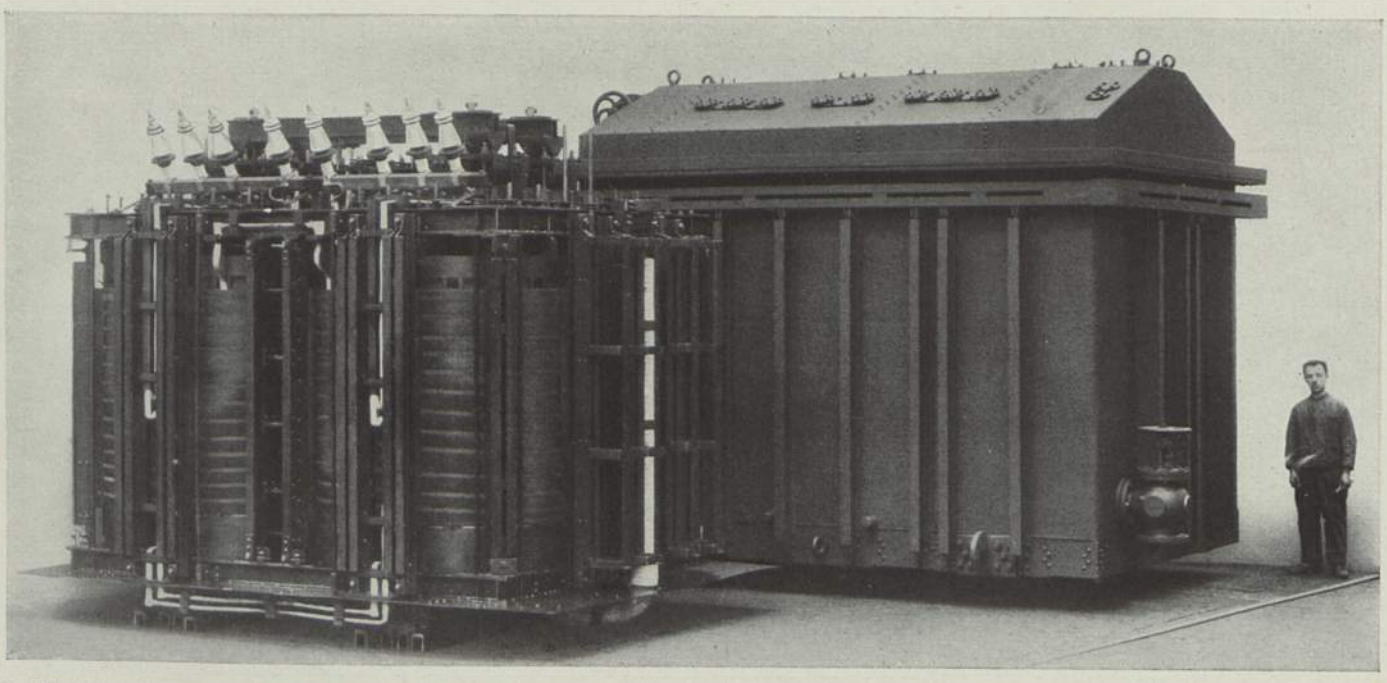

3. Transport eines Großtransformators auf einem Spezialwagen der Bayernwerk A.-G. Die Last verteilt sich auf 12 Achsen. Wagengewicht: 78 Tonnen. Ladegewicht: 110 Tonnen. Durchschnittliche Achsbelastung: 15,5 Tonnen




4. Käfigtransport eines Transformators der Siemens-Schuckertwerke. Der Ölkessel des Transformators ist als tragfähiges Fachwerk ausgebildet. Zum Transport werden rechts und links zwei schwanzartige Eisenfachwerke angekoppelt, durch die sich das Gewicht der ganzen Last auf zwei fünfachsige Transportwagen verteilt



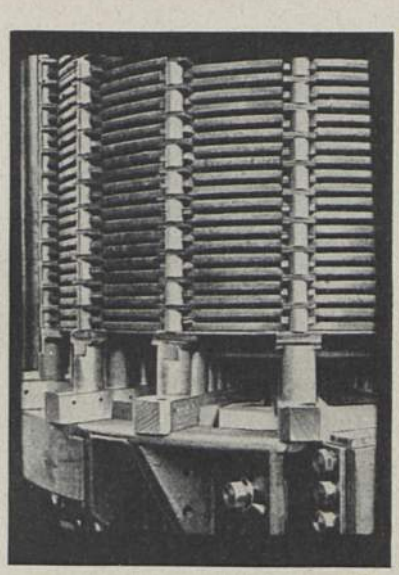
5. Großtransformator der AEG mit kompletter Wicklung und Ausleitungen



6. Einphasen-Wechselstrom-Transformator der Siemens-Schuckertwerke für 5000 Kilo-Volt-Ampere, 17 250 Volt Niederspannung, 115 000 Volt Hochspannung, für die elektrische Bahn Murnau—Pasing—München. Links: der zum Einbau fertige Transformator, rechts: der zugehörige Ölkessel

1000 Umdrehungen und einer Klemmenspannung von 7000 Volt, die von den Siemens-Schuckertwerken für das Großkraftwerk Goldenberg der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätsgesellschaft erbaut wurde. Die Ähnlichkeit dieser beiden Maschinen läßt wohl erkennen, daß man auch bei diesen größten Typen bereits zu gewissen Normalausführungen gekommen ist.

Die ausgeschmiedeten, noch unbearbeiteten Stahlplatten der Siemensmaschinen wogen rund 60 000 Kilogramm. Bild 736 zeigt zwei dieser vorgedrehten Ringe, Bild 737 die weitere Bearbeitung mit Hilfe aufgesetzter Bohrlehren. Zum Aufschrumpfen der einzelnen Läuferplatten wurde die Welle senkrecht aufgestellt. Für das Niederlegen des nach dem Aufschrumpfen 76 000 Kilogramm schweren Läufers war eine besonders kräftige Hilfsvorrichtung notwendig.

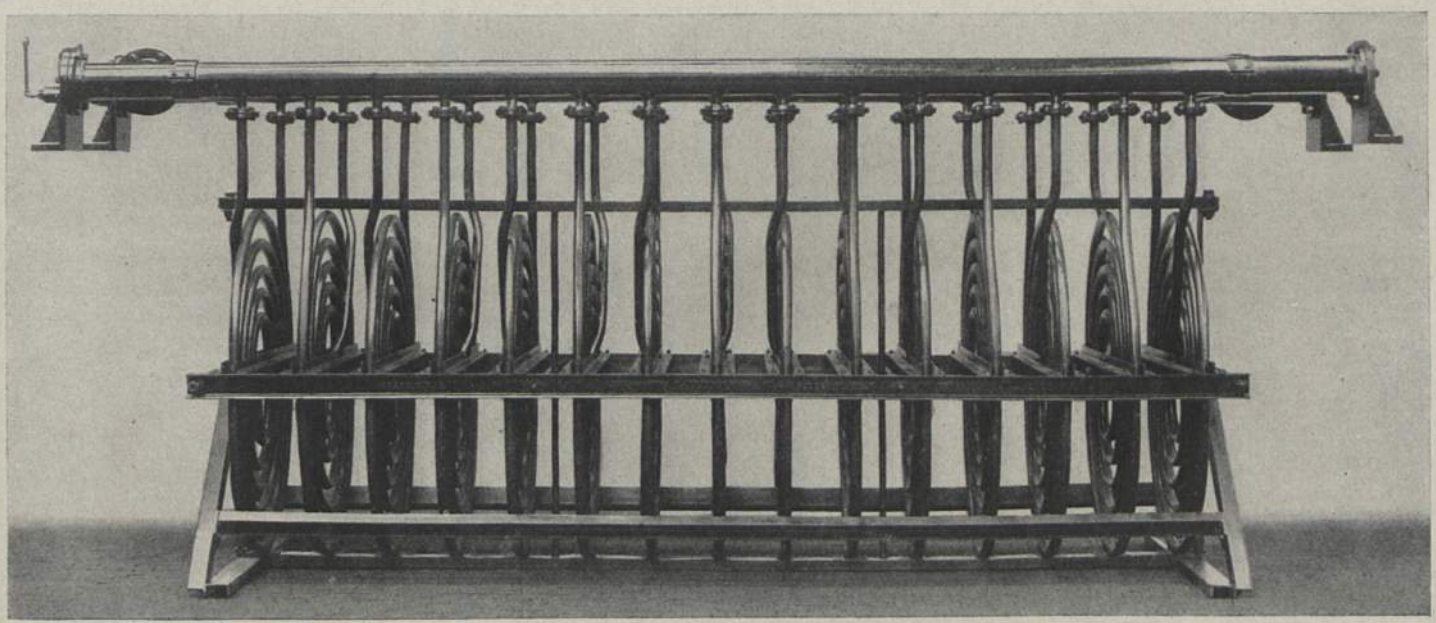


757. Druckfreie Abstützung einer Hochvoltwicklung durch Gearstangen und Gearpaßstücke

Bild 3 auf Tafel XXIII zeigt den Läufer der Walchensee-Maschine im nächsten Stadium der Bearbeitung auf der Fräsbank. Die aufgeschrumpften Stahlringe erhalten hier schwalbenschwanzförmige Nuten zur Aufnahme eines äußeren, die Kupferwicklungen umhüllenden Stahlmantels. Dieser Mantel (Tafel XXIII, 4) setzt sich aus 1500 einzelnen aus hochwertigstem Stahl geschmiedeten Formstücken zusammen, die mit dem Fußstück genau in die Schwalbenschwanznuten des Läufers passen und ihrerseits halbgeschlossene Nuten für die Aufnahme der Kupferwindungen bilden. Dabei ist die Anordnung so getroffen, daß man die Kupferwindungen mit Hilfe von Schablonen vollkommen fertigmachen und auf den Läufer aufbringen kann, und dann erst aus den stählernen Formstücken die äußerste Läuferschicht aufbaut, wie Bild 5 auf Tafel XXIII zeigt. Über den Kupferwindungen werden die Nuten dieses äußersten Mantels dann durch Stahlkeile fest verschlossen. Weiter werden die in Bild 5 auf Tafel XXIII noch sichtbaren Enden der Wicklung, die eines besonderen Schutzes gegen die Zentrifugalkraft benötigen, durch aufgeschrumpfte stählerne Schutzkappen bedeckt.

Bild 738 gibt eine Etappe aus dem Werdegang des Ständers eines großen Drehstrom-Generators in den Werkstätten der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft. Es zeigt die obere Ständerhälfte mit den eingebrachten Stabwicklungen aus starken Kupferschienen, in denen bei voller Belastung Ströme von mehreren tausend Ampere fließen. Bild 739 veranschaulicht das Einlegen der vorgeformten Spulen in den Ständer eines kleineren Drehstrom-Generators im Dynamowerk der Siemens-Schuckertwerke (vgl. auch Tafel XXIV, 3 und 5).

Während der Läufer, in dessen Wicklung nur Gleichstrom fließt, gegen Foucault-Ströme nicht besonders geschützt zu werden braucht, muß das aktive Eisen des Ständers in der bekannten Weise aus 0,5 Millimeter starken Dynamoblechen aufgebaut werden. Bild 741 zeigt eine Papierklebemaschine aus den Werkstätten von Brown, Boveri & Cie., welche die Blechbahnen vollkommen selbsttätig mit feinstem Seidenpapier beklebt und ablegt. Bild 742 gewährt einen Blick in die Stanzerei dieser Firma. Hier werden die verschiedenen Blechformen aus den Tafeln ausgestanzt. Bild 740 zeigt zwei derartige Stanzstücke. Im allgemeinen soll das aktive Eisen jeder Elektromaschine einen möglichst massiven Block bilden, der eben nur durch die Seidenpapierschichten elektrisch unterteilt ist. Zu dem Zweck werden die Blechpakete sogar hydraulisch zusammengepreßt. Für die Ventilation sind aber in gewissen Abständen Luftschlitze erforderlich. Man erhält sie, indem die Bleche einer Schicht mit angeschweißten Preßfingern versehen werden, wie das an dem unteren in Bild 740 dargestellten Blech ersichtlich ist. Bild 1 auf Tafel XXIV zeigt den Aufbau des aktiven Eisenkörpers eines

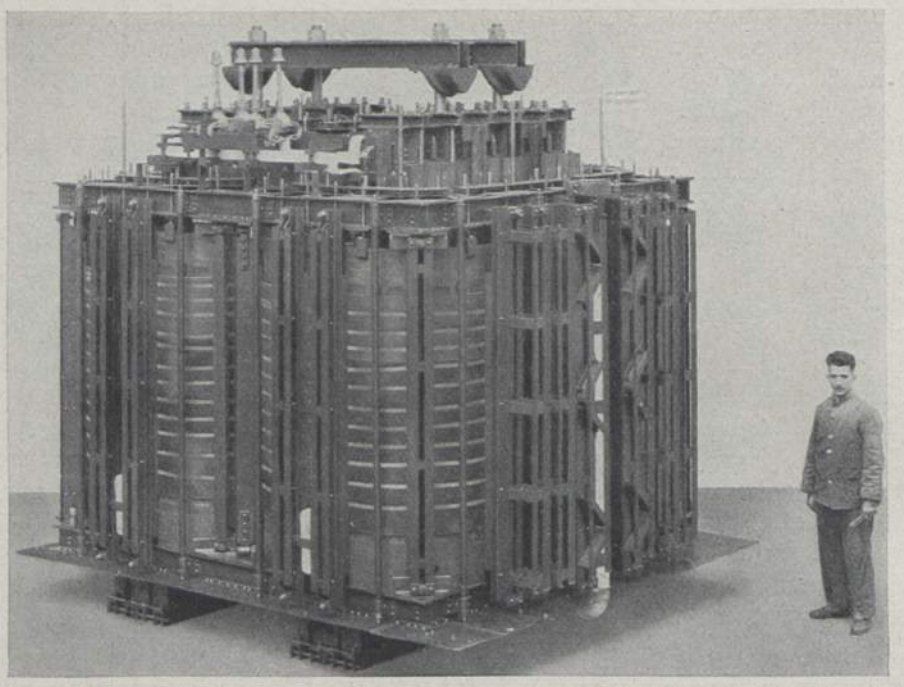


758. Kühlschlange für Außenkühlung

Die Kühlschlange steht in kaltem Wasser. Eine Kreiselpumpe saugt das Öl aus dem Transformatorkasten, treibt es durch die Schlange und wirft es gekühlt in den Kasten zurück

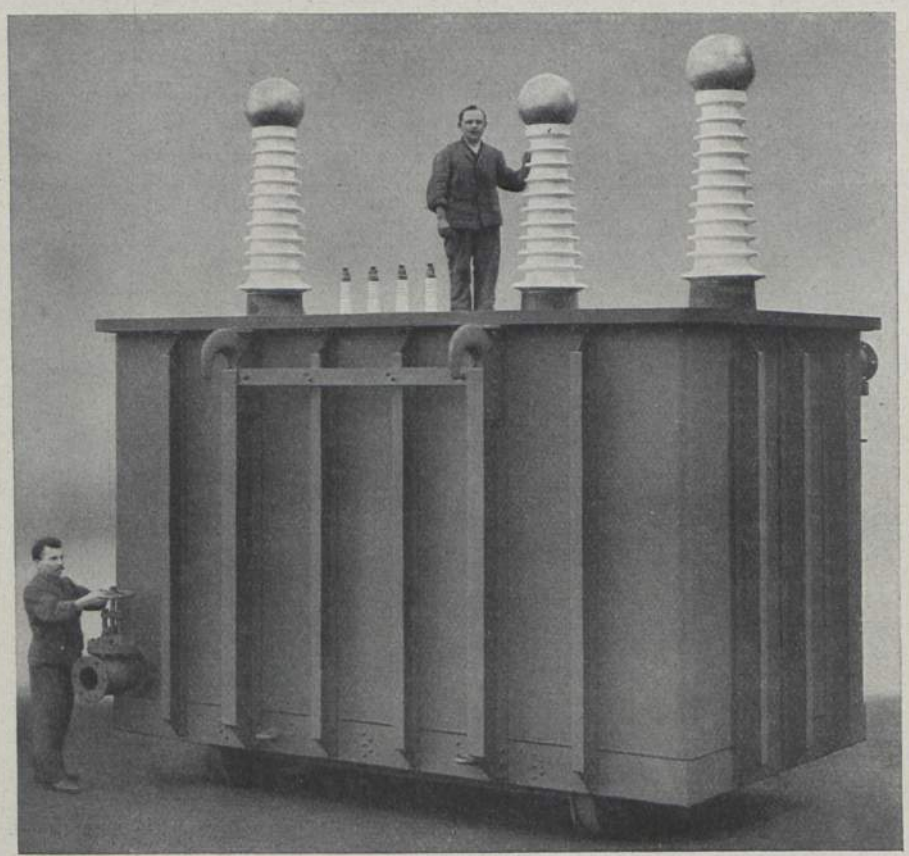
großen Ständers. Da die einzelnen Bleche auf geringe Bruchteile eines Millimeters genau ausgestanzt sind und über Führungsstangen geschoben werden, ergeben sie nach der Fertigstellung einen Eisenkörper, der genau die gewünschte Form hat und keiner weiteren Nachbearbeitung auf Werkzeugmaschinen mehr bedarf.

Es folgt nun das Einbringen der Spulen, die entweder von der Seite her eingeschoben oder bei offenen Nuten (Tafel XXIV, 2) von oben her eingelegt werden. Danach werden die Nuten durch Keile aus isolierendem Material verschlossen.



759. Einphasen-Wechselstrom-Transformator für 10 650 Kilo-Volt-Ampere
für die elektrische Bahn München-Garmisch

Da die Spulen eines Hochspannungsgenerators gegen das eiserne Gestell Spannungsunterschiede bis zu mehreren tausend Volt aufweisen, müssen sie bereits bei ihrer Herstellung aufs sorgfältigste isoliert werden. Zu dem Zweck werden die einzelnen Leiter umbandelt, und zwar in den geraden Teilen, die in das Eisen zu liegen kommen, mit Glimmerleinen, an den gekröpften Teilen gewöhnlich mit Papier- oder Baumwollband. Die so vorbereiteten Spulen werden dann bei Luftleere und erhöhter Temperatur vollkommen getrocknet und in ein heißes Bad flüssiger Isoliermasse getaucht. Danach kommen sie zum Pressen, wo sie zwischen geheizten Preßbacken auf den genauen Querschnitt gepreßt werden und gleichzeitig das überschüssige Imprägnierungsmittel entfernt wird. Die so vorbereitete Spule erhält dann die äußere Isolation, die an den geraden Schenkeln aus einer Umpressung mit Mikanit und an den Spulenköpfen aus einer mehrfachen Umbandelung mit Lackband besteht. Die Mikanitisolierung wird mit elektrisch geheiztem Eisen buchstäblich aufgeplättet, so daß die geraden Spulenteile danach haargenau in die Ständernuten hineinpassen. Vor dem Einlegen kommt jede so hergestellte Spule auf den Prüfstand, wo sie mit dem Doppelten der künftigen Betriebsspannung erprobt wird.



760. Fertig zusammengebauter Drehstrom-Öltransformator der Siemens-Schuckertwerke
für 10 000 Kilo-Volt-Ampere, 5000 Volt Niederspannung und 110 000 Volt Hochspannung

Die vorstehenden Ausführungen und Abbildungen dürften den Beweis erbracht haben, daß der Bau von Stromgeneratoren und Elektromotoren aller Art heut eine große und in allen Einzelheiten vorzüglich durchgebildete Abteilung des allgemeinen Maschinenbaues darstellt. Diese Technik beherrscht heute die oft bis an die Grenze der Leistungsfähigkeit des Baustoffes gehenden mechanischen Kräfte vollkommen sicher. In gleicher Weise wird sie aber auch mit den Stromwirkungen fertig, gleichviel, ob sich diese als Folgen der Stromstärke in Form freiwerdender Wärme äußern, oder ob sie von der elektrischen Spannung herrühren, die in ständigem Kampf mit der Isolation liegt. Das Ergebnis dieser Technik sind Maschinen mit vorzüglichem Wirkungsgrad, die Jahrzehnte hindurch ohne Betriebsstörung ihren Dienst zu verrichten vermögen.

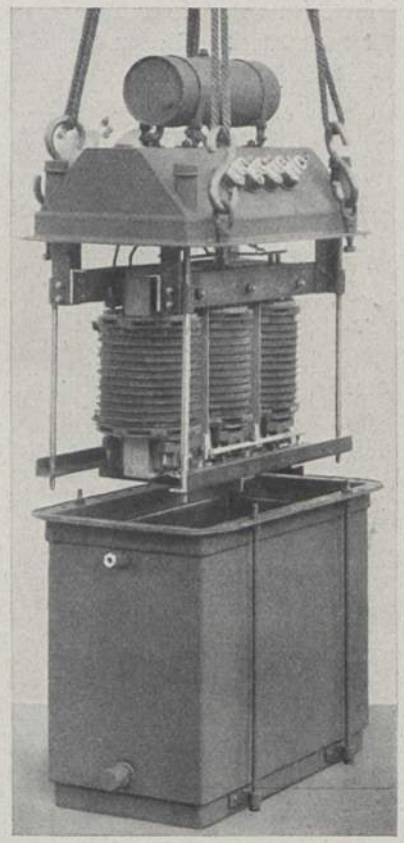
*

Ein anderes großes Arbeitsgebiet der Starkstromtechnik bildet die Herstellung von Transformatoren und Schaltapparaten. Es wurde bereits bei der Theorie des Transformators

(S. 392 u. 393) ausgeführt, daß er nur ruhende Teile besitzt. Im Gegensatz zum Elektromaschinenbau braucht sich daher der Transformatorenbau nicht mit der Beherrschung dynamischer, d. h. aus der Bewegung herstammender, Kräfte abzugeben. Desto mehr muß seine Technik auf die Meisterung elektrischer Wirkungen, insbesondere elektrischer Spannungen gerichtet sein, denn die neuzeitlichen Transformatoren enthalten auf kleinem Raum Spannungsunterschiede, die in den extremsten Fällen bis zu einer Million Volt gehen. Für solche Spannungen ist aber die Luft kein Isolator mehr, und auch die meisten übrigen Isolierstoffe können ihnen nicht widerstehen. Es bedarf ganz besonderer Maßnahmen und Baustoffe, um auch hier sichere Konstruktionen zu schaffen.

Der in der Starkstromtechnik heute fast ausschließlich verwandte Transformatorentyp ist derjenige des Kerntransformators, bei dem die Kupferspulen einen eisernen Kern umgeben, der zur Vermeidung von Foucault-Strömen ebenso wie das aktive Eisen der Wechselstrommaschine aus feinen voneinander isolierten Blechen aufgebaut wird. Die zweite Art, die des Manteltransformators, bei welchem umgekehrt das Eisen die Kupferspule umgibt (Bild 748), kommt seltener zur Anwendung, da sie größere fabrikatorische Schwierigkeiten bietet. Bild 745 gibt das Schema für einen einfachen Wechselstromtransformator des Kerntyps. Für Drehstrom mit seinen drei Phasen braucht man für jede Phase einen Kern (Bild 746). Auch hier werden die Kerne durch Joche zu einem geschlossenen Eisenkreis vervollständigt. Je nach der räumlichen Anordnung ergeben sich dabei die in Bild 746 und 747 schematisch gezeigten Typen.

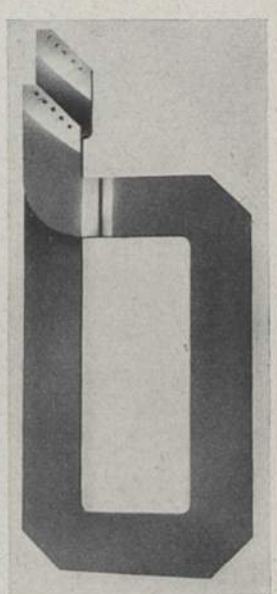
Ebenso wie die Elektromaschinen weisen auch die Transformatoren alle Leistungsgrößen von der kleinsten bis zur stärksten auf. Die Reihe beginnt etwa mit den kleinen allgemein bekannten Klingeltransformatoren für elektrische Hausklingelanlagen in Verbindung mit Wechselstromlichtnetzen. Diese Transformatoren haben Leistungen von drei bis acht Volt-Ampere. Sie endigt nach oben bei den Riesentransformatoren von je 60 000 Kilo-Volt-Ampere oder 60 Millionen Volt-Ampere, von denen je einer bestimmt ist, die Leistung eines der im vorangegangenen Abschnitt besprochenen Großgeneratoren für die weitere Verteilung in die Höhe zu transformieren. Einen Klingeltransformator kann man bequem in die Tasche stecken. Welche Abmessungen die größten Transformatoren dagegen aufweisen, geht aus den folgenden Bildern hervor.



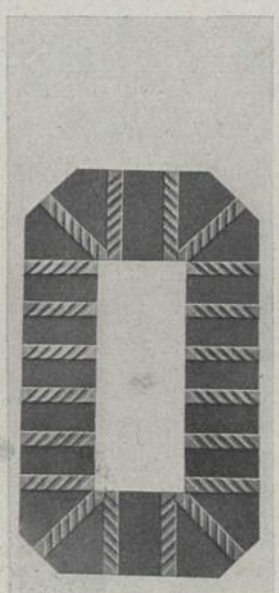
761. Einhängen eines kleineren Drehstromtransformators
von 20 Kilo-Volt-Ampere in seinen Olkessel Niederspannung 236 Volt. Hochspannung 15 000 Volt

Nachstehend soll im einzelnen der Bau eines Großtransformators der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft für eine Leistung von 30 000 Kilo-Volt-Ampere und eine Oberspannung von 110 000 Volt betrachtet werden. Die Arbeiten beginnen mit dem Aufbau des eisernen Kernes aus 0,5 Millimeter starken Blechen, die in üblicher Weise auf der einen Seite mit Seidenpapier beklebt sind. Zunächst ist die Entscheidung über die Schenkelquerschnitte zu treffen. Nun gibt man den Kupferwindungen aus fabrikatorischen und elektrischen Gründen eine kreisförmige Gestalt. Man könnte sie zwar auch wie die meisten Spulen der Elektromaschinen in Rechteckform wickeln. Aber bei einer solchen Formgebung ist der gegenseitige Druck der Drahtwindungen an den Ecken und die Beanspruchung der Isolation an diesen Stellen nie genau kontrollierbar. Da man es hier aber mit Höchstspannungen zu tun hat, müssen alle Unsicherheiten ausgeschaltet werden, und schon deshalb ist die runde Spulenform vorzuziehen. Dazu kommen weiter die elektrodynamischen Wirkungen des fließenden Stromes, die bestrebt sind, jede Rechteckspule zur Kreisform aufzubiegen. Namentlich bei den hohen Strömen gelegentlicher Kurzschlüsse, mit denen immer zu rechnen ist, könnten diese Kräfte solche Größen erreichen, daß keine Rechteckspule ihnen widerstehen würde. Die Spulenform des Großtransformators ist also gegeben, und die Form des Schenkelquerschnittes danach zu bestimmen. An und für sich ist eine möglichst vollkommene Ausfüllung des Spulenraumes mit aktivem Eisen erwünscht. Wollte man aber einen kreisförmigen Schenkelquerschnitt herstellen, so müßte jede der vielen Blechbahnen eine andere Breite erhalten als die benachbarten. Das wäre jedoch eine fabrikatorische Erschwerung, die gleichzeitig eine erhebliche Verteuerung bedeutete. Man zieht es daher vor, den runden Spulenraum durch einzelne Blechpakete von rechteckiger Form bestmöglich auszufüllen (Bilder 749 u. 752).

Aus diesen Bildern geht weiter hervor, daß der eiserne Schenkelquerschnitt noch in vier einzelne Blechpakete geteilt ist, die voneinander durch ziemlich breite Schlitze getrennt sind. Diese Unterteilung erfolgt einmal im Interesse einer möglichst kräftigen Ventilation, um die recht bedeutenden



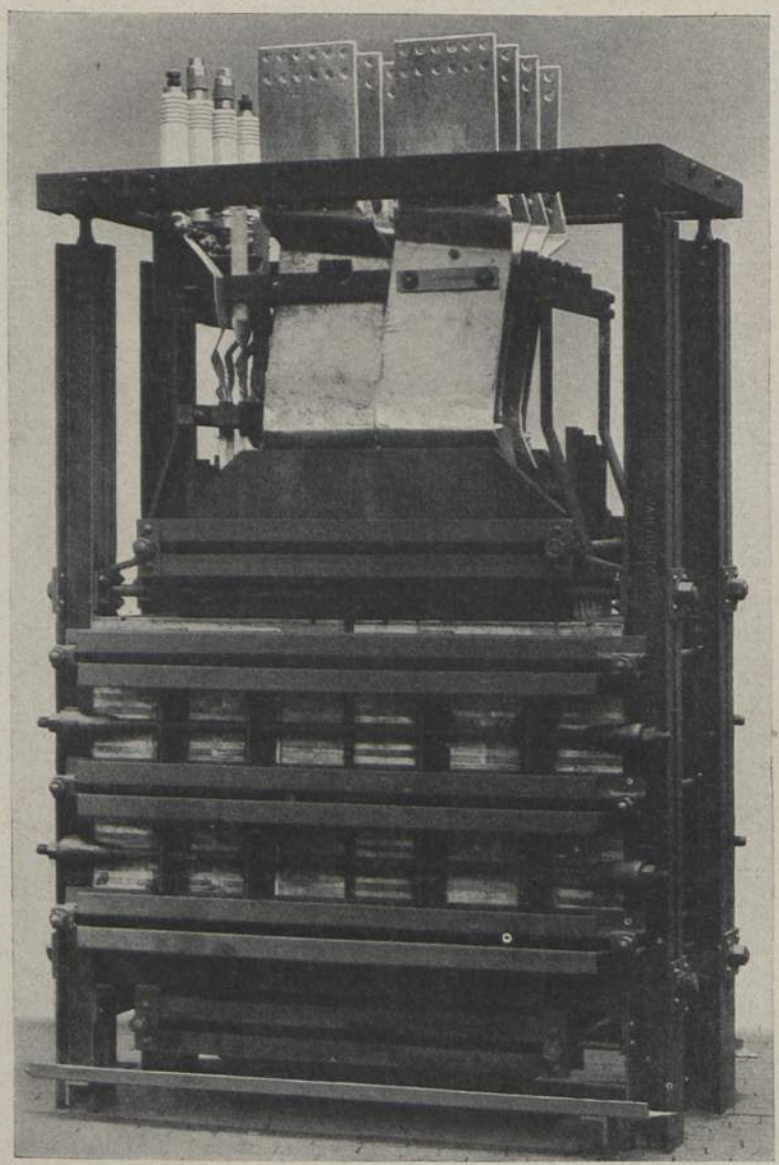
762. Blechspule für einen Manteltransformator für Ofenzwecke
Hochstromtransformator. Die Spule ist aus einer massiven Kupfertafel herausgeschnitten



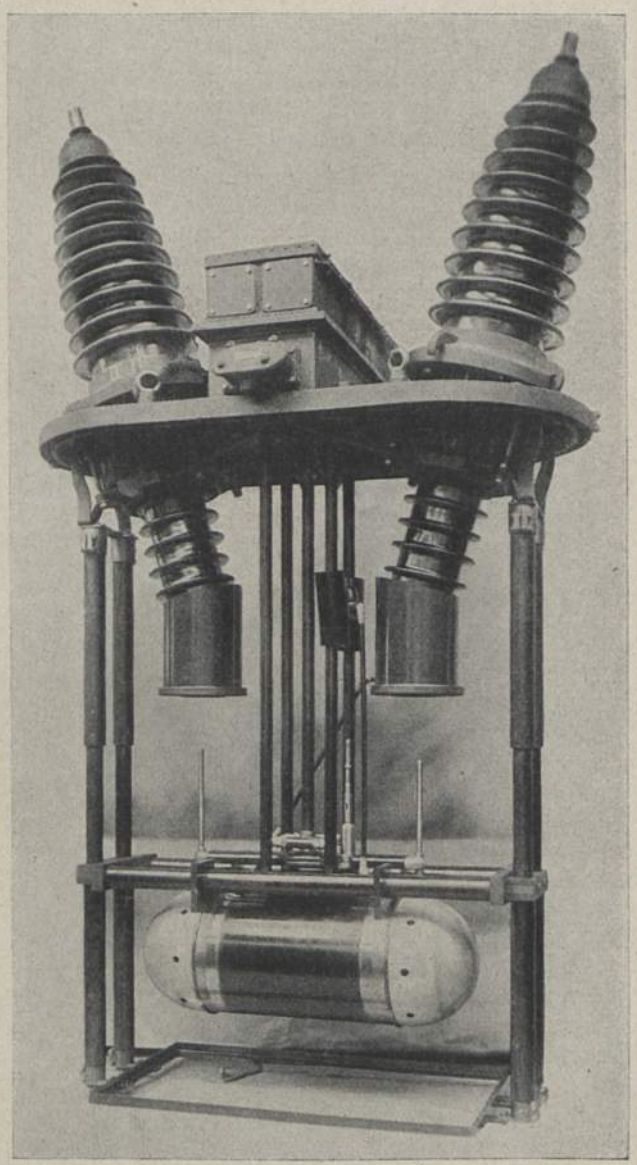
763. Preßspanscheibe
mit darauf befestigten Kanalleisten aus Hartholz mit eingefrästen Ringen für den Olumlauf. Diese Scheiben dienen zur Isolation der blanken Hochstromwindungen gegeneinander

Wärmemengen, die sowohl im Kupfer wie auch im Eisen entstehen, sicher abzuführen. Außerdem aber erreicht man damit eine unbedingt isolierende Unterteilung des Eisenpaketes, durch welche die hier so besonders große Gefahr der Eisenschlüsse bedeutend verringert wird. Man muß dabei im Auge behalten, daß ein leitender Schluß im Querschnitt des Schenkeleisens, der das Auftreten eines kreisförmigen Wirbelstromes gestattet, auch wenn das nur an einer einzigen Stelle geschähe, in kürzester Zeit zur Zerstörung des ganzen Transformators führen würde. Eine solche Stelle würde sofort hellrot aufglühen, der „Eisenbrand" würde weiterfressen, und die Katastrophe wäre da.

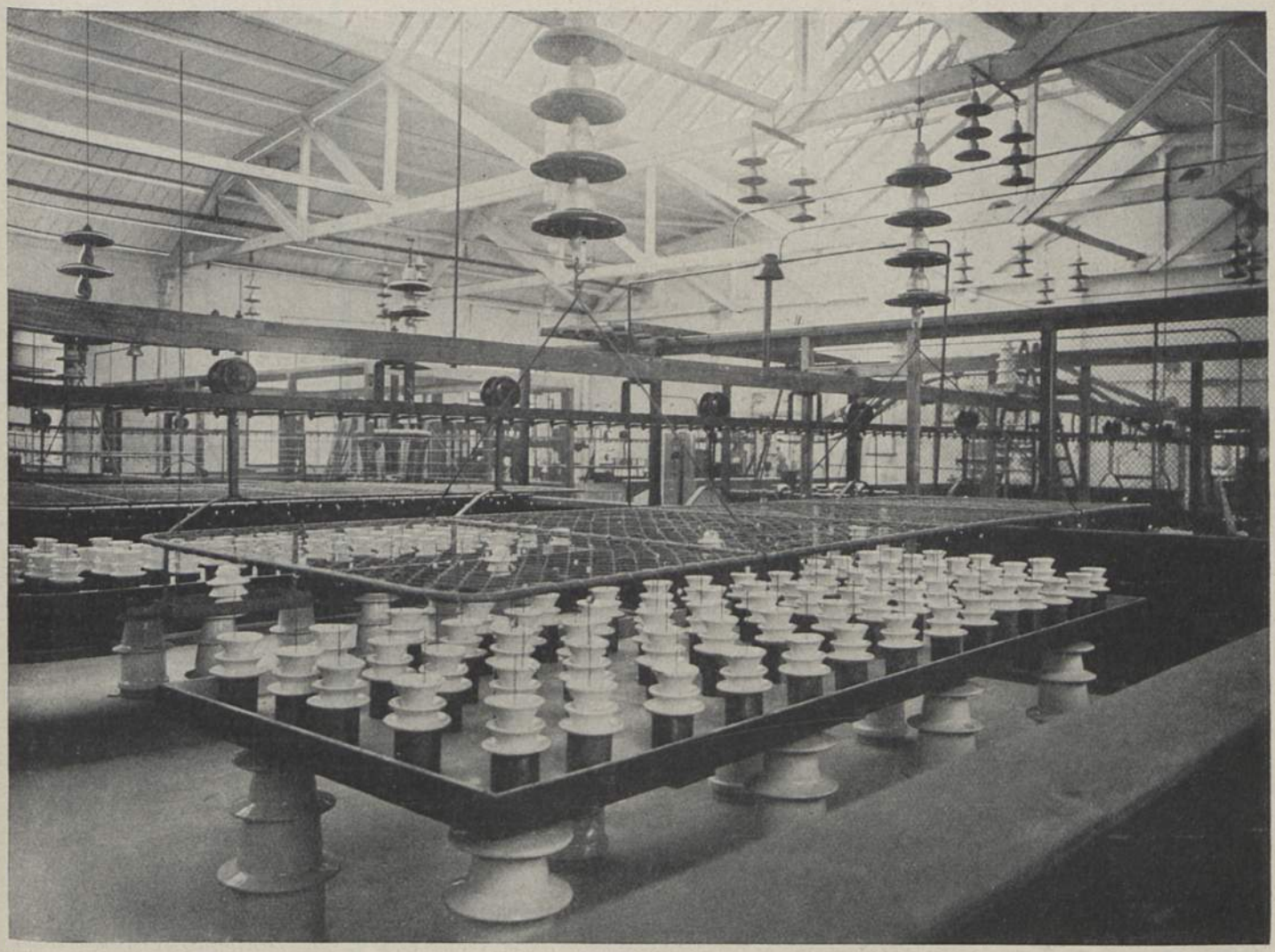
Während also leitende Verbindungen senkrecht zur Blechrichtung peinlich zu vermeiden sind, ist es andererseits notwendig, die Blechpakete der Schenkel und Joche mit großer Kraft in sich zusammenzuspannen, da sie anderenfalls unter der Stromwirkung schwingen und brummen würden. In früheren Jahren hat man diese Vereinigung der Bleche durch zahlreiche Zugbolzen bewerkstelligt, die selbstverständlich auf das sorgfältigste von dem aktiven Eisenkörper isoliert waren. Bild 750 zeigt die Vernietung der Jochbleche nach diesem älteren Verfahren. Das Loch, in welchem der einzelne Bolzen steckt, ist dabei mit einer Hülse aus Isolierstoff ausgekleidet, und die Schraubenmuttern mit ihren Unterlagscheiben liegen auf starken Platten aus Isoliermaterial. Die Zusammenpressung der Bleche ist dabei vollkommen. Sollte aber durch einen unglücklichen Zufall etwa der oberste und unterste Bolzen eines Querschnitts (Bild 750, rechts) mit dem aktiven Eisen Schluß bekommen, so wären verheerende Wirbelströme zu erwarten. Bei der neueren Bauart (Bild 751) nimmt man daher nur eine einzige in der Mittellinie des Joches gelegene Reihe von Zugbolzen. Diese pressen aber Bronzedruckplatten von großer Festigkeit zusammen, die über die ganze Blechbreite hin wirken. Auch hier ist das aktive Eisen in vier rechteckige Pakete geteilt, die durch Zwischenlagen eines mechanisch sehr widerstandsfähigen Isolierstoffes voneinander getrennt sind. Ebenso liegt zwischen den Bronzedruckplatten und dem Eisen Isolierstoff, und der Bolzen selbst ist durch eine Hülse isoliert. Die Bauart wird so durchgeführt, daß man Spannungen von



764. Einphasen-Manteltransformator für Ofenzwecke
Transformator ohne Kessel. 2000 Kilo-Volt-Ampere. Hochspannung 5000 Volt, Niederspannung 65 Volt. In der Niederspannungswicklung 28 700 Ampere. Bemerkenswert die Ausführung der beiden Pole der Hochstromwicklung nach oben in Gestalt je vier starker Kupferbleche



765. Ölschalter für 110 000 Volt ohne Ölkessel
Der Schalter ist geöffnet. Die beiden Schaltstifte befinden sich in dieser Stellung unten und nicht in den beiden unmittelbar an die Isolatoren angebauten Druckkammern, in denen die Schaltvorgänge vonstatten gehen

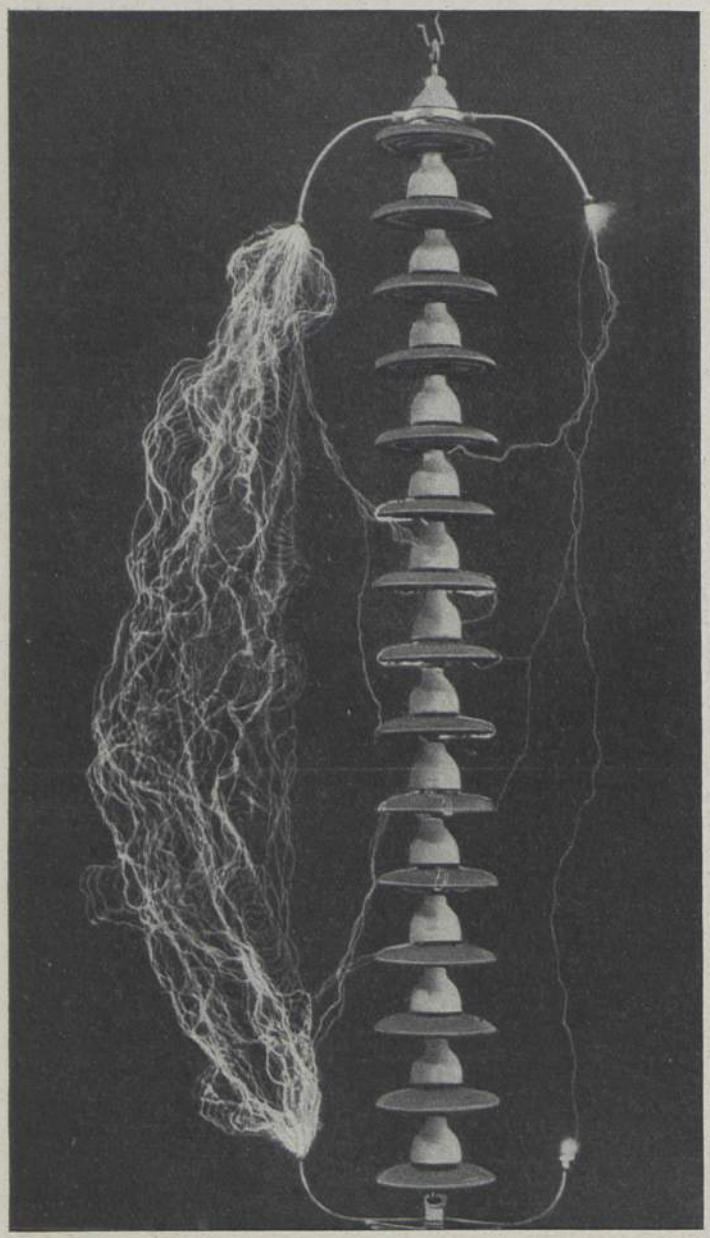


766. Massenprüfung von Isolatoren im Bottich
Porzellanfabrik der AEG in Hennigsdorf

mehreren tausend Volt sowohl an die benachbarten Bronzeplatten wie auch an eine derselben und das Eisen legen kann, ohne daß meßbarer Strom übergehen darf.

Wie sich ein nach diesem Verfahren aufgebauter Eisenkörper darstellt, zeigt Tafel XXV, 1. Es ist der Eisenkörper eines Drehstromtransformators der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft für 30 000 Kilo-Volt-Ampere. Außer den drei mittleren Schenkeln, welche später die Windungen aufnehmen, sind hier noch zwei weitere Schenkel vorgesehen, um einen bestmöglichen magnetischen Schluß der beiden Joche zu erreichen. Es genügt nun nicht, die Bleche in der Querrichtung zusammenzupressen, sondern es ist weiter auch notwendig, die Joche mit großer Gewalt gegen die Schenkel heranzuziehen, da sonst, wie bereits gesagt, ein Schwingen und Brummen des Eisenkörpers einsetzen würde, das schnell zur Zerstörung der ganzen Konstruktion führen müßte. Dies Zusammenpressen erfolgt durch starke stählerne Zugstangen, die der ganzen Länge nach in Isolierhüllen stecken und die Schlitze des Eisens in den Schenkeln und Jochen durchsetzen. Bild 749 läßt acht solcher Zugstangen in den Schlitzen eines Schenkels erkennen. Bild 753 zeigt diesen Zugstangenwald zum größten Teil noch freistehend bei einem im Bau befindlichen Transformator, von dem erst das untere Joch fertig ist. Ober- und unterhalb der beiden Joche greifen diese Zugstangen an kräftige Träger an und gestatten es, den ganzen Eisenbau mit solcher Gewalt zusammenzuschrauben, daß alle Vibrationen der Bleche unterdrückt werden.

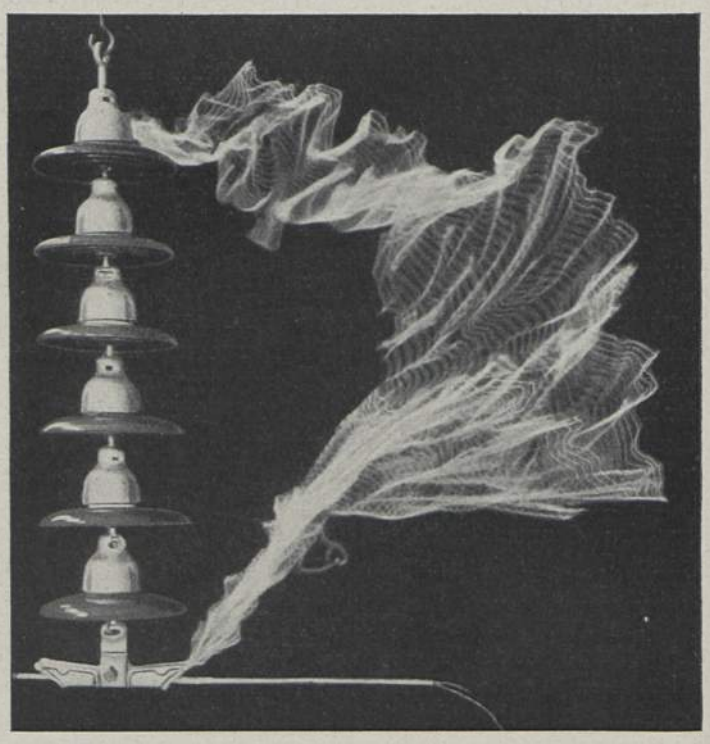
Das obere Joch kann naturgemäß erst endgültig aufgesetzt werden, wenn alle Wicklungen auf den Schenkeln untergebracht sind. Für Großtransformatoren der hier beschriebenen Art wählt man dabei die doppelt konzentrische Anordnung der Wicklungen. Der einzelne Schenkel bekommt dabei über seine ganze Länge zunächst die Hälfte der Niederspannungswicklung, danach die Hochspannungswicklung und dann die zweite Hälfte der Niederspannungswicklung. Bei den hier in Betracht kommenden großen Stromstärken — die Niederspannungswicklung führt 670 Ampere — besteht die Niederspannungswicklung aus einem mehrere Quadratzentimeter starken Kupferdraht von rechteckigem Querschnitt. Der Draht ist mit imprägniertem Papier isoliert und darüber stark mit Baumwolle umsponnen. Die fertiggewickelte Spule wird im Vakuum getrocknet und mit ölbeständigem Lack getränkt. Die ganze Spule liegt eng anschließend auf einem Hohlzylinder aus hochwertigem Isolierstoff und wird mit diesem über den Eisenkern gezogen. Vorher gibt man diesem Kern durch Ansetzen von Füllstücken aus besonders imprägniertem Holz einen möglichst kreisförmigen Querschnitt. Bild 754 zeigt diesen Teil des Baues. Der Schenkel rechts ist eben mit Holzstücken armiert. Der mittlere Schenkel trägt bereits den inneren Teil der Niederspannungswicklung. Bei dem linken Schenkel ist über diese



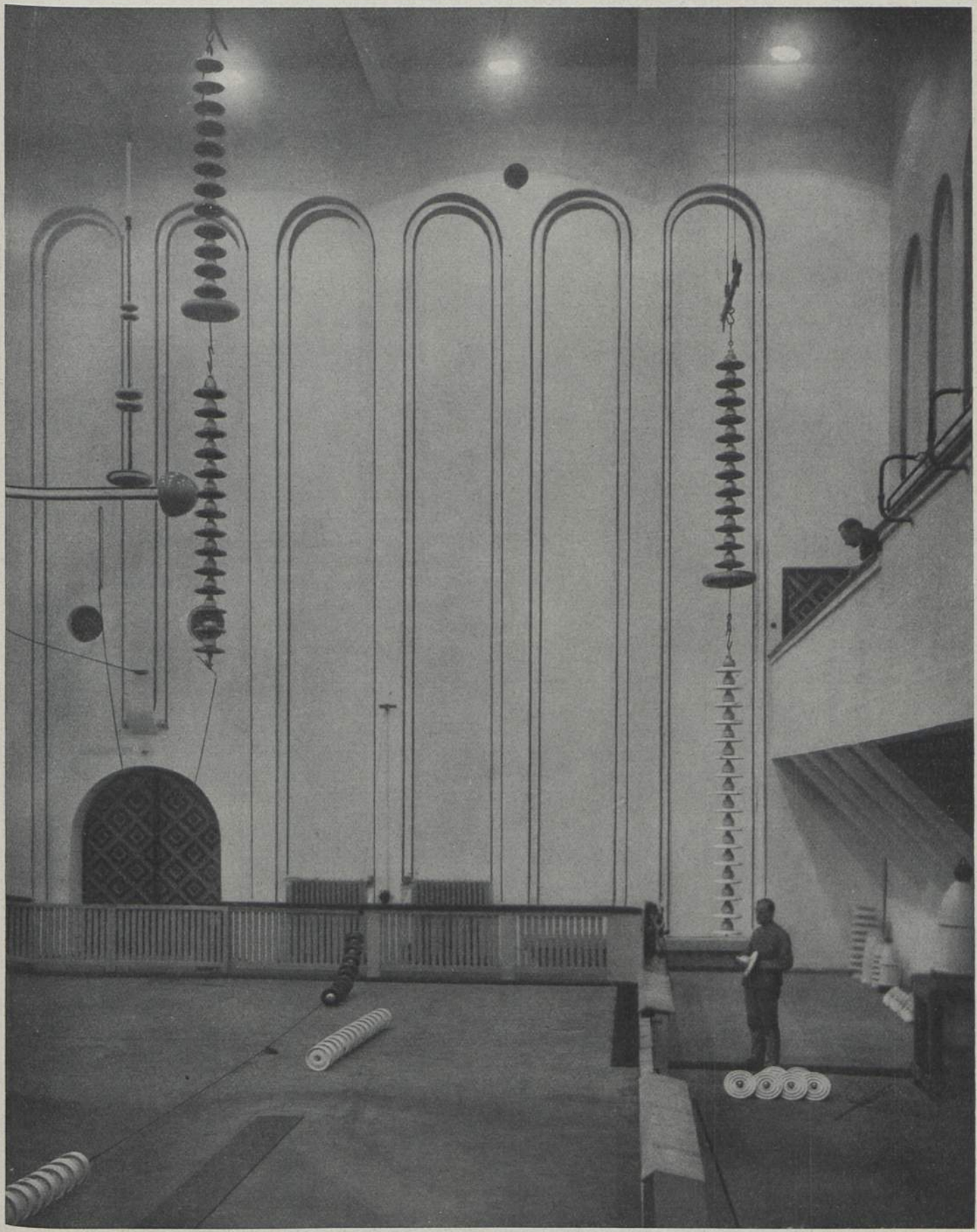
767. Trockenüberschlag bei 870 000 Volt und Windstärke von 3 m in der Sekunde an einer 15 gliedrigen Isolatorenkette mit Lichtbogenhörnern

Wicklung schon ein weiterer Hohlzylinder aus Gear, einem besonders hochwertigen Isolierstoff geschoben. Auf diesen Zylinder wird nun die Hochspannungswicklung aufgebracht. Sie besteht (Bild 757) aus einzelnen Scheibenspulen, die durch Abstützungen aus Gear vollkommen entlastet sind. Ohne diese Abstützung würden die Spulen unter ihrem eigenen Gewicht, das eine Last von vielen Zentnern darstellt, und infolge der gegenseitigen elektrodynamischen Anziehung im Laufe der Jahre in sich zusammensacken. Es folgt nun wieder auf jedem Schenkel ein weiterer Gearzylinder, der auf seiner äußeren Fläche den zweiten Teil der Niederspannungswicklung trägt (Bild 755), und damit ist die komplette Bewickelung aufgebracht. Jetzt wird das obere Joch aufmontiert, und die Enden der Hochspannungswicklung werden zu besonders spannungsfesten Ausführungsisolatoren geführt. Bild 5, Tafel XXV zeigt dies für einen Transformator mit Sternschaltung. Nach unten hin sind die drei Enden der drei Hochspannungswicklungen zusammengeschaltet, und dieser gemeinsame Verbindungspunkt, der Nullpunkt der Sternschaltung, ist zu dem Isolator ganz links geführt, die drei anderen Enden der drei Wicklungen zu den übrigen drei Isolatoren.

Bei kleineren Transformatoren mit verhältnismäßig geringen Spannungen genügt eine gute Isolation der verschiedenen Wicklungen mit festen Isolierstoffen. Solche Transformatoren stellt man zum besseren Schutze gegen mechanische Beschädigungen zwar auch in ein Gefäß aus Eisenblech und gibt dem Gefäß oben und unten passende Öffnungen, so daß unter dem Einfluß der unvermeidlichen Erwärmung ein natürlicher Zug entsteht, und die Außenluft fortwährend ventilierend und kühlend durch das Gehäuse streicht. Bei Transformatoren der zuletzt besprochenen Spannung wäre das aber nicht möglich. Die Luft würde dabei in der Nähe der Hochspannungswicklungen elektrochemisch beeinflußt werden. Ihr Sauerstoff würde zum Teil in aktiven Sauerstoff oder Ozon verwandelt werden, und dieser würde jede Isolation in kurzer Zeit zerstören. Man muß solche Transformatoren daher nach ihrer Fertigstellung in ein Bad aus einem hochisolierenden Öl versenken. Die Herstellung der Transformatorenöle ist eine Wissenschaft für sich. Es sind ausschließlich reine Kohlenwasserstoffe, die bei der Destillation des Petroleums oder in neuerer Zeit auch durch chemische Weiterverarbeitung der Destillationsprodukte des Steinkohlenteers gewonnen werden. Man verlangt von ihnen eine außerordentlich hohe elektrische Festigkeit, da das Öl im Transformator selbst die isolierende Wirkung der festen Isolation noch unterstützen und verstärken soll. Zweitens muß das Öl einen sehr hohen Entflammungspunkt besitzen, so daß es auch beim Auftreten von Funken und Lichtbogen nicht so leicht in Brand geraten kann. Drittens soll es bei der normalen Transformatortemperatur so dünnflüssig sein, daß es leicht zirkulieren und die Wärme aus allen Teilen abführen kann. Viertens endlich soll es sich während des Betriebes nicht zu seinem Nachteil verändern, insbesondere keinen Sauerstoff aufnehmen, da es durch die Oxydation seine isolierende Fähigkeit verliert. Schließlich muß es dauernd vollkommen wasserfrei



768. Trockenüberschlag an einer 6 gliedrigen Isolatorenkette bei 370 000 Volt und künstlichem Sturm von 12 m in der Sekunde

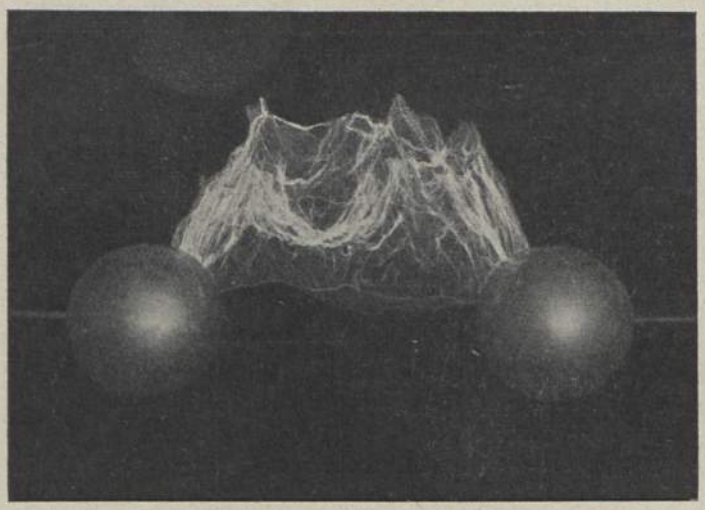


769. Versuchs- und Prüffeld für elektrische Ströme von einer Million Volt Spannung

Der Raum ist fensterlos; jede Art Wetter kann künstlich hergestellt werden, um die Prüfung in Übereinstimmung mit den Verhältnissen des praktischen Betriebes durchzuführen. Porzellanfabrik Freiberg i. Sa. der Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren G. m. b. H.

bleiben, da Wasser natürlich Gift für jede Isolation ist.

Um die von dem Transformator auf das Öl übertragene Wärme bestmöglich an die Außenluft abzuleiten, gibt man den Transformatorengefäßen eine möglichst große Oberfläche, stellt sie etwa aus Wellblech her. Aber diese Art der Kühlung genügt nur bei kleineren Typen. Darüber hinaus muß man zu energischeren Mitteln greifen und eine Wasserkühlung verwenden. Die Einrichtung kann dabei auf zweierlei Weise erfolgen. Entweder baut man in das Transformatorengefäß selbst Kühlschlangen ein, durch welche von außen her mittels einer Kreiselpumpe ständig ein kräftiger Strom kalten Wassers getrieben wird. Oder aber man führt das Öl aus dem Oberteil des Transformators, wo es am wärmsten ist, durch ein Rohr hinaus, läßt es durch Kühlschlangen (Bild 758) laufen, die in kaltem Wasser liegen, und drückt es von unten her wieder in den Transformator hinein. Beide Arten sind in Gebrauch und haben sich bewährt.



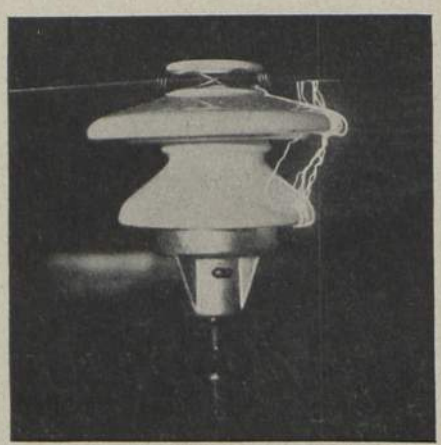
770. Die Meß-Funkenstrecke
Überschlag zwischen Kugeln von 75 cm Durchmesser bei einer Million Volt Spannung

Zurzeit sind Großtransformatoren mit Oberspannungen bis zu 440 000 Volt in den neuen Großkraftwerken in Betrieb. Diese Apparate werden in den Fabriken der großen Elektrizitätsfirmen vollkommen fertiggemacht, im Prüfstand mit beträchtlicher Überspannung erprobt und kommen dann zum Versand. Aber das hierfür in Betracht kommende Transportmittel, die Eisenbahn, ist in seinen Leistungen in doppelter Hinsicht begrenzt. Erstens soll die Belastung einer einzelnen Eisenbahnachse nicht mehr als 20 Tonnen betragen. Ferner müssen alle Eisenbahnfahrzeuge mitsamt ihrer Ladung innerhalb eines lichten Profils, des Eisenbahn-Normalprofiles, bleiben, das in Höhe und Breite ziemlich beschränkt ist. Für die Verfrachtung der Großtransformatoren mit Gewichten bis zu 200 Tonnen werden daher ganz ähnlich wie beim Transport der Großgeneratoren Spezialkonstruktionen und Spezialwagen notwendig. Bild 3, Tafel XXV zeigt den Transport auf einem Spezialwagen des Bayernwerkes. Bild 4, Tafel XXV veranschaulicht eine andere Art des Transports eines 30 000-Kilo-Volt-Ampere-Transformators der Siemens-Schuckertwerke. Der Ölkessel ist als tragfähiges Fachwerk ausgebildet. Für den Transport werden rechts und links zwei schwanzartige Eisenfachwerke durch starke Bolzen mit dem Ölkessel verbunden. Diese beiden Fachwerkträger ruhen auf besonderen fünfachsigen Wagengestellen. Durch diese Anordnung verteilt sich die ganze Last gleichmäßig über zehn Achsen. Außerdem liegt der Transformator dabei so tief, daß er auch nach oben hin das Normalprofil nicht überschreitet.

Die Spannung von 110 000 Volt wird von der Starkstromtechnik unserer Tage unbedingt sicher beherrscht. Mit ihr arbeiten sämtliche deutschen Fernkraftwerke, von denen in einem späteren Abschnitt ausführlich die Rede sein wird. Darüber hinaus ist man aber bereits mit den Vorbereitungen beschäftigt, die Hochspannung zu verdoppeln, d. h. zu 220 000 Volt überzugehen, und das Großkraftwerk Goldenberg hat bereits eine Kraftübertragung mit 360 000 Volt in Betrieb.

Soweit dabei Transformatoren und Hochspannungsschalter in Frage kommen, darf diese Aufgabe bereits seit geraumer Zeit als gelöst gelten. Dagegen bereiteten die einfachen blanken Leitungen bis in die letzte Zeit unüberwindliche Schwierigkeiten. Bei Spannungen von etwa 150 000 Volt an konnte man in der Dunkelheit einen Überzug von blauem Glimmlicht an ihnen beobachten, ein Zeichen dafür, daß die Luft hier nicht mehr als Isolator wirkte, sondern elektrische Energie aus der Leitung abwanderte. Man stellte weiter einen Energieverlust von rund 3 Kilowatt für das laufende Kilometer einfacher Leitungslänge durch diesen sogenannten Koronaeffekt fest. Für die drei Drehstromleitungen zwischen dem Kraftwerk bei Bitterfeld und der Stadt Berlin mit einer gesamten Leitungslänge von 1500 Kilometern hätte man bei der Spannung von 150 000 Volt also bereits einen dauernden Energieverlust von 4500 Watt oder rund 6000 Pferdestärken in Kauf nehmen müssen, ein Zustand, der natürlich wirtschaftlich nicht tragbar gewesen wäre.

Die Rettung aus dieser Not brachten die Leitungs-Hohlseile. Dies Austreten der Elektrizität findet um so leichter statt, je kleiner der Leitungsdurchmesser, je stärker also die Krümmung der Drahtoberfläche ist. Ein dünner Klingeldraht würde schon bei 10 000 Volt starke Glimmlichterscheinungen zeigen. Für die gebräuchlichen Überlandleitungen von etwa Fingerstärke liegt die Grenze bei 150 000 Volt. Wenn man der Leitung aber einen Durchmesser von 45 Millimetern gibt, so bleibt sie auch bei 400 000 Volt noch ohne alle



771. Massiv-Stützer in trockenem Zustand
unter einer Prüfungsspannung von 100 000 Volt

772. Massiv-Stützer in nassem Zustand
unter einer Prüfungsspannung von 55 000 Volt

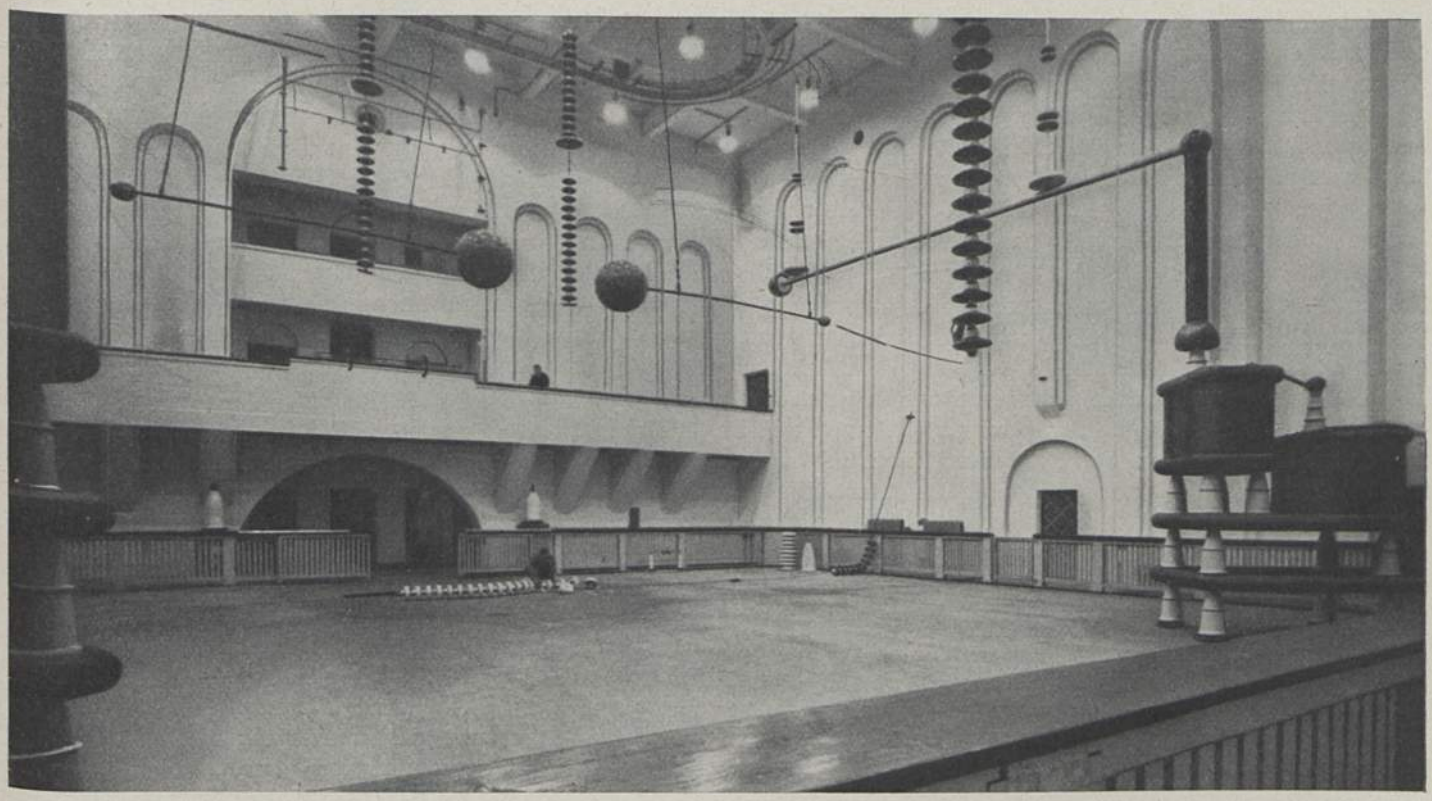
Dieser Isolator aus massivem Porzellan besitzt eine garantierte Bruchfestigkeit von 1000 kg und wird für Leistungen mit 15 000 Volt Spannung verwendet. AEG, Berlin

Koronaerscheinungen. Es wäre aber für die Stromleitung unnötig und wirtschaftlich undurchführbar, wenn man nun etwa massive Kupferleitungen von diesem Durchmesser verwenden wollte. Vielmehr werden aus kupfernen Profildrähten, die sich nach außen hin zu einer vollkommen glatten Oberfläche zusammenschließen, Hohlseile gesponnen, die bei einem äußeren Durchmesser von 24 bis 45 Millimetern eine Wandstärke von etwa 3 Millimetern haben, also etwa die Dimensionen eines starken Gartenschlauches aufweisen. Durch Einlagen von Metallspiralen gibt man diesen Hohlseilen die nötige Widerstandsfähigkeit gegen Verknickungen und ähnliche namentlich bei der Montage unvermeidliche Beanspruchungen.

Die erste derartige Hochspannungsleitung mit Hohlseilen mit einer Streckenlänge von 200 Kilometern wurde für das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk erbaut und ist für eine Betriebsspannung bis zu 380 000 Volt konstruiert.

ströme zu führen haben, ausgebildet sein. Sie werden, wie Bild 762 zeigt, aus massiven Kupfertafeln herausgeschnitten. Die Isolation der einzelnen blanken Spulen gegeneinander erfolgt dabei durch zwischengelegte Preßspanscheiben, auf denen Kanalleisten aus Hartholz mit eingefrästen Rinnen für den Ölumlauf befestigt sind. Durch diese Anordnung, die Bild 763 zeigt, wird eine Wärmestauung vermieden und ein lebhafter Ölumlauf auf beiden Flachseiten der Hochstromwindung erzwungen. Bild 764 zeigt einen solchen Hochstromtransformator der Siemens-Schuckertwerke für 2000 Kilo-Volt-Ampere und 28 700 Ampere Hochstrom ohne Kessel. Bemerkenswert sind dabei die Hochstromausführungen in Form breiter schwerer Kupferbleche.

Das Öl, dessen Anwendung sich im Transformatorenbau so nutzbringend erwies, spielt auch bei einer anderen Gruppe von Hochspannungsapparaten, den automatischen Ölschaltern,



773. Blick gegen die Beobachtungsbühne des Versuchsfeldes der Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren G. m. b. H.
Die Isolatorenketten hängen an einer Deckenbahn, deren elektrisch betriebene Windewagen von der Bühne aus gesteuert werden können

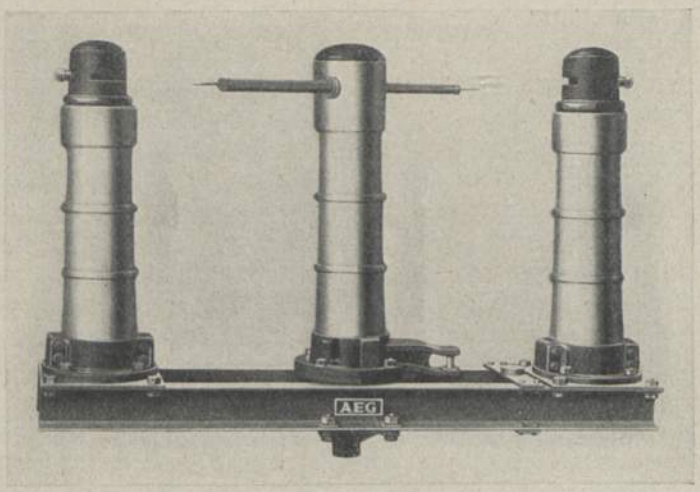
Noch höhere Spannungen muß man für die Laboratoriumszwecke sicher beherrschen. So hat man Transformatoren mit Oberspannungen bis zu 2 Millionen Volt gebaut. Die von diesen erzeugten Spannungen werden im Prüffeld insbesondere für die Untersuchung von Isolierstoffen benutzt.

Während es sich bei den bisher betrachteten Transformatoren hauptsächlich um die sichere Beherrschung hoher Spannungen handelte, spielen bei einer anderen Gruppe, den Ofentransformatoren, die hohen Ströme die entscheidende Rolle. Auch hier handelt es sich um gewaltige Leistungen bis zu 15 000 Kilo-Volt-Ampere. Dabei beträgt die Spannung, die den elektrischen Öfen für die Herstellung von Kalzium-Karbid, Karborund und dergleichen zugeführt wird, nur etwa 100 bis 120 Volt. Dafür ist aber die Stromstärke vergrößert. Sie bewegt sich bei den stärksten dieser Hochstromtransformatoren um die Größe von 50 000 Ampere herum. Dementsprechend müssen auch die Spulen, die diese Hoch-

eine bedeutsame Rolle. Außerordentlich zutreffend sagt Dr. Georg Stern, Direktor der Transformatorenfabrik der AEG, in einer Arbeit über Hochspannungsapparate darüber:

„Der interessanteste Apparat einer Hochspannungsschaltanlage ist sicherlich der Ölschalter. Während Stütz- und Durchführungsisolatoren ein recht ruhiges Dasein in einer Station führen und ihre Funktion erfüllen, wenn sie nur eine dauerhafte Isolation besitzen, während Trennschalter nur etwa in Betriebspausen ab und zu ein wenig bewegt werden, steht der Ölschalter gleichsam in der vordersten Front mitten im Kampf der Gewalten; wenn Wind und Wetter in der Freileitung unheilvoll wüten, wenn ein schlaftrunkener Monteur in einer fernen Unterstation irgendeine dumme Fehlschaltung macht, stets muß der Ölschalter aufpassen und als geistesgegenwärtiger Chirurg schnell den kranken Teil aus dem Organismus der Anlage herausschneiden. Theoretiker, Experimentatoren und Konstrukteure haben viel geistige Arbeit aufwenden müssen,

bis der moderne Hochleistungs-ölschalter geboren war. Dabei kann man zweifeln, ob die Abschaltung großer Leistungen bei niederen oder bei ganz hohen Spannungen das schwierigere Problem war. Jedenfalls beherrschen die modernen Ölschalter Kurzschlußleistungen, wie sie heute in den großen Zentralen auftreten können, bei jeder Betriebsspannung glänzend.



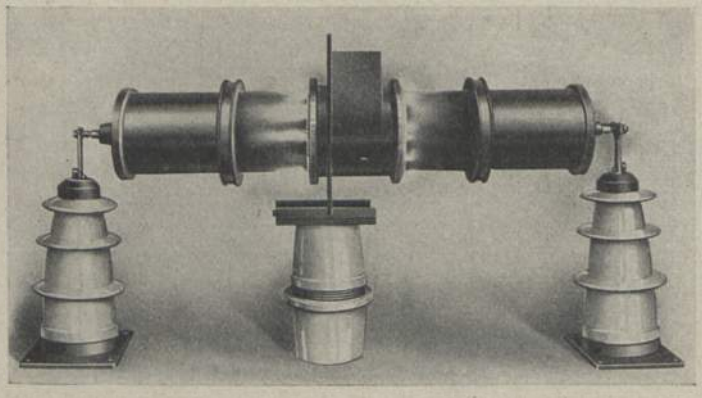

774. Trennschalter der AEG für 110 000 Volt
Die drei Säulen bestehen aus Gear, einem Hartpapierpräparat. Die mittlere Säule ist drehbar und trägt die Schaltmesser, die beiden äußeren Säulen die Schaltfedern

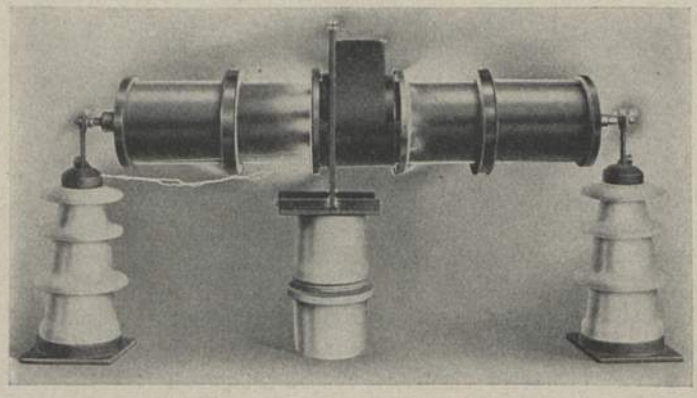
Wir sind heute noch weit entfernt von einer ausreichenden Theorie des Ausschaltvorganges im Ölschalter. Wir wissen nur, daß der beste Ölschalter der ist, der in der kürzesten Zeit den Lichtbogen im Öl zum Erlöschen bringt und den notwendigerweise auftretenden Druck, der durch die Vergasung des Öles im Lichtbogen entsteht, am sichersten beherrscht. Aber von dieser Erkenntnis bis zur Konstruktion eines brauchbaren Ölschalters für hohe Kurzschlußleistungen ist ein sehr weiter Weg, den man mit Sicherheit nur durch das Experiment findet."

In den vorstehenden Zeilen hat Dr. Stern das Wesen des Ölschalters sehr treffend charakterisiert. Es ist kein einfacher Betriebsschalter, sondern ein automatischer Sicherheitsschalter, der die an ihm hängenden Leitungen selbsttätig abschalten soll, sobald durch irgendwelche Störungen der Strom in diesen über ein bestimmes Maß ansteigt. Die schlimmste Störung ist aber ein Kurzschluß, bei dem der Strom im Augenblick einem Maximalwert zueilt, und auch solchem Vorkommnis muß der Ölschalter gewachsen sein. Daraus folgt, daß es ein Hochleistungsschalter sein muß, ein Apparat, der ein Vielfaches der normalen Maschinenleistungen sicher bewältigen muß. Um welche Leistungsgrößen es sich hier handelt, mag aus der Tatsache erhellen, daß der Versuchsraum der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft für Ölschalter über eine Kurzschlußleistung von 600 000 Kilo-Volt-Ampere verfügt.

Wenn man einen Stromkreis unterbricht, indem man etwa an irgendeiner Stelle desselben die Drähte, die ihn bilden, auseinanderzieht, so ergibt sich stets folgendes Bild. Das Auseinanderbringen der beiden metallischen Enden erfolgt natürlich stetig, d. h. der Zwischenraum zwischen ihnen wächst von einer unendlich kleinen Größe an bis zu einer mehr oder weniger beträchtlichen Entfernung. Zu Beginn des Ausschaltvorganges kann der Strom den Luftzwischenraum infolge seiner Spannung noch überspringen, und durch dies Überspringen wird die Luftstrecke derart elektrisch beeinflußt (ionisiert), daß sie elektrisch leitend wird. Die unerfreuliche Folge davon ist, daß sich zwischen den Metallenden ein Lichtbogen bildet, der über eine Strecke bestehen kann, die vielmal länger ist als die einfache Überschlagweite der betreffenden Spannung. Durch den Lichtbogen aber werden die Metallenden schnell bis zur hellen Glut erhitzt, sie verbrennen oder schmelzen. Bei den einfachen Installationsschaltern, die man in jeder Wohnung mit elektrischer Beleuchtung findet, vermeidet man die Lichtbogenbildung, indem man die Schalter als Federschalter oder Schnappschalter ausbildet. Dreht man den Knebel eines solchen Schalters, so spannt man dadurch zunächst eine Feder, und erst wenn deren Spannung eine gewisse Größe erreicht hat, reißt sie den Stromkreis so schnell auseinander, daß der Lichtbogen, noch ehe er überhaupt entstehen kann, schon wieder abgerissen ist.

Ebenso, wie die winzigen Installationsschalter, sind auch die Ölschalter Federschalter, bei denen die Kontakte momentan auseinandergerissen werden. Aber bei den hier in Betracht kommenden Spannungen und Stromstärken wären Lichtbogen von mehreren Metern Länge möglich, und die Ausschaltung würde doch nicht gelingen, wenn sich der ganze Schaltvorgang nicht in einem Ölbade vollzöge. In vergangenen Jahren nahm man zunächst einfach an, daß das Öl den entstehenden Lichtbogen sofort erstickt, daß es während des Schaltvorganges sofort von allen Seiten her auf den Lichtbogen einströmt, ihn gewissermaßen ersäuft und unterdrückt. Aber die Versuche haben sehr schnell gezeigt, daß diese Anschauung nicht richtig ist. Nimmt man etwa eine solche Ausschaltung in einem offenen mit Öl gefüllten Bottich vor, so fliegt das Öl im nächsten Moment in die Luft und in dem Bottich steht das

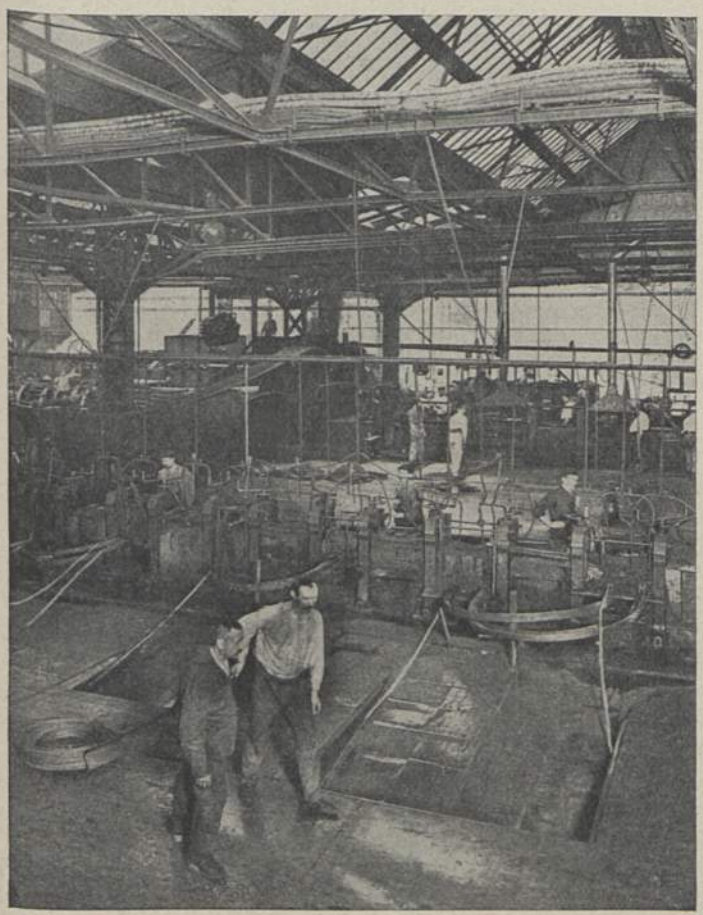




775. Hochspannungs-Wanddurchführung aus Gear
Links: Zwischen dem eisernen Wanddurchführungsring in der Mitte und der Kupferseele der Durchführung ist eine Prüfspannung von 250 000 Volt angelegt. Glimmerscheinungen am Durchführungsring. Rechts: Die Prüfspannung ist auf 280 000 Volt erhöht und schlägt unmittelbar vom Wandring zum Ende der Durchführung hin. Den Gearschutz vermag sie nicht zu durchbrechen

schönste Feuerwerk, ein schlagender Beweis dafür, daß der Lichtbogen gar nicht so schwach ist, um ohne weiteres durch das Öl erstickt zu werden. In der Tat spielt bei der Löschung des Lichtbogens der Druck eine bedeutende Rolle, der im Moment der Ausschaltung durch die Vergasung einer gewissen Ölmenge entsteht. Je größer dieser Druck ist, desto energischer wird der Lichtbogen unterdrückt, desto zuverlässiger arbeitet der Schalter.

Erste Voraussetzung ist also, daß der ganze Schalter hermetisch dicht in einem druckfesten eisernen Gefäß eingebaut ist, das einen plötzlichen Überdruck von etwa zehn Atmosphären zuverlässig aushält. Im weiteren haben die Versuche gezeigt, daß es vorteilhaft ist, die Stellen, in denen sich die Schaltvorgänge vollziehen und die Lichtbogen auftreten, jenigen Stellen konzentriert, an denen er nützlich wirkt, und es wird verhindert, daß er an Stellen gelangt, an denen er Schaden stiften könnte. Diesbezügliche Messungen im Prüffelde der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft ergaben in den beiden inneren zylindrischen Druckkammern momentane Drucke von mehr als 30 Atmosphären, während gleichzeitig der Druck in dem äußeren Ölbad und an den Wandungen des großen Kastens kaum eine halbe Atmosphäre erreichte. Durch diese Anordnungen geht die Schaltung nun aber so störungsfrei vonstatten, daß die innere Untersuchung eines derartigen Ölschalters erst nach mehreren Dutzenden von Ein- und Ausschaltungen erforderlich wird. In der Tat haben diese automatischen Ölschalter eine so hohe Betriebszuverlässigkeit erreicht, daß sie in den großen Fernkraftwerken und Überlandleitungen die



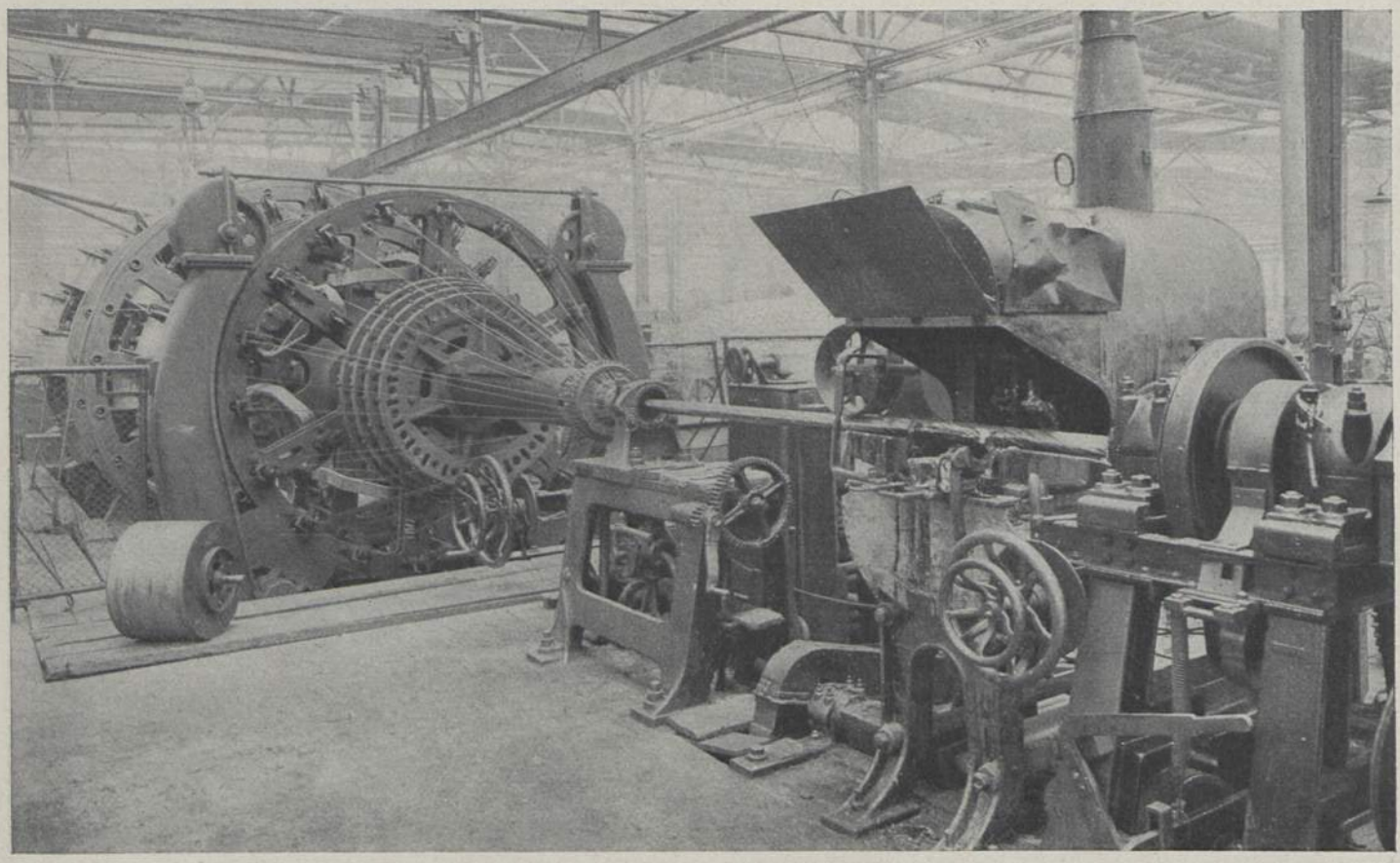
776. Blick ins Kupferwalzwerk
des Kabelwerks der AEG in Oberschöneweide

777. Blick in die Feindrahtzieherei
des Kabelwerks der Siemens-Schuckertwerke in Gartenfelde b. Spandau

noch in kleinere, sehr widerstandsfähige Druckgefäße innerhalb des größeren Gefäßes einzuschließen. Bild 765 zeigt die Innenteile eines zweipoligen Ölschalters der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft für eine Spannung von 110 000 Volt. Man sieht hier im unteren Teile eine auf und ab bewegliche Querstange mit den beiden nach oben gerichteten Schaltstiften. Beim Einschalten gehen diese Stifte nach oben und erreichen die beiden zylindrischen kleinen Druckkammern, in denen sich die federnden Kontaktbüchsen finden, in welche die Stifte hineintauchen. Nach unten hin sind die zylindrischen Kammern, die aus einem auch mechanisch sehr widerstandsfähigen Isolierstoff bestehen, ebenfalls geschlossen. Sie haben in ihren Böden, ähnlich wie Blumentöpfe, nur kleine Löcher, durch welche die Schaltstifte eben gerade hindurchgehen. Durch diese Anordnung wird der beim Ausschalten entstehende Druck nun aber gerade auf die- Schmelzsicherungen fast vollkommen verdrängt haben. Transformatoren und Ölschalter bilden einen wichtigen Bestandteil dieser Anlagen.

*

Der Starkstromtechniker braucht einerseits Stoffe, die den Strom bestmöglich leiten und andererseits solche, die seinem Durchgange den größtmöglichen Widerstand entgegensetzen und ihn dadurch zwingen, in der für ihn bestimmten Leitung zu bleiben. Als Leitungsmaterial kommt heut hauptsächlich elektrolytisch raffiniertes Kupfer mit einem Reinkupfergehalt von 99,9 % in Betracht. Daneben wird für Freileitungen bisweilen Aluminium verwendet, das zwar nur etwa halb so gut leitet, sich aber auf Freileitungen bezogen ungefähr gleich teuer stellt, und den Vorteil hat, ein Produkt des eigenen Landes zu sein.



778. Blick in die Kabelspinnerei der Siemens-Schuckertwerke
Links hinten eine große Kabelverseilmaschine. Rechts vorn eine Umpressungsvorrichtung zum Isolieren des Kabels. Das Kabelseil geht gleich aus der Verseilmaschine durch diese Vorrichtung, in der es die erste Isolierung erhält

Zink und Eisen waren als Leitungsmaterial nur Kriegsersatzmittel und sind längst wieder aufgegeben worden. Silber leitet zwar noch beträchtlich besser als Kupfer, kommt aber wegen seines hohen Preises nur in ganz wenigen Ausnahmefällen zur Verwendung.

So gering also die Zahl der Leitungsstoffe ist, um so größer ist die der Isoliermittel. Als erstes und besonders für die modernen Hochspannungsanlagen unentbehrliches Material muß hier das Porzellan genannt werden. Vor etwa 50 Jahren fanden Siemens & Halske mit Mühe und Not eine Porzellanfabrik, die sich bereit erklärte, neben ihrer Geschirrfabrikation auch die Herstellung diverser für die junge Starkstromtechnik notwendiger Formstücke aus Porzellan zu übernehmen. Heute dagegen verfügen die meisten großen Elektrizitätsfirmen über eigene Porzellanfabriken, in denen die mannigfachsten Dinge von den erbsengroßen Teilchen kleiner Schalter bis zu den weit über mannesgroßen Hochspannungsdurchführungen aus Spezialporzellanen und nach besonderen Fabrikationsmethoden hergestellt werden.

Der Herstellungsvorgang beginnt mit der Aufbereitung der Porzellanmasse. Etwa 50 Teile Kaolin und je 25 Teile Quarz und Feldspat werden gemischt und in Mahltrommeln gebracht, die mit besonders hartem Gestein ausgemauert sind und zahlreiche Flintsteine von Eigröße enthalten. Unter hinreichender Zugabe von Wasser läßt man die Trommeln etwa 25 Stunden lang rotieren, wodurch das Gemisch äußerst fein gemahlen wird.

Nach Beendigung des Mahlprozesses läßt man den Inhalt der Trommel in ein Becken laufen, aus dem die flüssige Porzellanmasse mittels einer Pumpe durch eine sogenannte Filterpresse gepumpt wird. Diese Filterpresse besteht aus einer Reihe von runden Zellen, die alle miteinander in der Mitte durch einen Kanal kommunizieren. Die Zellen sind mit wasserdurchlässigem Stoff bekleidet, die Zellenwände selbst sind hohl. Unter dem Druck der Pumpe dringt der Brei in den Hohlraum ein, und das Wasser fließt aus diesem Raum durch die Stoffbelegung der Zellenwände ab, während die eigentliche Porzellanmasse zwischen den Zellenwänden sich anreichert und Kuchen bildet, die dann aus der Presse herausgenommen werden.

In dieser Form ist die Porzellanmasse noch nicht dicht genug und wird nun auf besonderen „Schlagmaschinen" weiter bearbeitet. Die Schlagmaschinen bestehen aus einem rotierenden Tisch, auf den die Masse aufgepackt wird, derart, daß ein Ring entsteht, der durch den Tisch mitgenommen wird, und der sich durch die 90 Grad gegeneinander versetzten Walzenpaare durchzwängen muß. Die Anordnung ist so getroffen, daß der Ring abwechselnd breit- und hochgequetscht wird, wodurch die Masse im Verlauf von etwa einer halben Stunde sorgfältig durchgeknetet ist. Hierauf wird der Ring in Stücke zerschnitten und an die Verarbeitungsstelle gebracht.

Bei der Herstellung fast aller Isolatoren ist der weitere Arbeitsgang durch die folgenden vier Etappen gekennzeichnet. Die Herstellung des „Hubels", das Einpressen in die Form, die Fertigstellung einer Seite des Isolators und die Fertigstellung der anderen Seite des Isolators. Der ganze Arbeitsgang spielt sich stets auf Drehspindeln ab, auf denen das Porzellan ähnlich wie Holz beim Drechsler abgedreht wird.

Fast alle Isolatoren werden in Form gearbeitet, d. h. es werden Gipsformen verwandt, die schon ungefähr dem Isolator mindestens auf einer Seite die Form geben, die er endgültig haben soll. Die von der Schlagmaschine kommende Porzellan-

masse wird erst nochmals mit der Hand auf der Spindel gut durchgeknetet und ungefähr in eine Form gedreht, daß sie in die Gipsform hineinpaßt. Hierauf wird sie in diese Form eingepreßt, und es wird die Seite des Isolators, die aus der Form herausragt, fertiggemacht. Darauf läßt man die Form mit dem Isolator, der an der offenen Seite der Form fertiggemacht ist, eine Weile stehen. Dabei schwindet der Isolator infolge der Abgabe eines Teiles seiner Feuchtigkeit und löst sich von der Form. Danach wird er aus der Form herausgekippt und seine andere Seite wird fertiggemacht.

Nachdem der Isolator gedreht ist, kommt er in die Trockenkammern, wo das Porzellan fast seine ganze Feuchtigkeit, die es bei der Aufbereitung bekommen hat, wieder abgibt. Nach dem Trocknen werden die Isolatoren in Glasur getaucht, d. h. in eine flüssige Porzellanmasse von etwas niedrigerem Schmelzpunkt als die Porzellanmasse des Isolators selbst. Sie schmilzt im Ofen und gibt dann den bekannten glasigen Überzug.

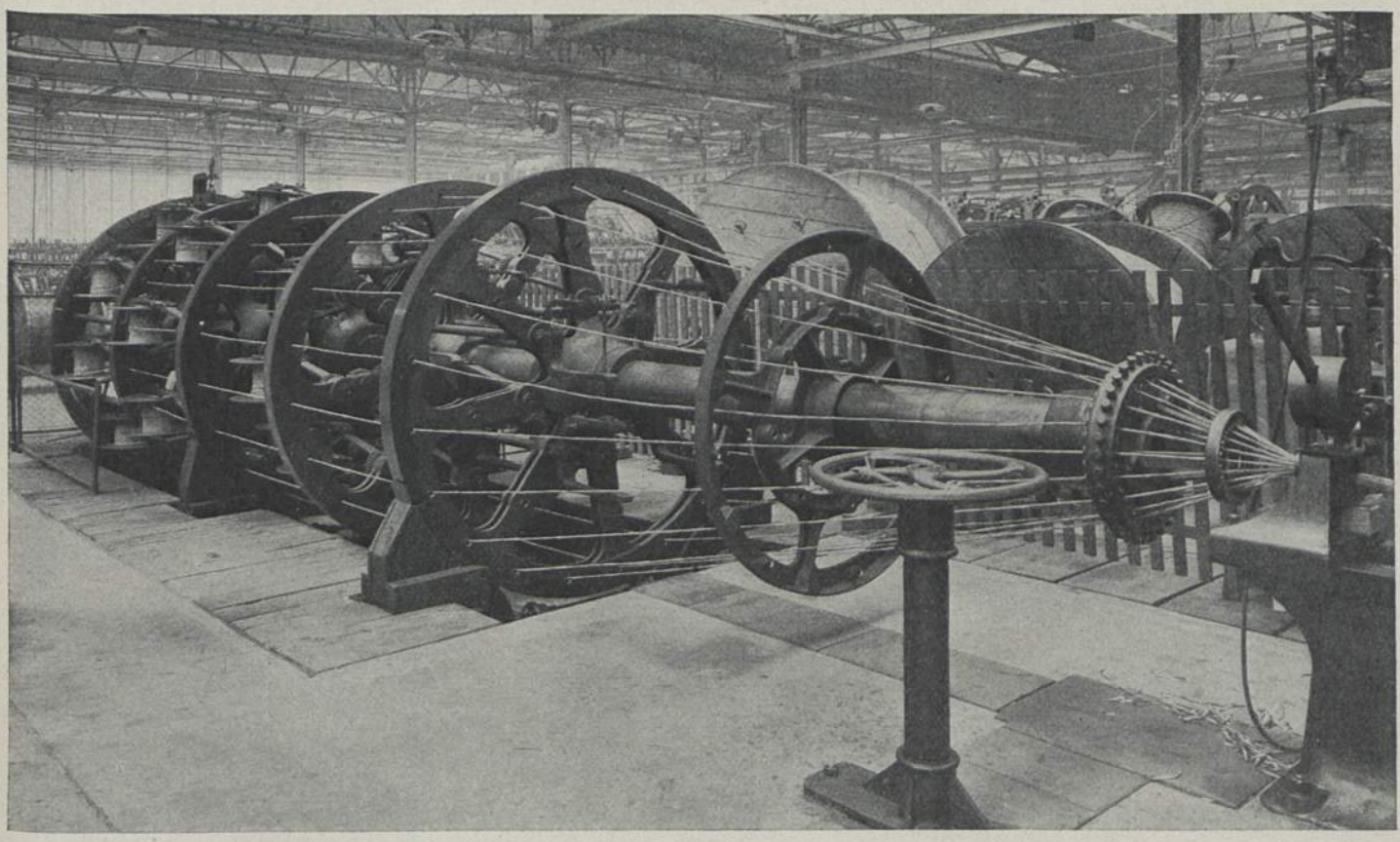
Die Isolatoren werden dann mit dieser Glasur in den Rundofen gebracht. Es ist dies ein zweistöckiger Ofen, in dessen unterem Raum sie fertig gebrannt werden, während in seiner oberen Etage besonders dünnwandige Porzellanartikel gebracht werden, die hier nur verglüht (das heißt bis 1000 Grad gebrannt) und in einem zweiten Prozeß erst in der unteren Etage „glatt" gebrannt werden.

Um die Isolatoren übereinanderbauen und auch vor dem Einfluß der Feuergase schützen zu können, werden sie in Kapseln aus feuerfester Schamotte gefüllt.

Der Ofen wird nun von den seitlichen äußeren Feuerlöchern beschickt und in einem etwa 30 Stunden dauernden Brand bis auf rund 1430 Grad erhitzt. Nach dem Abkühlen werden die fertiggebrannten Isolatoren herausgenommen. Je nach ihrem Verwendungszweck werden sie hierauf noch mit Eisenteilen zusammengekittet oder ohne weiteres dem Gebrauch übergeben.

Außer den Rundöfen gibt es noch ein anderes Ofensystem, das der sogenannten Tunnelöfen, die sich durch einen kontinuierlichen Betrieb auszeichnen und infolgedessen bedeutend wirtschaftlicher arbeiten. Solch ein Ofen besteht aus einem Tunnel von etwa 80 Meter Länge, in dessen Mitte an beiden Seiten Brenner angebracht sind, welche mit Gas beschickt werden und die Brenntemperatur erzeugen. Von der Mitte des Ofens fällt die Temperatur (1430 Grad bis 1450 Grad) nach beiden Seiten ziemlich gleichmäßig ab. Von der einen Seite werden Wagen, die gegen die Feuergase geschützt und mit Kapseln beladen sind, hineingeschoben. Sie erwärmen sich allmählich, bis sie in die Hochfeuerzone gelangen, wo das Porzellan gargebrannt wird, und verlassen die Hochfeuerzone unter langsamer Abkühlung, bis sie am anderen Ende des Ofens herauskommen.

Ein moderner Tunnelofen liefert in 24 Stunden etwa fünf bis sieben Tonnen Porzellan, während ein Rundofen dieselbe Menge in vier Tagen leistet. Das Erzeugnis ist ein Hartbrandporzellan von höchster Isolierfähigkeit. Bei seiner Beurteilung muß man Durchschlagsfestigkeit und Überschlagspannung unterscheiden. Im allgemeinen ist die elektrische Festigkeit dieses Porzellans so groß, daß die elektrische Spannung stets den Weg um das Porzellan herum durch die Luft vorzieht, wenn dieser auch vielmal länger ist als der direkte Weg durch das Porzellan hindurch etwa von der spannungsführenden Leitung zu einer geerdeten Isolatorstütze. Ein Beispiel dafür gibt Bild 771. Es zeigt einen sogenannten Massivstützer in trockenem Zustande bei einer Spannungsdifferenz von 100 000 Volt zwischen der Kupferleitung und der metallischen Stütze.



779. Kabelverseilmaschine der Siemens-Schuckertwerke

20 Kupferdrahtlitzen werden zu einem Kabel verseilt. Bemerkenswert ist die Stellung der Spulen (Bobinen) im Hintergrund, von denen die Litzen ablaufen. Ihre Achsen behalten die senkrechte Stellung im Raume mit Hilfe sogenannter Planetengetriebe ständig bei

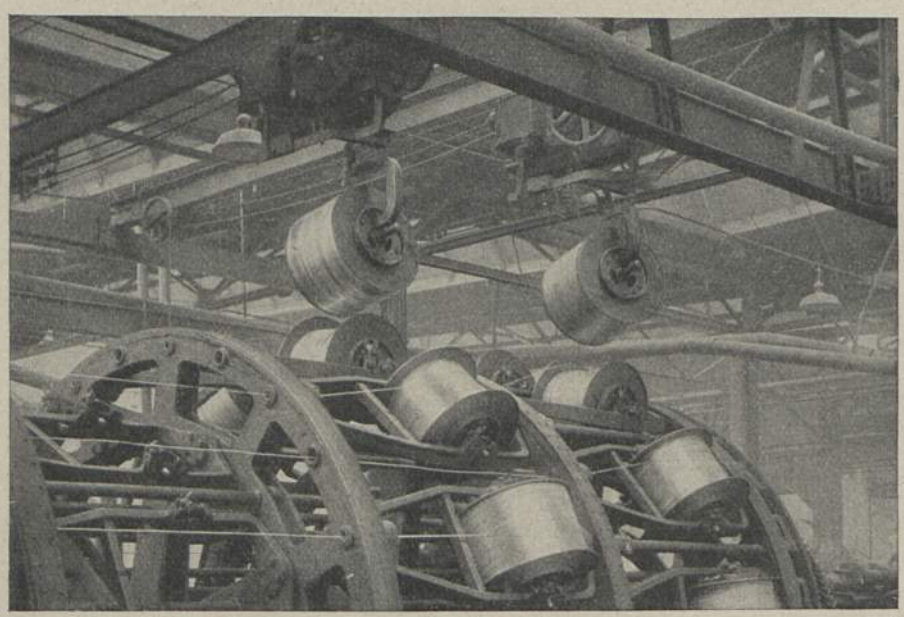
Man sieht, wie die aus dem Draht brechende Spannung in Form einer mehrfachen Funkenentladung den Porzellankörper im Bogen umgeht und den Weg zu der Metallstütze findet. Bild 772 zeigt den gleichen Isolator unter einer Regenvorrichtung bei einer Spannung von 55 000 Volt. Die Entladung hat hier ein ganz anderes Aussehen, aber auch hier wandert sie von der metallenen Stütze her um den Porzellankörper herum. Die Bilder 767 und 768 zeigen andere Formen von Porzellanisolatoren unter dem Einfluß sehr hoher Spannungen, denen sie in einem besonderen Versuchsraum, dem Prüffeld (Bilder 769 und 773), unterworfen werden. Für die Messung der hier in Betracht kommenden Spannungen scheiden die üblichen Instrumente aus, sie erfolgt durch eine Funkenstrecke, die sich zwischen zwei isoliert aufgehängten Kugeln (Bild 770) bildet.

Gehen wir in der Reihe der Isolierstoffe weiter, so stoßen wir auf den Glimmer, ein Mineral aus der Gruppe der Silikate oder Kieselsäureverbindungen. Der Glimmer, auch Marienglas oder Mica genannt, ist ein leicht in Blättchen spaltbares durchsichtiges Material von großer elektrischer Festigkeit. Nur ist er bisweilen mit metallischen Adern durchsetzt, die der Isolierfähigkeit des natürlichen Minerals stark Abbruch tun. Man spaltet ihn daher in sehr dünne Blättchen, die nun mit einer Lösung von Schellack in Spiritus aufeinandergeklebt werden. Das so gebildete Stück wird dann heiß gepreßt. So entsteht der als Mikanit bekannte Isolierstoff, der in den verschiedensten Formen namentlich im Maschinenbau zur Verwendung kommt. Die Kollektorlamellen der Gleichstrommaschinen und die Spulen der Hochspannungsgeneratoren sind ausnahmslos durch Mikanit isoliert.

Ein anderer sehr wichtiger Isolierstoff ist das Papier. Es spielt nicht nur, wie wir noch sehen werden, in der Kabelfabrikation eine bedeutende Rolle, sondern dient auch zur Herstellung schwerer Isolatoren für höchste Spannungen, die heut in geschlossenen Räumen den Porzellanisolatoren vorgezogen werden. Zu dieser Kategorie von Isoliermaterialien gehören insbesondere die Gearfabrikate der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft. Das Ausgangsmaterial ist dabei ein besonderes Hartpapier. Die fertige, im Vakuum getrocknete Papierbahn wird unter Zugabe eines isolierenden Klebmittels unter starkem Druck zu einem Zylinder aufgerollt. So entstehen Körper von sehr großer mechanischer und elektrischer Festigkeit, die weiter auf der Drehbank bearbeitet und dabei auf Bruchteile eines Millimeters genau auf jede gewünschte Form gebracht werden können. Darin liegt aber eine gewisse Überlegenheit dem Porzellan gegenüber. Bei diesem kann man den Schwund während des Brennens niemals genau voraussagen, und die Fabrikate von der Größe moderner Hochspannungsisolatoren weisen daher untereinander Maßabweichungen in der Größenordnung eines Zentimeters auf. Bild 774 zeigt einen Trennschalter für 110 000 Volt, dessen Metallteile auf drei Gearisolatoren montiert sind. Der mittlere, unten drehbar aufgesetzte Isolator trägt den Schaltarm mit den Schaltmessern an beiden Enden, die beiden anderen Isolatoren die Leitungszuführungen und Schaltfedern. Während die im vorangegangenen Abschnitt besprochenen Ölschalter die Ausschaltung unter voller Last vornehmen, dienen die Trennschalter nur für Schaltmanöver unter geringen Stromstärken. Die Isolationsfähigkeit dieses Hartpapiers mag aus dem Bilde 775 hervorgehen. Es zeigt einen Gear-Durchführungsisolator für 110 000 Volt. Zwischen dem in diesem Isolator befindlichen Metallbolzen und dem ihn in der Mitte umgebenden Metallkranz, mit dem er beim Einbau in der Mauerdurchbrechung befestigt wird, ist eine Spannung von 250 000 Volt angelegt. Man bemerkt Glimmlichterscheinungen an den mittleren Metallringen (Bild 775 links). Im Bilde rechts ist die Spannung auf 280 000 Volt erhöht. Es findet ein Funkenübergang durch die Luft statt, aber der Isolator selbst widersteht auch dieser Spannung. Die Bedingung für dies gute Funktionieren ist die absolute Trockenheit des Papierkörpers. Sie wird bei den Gearfabrikaten durch die Art der Herstellung erreicht und durch einen Lackanstrich des fertigen Körpers aufrechterhalten. Dabei bleibt, wie bereits gesagt, Voraussetzung, daß diese Isolatoren nur in geschlossenen, trockenen Räumen verwendet werden.

Die gleiche Erfahrung macht man auch bei anderen Stoffen, die ebenso wie das Papier in der Hauptsache aus Zellulose bestehen, nämlich bei den mannigfachen Faserstoffen wie Baumwolle, Jute und Leinen. Die Faserstoffkabel, bei denen die Isolation der Kupferleiter gegeneinander und gegen die Erde aus solchen Fasern oder aus Papier besteht, spielen deshalb in der Elektrotechnik eine große Rolle.

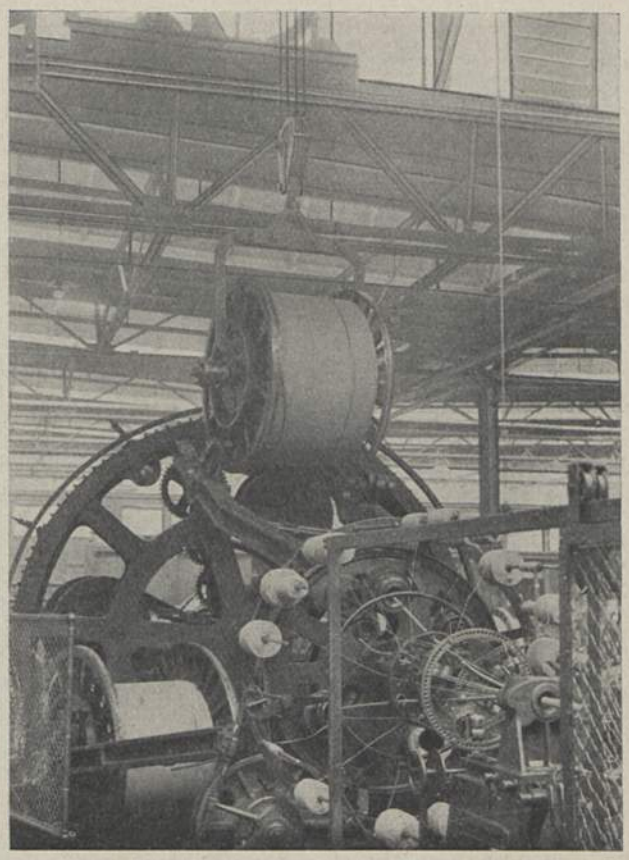
Als die Elektrizität die ersten tastenden Schritte aus dem Laboratorium in die freie Welt hinauswagte, sah es mit den Isoliermitteln noch schlimm aus. Man kannte Schwefel, Glas und Siegellack, aber diese Stoffe waren für die Herstellung eines Kabels wenig geeignet. In dem Abschnitt über die Unterseetelegraphie in Band I wurde erzählt, wie die Guttapercha die erste Rettung brachte und wie Werner Siemens die Guttaperchapresse erfand, mit der man Drähte von beliebiger Länge mit einem nahtlosen Guttaperchamantel umpressen konnte. Den nächsten großen Fortschritt brachte die Einführung des Kautschuks in die Elektrotechnik, und zwar diejenige des vulkanisierten Kautschuks. Kautschuk ist der geronnene Milchsaft gewisser tropischer Pflanzen, insbesondere der in Südamerika heimischen Hevea brasiliensis. In früheren Jahrzehnten wurde er durch die Eingeborenen hauptsächlich von den Kautschukbäumen des Urwaldes gewonnen. Heut bestehen namentlich



780. Einzelansicht der Verseilmaschine mit den Bobinen

auf den ostindischen Inseln Kautschukplantagen mit vielen Millionen von Bäumen, die systematisch auf Kautschuk ausgebeutet werden. Eine Zeitlang schien es, als ob diese Plantagen weit über den wirklichen Bedarf hinaus angelegt worden seien. Tatsächlich aber verlangen die Elektrotechnik für ihre Gummiaderdrähte und Hartgummifabrikate und die Automobilindustrie für ihre Gummireifen so gewaltige Kautschukmengen, daß die Erträgnisse dieser Plantagen restlos aufgenommen werden und daneben die Ausbeutung der Urwaldbäume fortgesetzt wird.

Der Rohkautschuk wird in besonderen Knetmaschinen von allen Unreinigkeiten befreit und durchgearbeitet, bis er vollkommen homogen ist. Er ist jetzt in der Wärme plastisch und läßt sich beliebig formen und kneten. Aber er ist noch nicht so elastisch wie etwa ein Stück Radiergummi, das seine Form wahrt. Diese Eigenschaft erhält der Kautschuk erst, wenn man ihn mit Schwefel oder mit Schwefelverbindungen mischt und danach erwärmt. Bei diesem Vorgang, dem Vulkanisierungsprozeß, tritt der Schwefel in das Kautschukmolekül ein, und es entsteht ein chemisch vom Rohkautschuk verschiedener Stoff, eben der vulkanisierte Kautschuk. Je nach der Menge des zugesetzten Schwefels und dem Grade der Erhitzung erhält man dabei Weichkautschuk, wie wir ihn etwa im Radiergummi und den Gummischuhen haben, oder Hartkautschuk oder Hartgummi, auch wohl Ebonit genannt, der beispielsweise für Akkumulatorenkästen verwandt wird.



781. Detail von der großen Kabelverseilmaschine
Aus drei Düsen laufen drei bereits isolierte Kabelseelen ab, die unter Zugabe von zahlreichen Jutelitzen zu einem dreiadrigen runden Kabel verseilt werden

Fassen wir die zuletzt besprochenen Isolierstoffe noch einmal zusammen, so haben wir Papier, Faserstoffe aller Art und Kautschuk, die sämtlich für die Isolierung von Drähten und Kabeln in Betracht kommen. Danach ergeben sich als Haupttypen Papierkabel, Faserstoffkabel und Gummikabel. Darüber hinaus sind mannigfache Kombinationen möglich, indem verschiedene dieser Isolierstoffe in ein und demselben Kabel nebeneinander Verwendung finden.

Die Fabrikation der isolierten Drähte und Kabel beginnt mit der Herstellung der metallischen Ader, die entweder aus einem einzelnen Draht oder aus einem aus mehreren Drähten versponnenen Kupferdrahtseil besteht. Das erste Ausgangsmaterial wird also immer der Kupferdraht sein. Zu jedem modernen Kabelwerk gehört deshalb auch eine Drahtfabrik, die wiederum in ein Walzwerk und in die eigentliche Drahtzieherei zerfällt. Hier werden einerseits die Kupferdrähte für die Stromleitung fabriziert, andererseits aber auch die mannigfachen Eisen- und Stahldrähte, die für die Kabelarmierung bestimmt sind, d. h. den fertigen Kabeln eine letzte sichere Schutzhülle gegen äußere Verletzungen geben sollen.

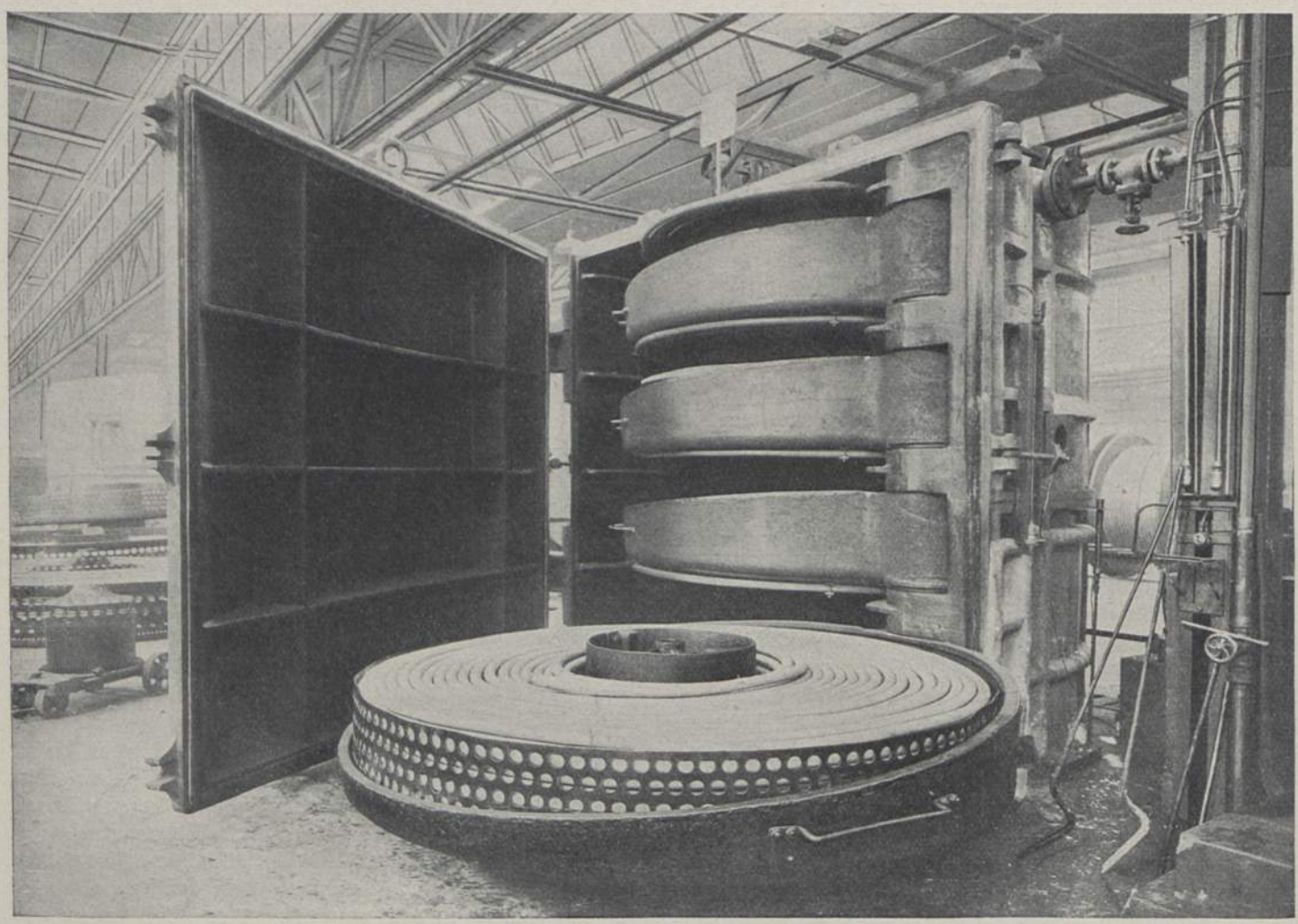
Das Ausgangsmaterial für die Kupferdrähte ist Elektrolytkupfer, das in Form länglicher kräftiger Barren angeliefert wird. Seine erste Verarbeitung erfolgt im Walzwerk. In rotwarmem Zustande passiert der Barren hier hintereinander zahlreiche Walzen, verliert bei jedem Durchgang an Dicke und gewinnt an Länge. Bild 776 zeigt das Kupferwalzwerk der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft in Oberschöneweide. Man sieht hier die Kupferstreifen nach dem Vordergrunde des Bildes zu aus den Walzen heraustreten, in einer Schlaufe umkehren und durch das nächste Walzenpaar wieder nach hinten zu verschwinden. Durch den Walzprozeß wird das Kupfer bis etwa auf Straßenbahnfahrdrahtstärke hinuntergewalzt. Danach beginnt der Ziehprozeß. Das angespitzte Ende des Drahtes wird durch ein kreisförmiges Loch gesteckt, das sich in einem aus härtestem Stahl bestehenden Zieheisen befindet, und der ganze Draht wird nun mit starker Maschinengewalt durch dies Loch hindurchgezogen. So geht es von Eisen zu Eisen und bei jedem neuen „Zug" verliert der Draht etwas von seiner Stärke und gewinnt entsprechend an Länge. Sehr bald werden dabei die für Kupferfreileitungen gebräuchlichen Querschnitte von 16 und 10 Quadratmillimetern erreicht. Aber für viele Zwecke muß der Ziehprozeß viel weiter getrieben werden. Es mag nur an die äußerst feinen Kupferdrähte erinnert werden, welche in großer Anzahl zusammengeflochten die leitenden Adern der Litzenschnur an unseren Lampen, Bügeleisen usw. bilden. Eine geraume Zeit geschieht das noch durch stählerne Zieheisen, dann treten gebohrte Diamanten an deren Stelle. Bild 777 gibt einen Blick in die Feindrahtzieherei des Kabelwerkes der Siemens-Schuckertwerke. Man sieht hier die zahlreichen Spulen, die den Draht von der einen Seite her zu den Zieheisen und Ziehsteinen ablaufen lassen, ihn von der anderen Seite her wieder aufnehmen.

Soweit der Kupferdraht eine Gummiisolation bekommen soll, ist es notwendig, ihn zu verzinnen. Mit dem Kupfer würde der Schwefelgehalt des Gummis eine schädliche Verbindung eingehen, während er das Zinn nicht angreift. Die Verzinnung erfolgt in der Weise, daß der Kupferdraht von seiner Rolle abläuft und zunächst ein Säurebad durchstreicht, in dem seine Oberfläche von der Säure blank gebeizt wird. Weiter tritt er dann in ein flüssiges Zinnbad, das er silberschimmernd vollkommen verzinnt verläßt.

Nachdem nun der Kupferdraht in der gewünschten Stärke vorhanden ist, wird zunächst die blanke Kupferader eines Leiters gesponnen. Zur Verwendung kommt hierfür ein Kupferdraht von etwa zwei Millimeter Stärke. Nur bei Verwendung so dünner und dementsprechend biegsamer Drähte erhält man ja schließlich auch ein Kabel von einer gewissen Biegsamkeit, das sich auf Trommeln von genügend großem Durchmesser aufwickeln läßt, ohne Schaden zu nehmen. Dabei unterliegt die Zahl der zu verspinnenden Drähte einer gewissen Gesetzmäßigkeit. Um einen Draht, der die Mittellinie des ganzen Kabels

bildet, lassen sich sechs Drähte gleicher Stärke in einer geschlossenen Lage herumgruppieren, so daß eine siebendrähtige Ader entsteht. Die nächste Lage würde 12 Drähte dieser Stärke enthalten, so daß sich eine neunzehndrähtige Ader ergibt. Auf die fertiggesponnene Kupferader muß bei Faserstoffkabeln in ganz ähnlicher Weise, gleichsam als ob es sich hier um eine weitere Drahtlage handelte, die aus Jutefäden besteht, der Faserstoff aufgesponnen werden. Für alle diese Arbeiten sind Kabelspinn- und Verseilmaschinen in Gebrauch, deren Wirkungsweise aus den Bildern 778 bis 781 ersehen werden mag. Dabei kann es für die Betrachtung an sich gleichbleiben, wie weit die Fabrikation des Kabels schon vorgeschritten ist, da das Prinzip immer das gleiche bleibt. Der wirksame Teil der Maschine besteht in jedem Falle aus einem durch Maschinenkraft angetriebenen rotierenden Körper, dessen Welle hohl ist, so daß Kabel oder beim Beginn der Kabelfabrikation der Mitteldraht durch diese Hohlwelle hindurchlaufen kann, ohne selbst irgendwelche Verdrehung zu erfahren. Der radartig ausgebildete rotierende Maschinenteil trägt nun auf seinem Umfange eine größere Anzahl von Spulen oder Bobinen, von denen die einzelnen Drähte, Jutefäden usw. ablaufen, mit denen, der aus der Hohlwelle heraustretende Mittelstrang umsponnen werden soll. Aus den beiden Bildern 778 und 779, die zwei Kabelverseilmaschinen aus dem Kabelwerk der Siemens-Schuckertwerke darstellen, geht diese Art des Aufbaues deutlich hervor. Dabei hat es aber mit den Bobinen auf dem drehenden Maschinenteil noch eine besondere Bewandtnis. Wären diese zwar um ihre Achse drehbar, aber im übrigen einfach fest mit dem rotierenden Teil verbunden, so würde sich jede von ihnen bei jeder Umdrehung der Spinnmaschine ebenso einmal um sich selber drehen wie ein Mensch, der um einen Tisch herumgeht und diesem dabei stets das Gesicht zukehrt. Soll das in letzterem Falle vermieden werden, so muß der Mensch so gehen, daß er das Gesicht stets einer bestimmten Stelle der Zimmerwand zukehrt, den Tisch dagegen bald vor sich, bald im Rücken, bald zur Rechten, bald zur Linken hat. Auch bei den Kabelspinnmaschinen muß es vermieden werden, denn es würde dadurch in die von den Bobinen ab- und auf das Kabel auflaufenden Drähte ein Drall hineinkommen, welcher der Haltbarkeit des Kabels wenig förderlich wäre. Deshalb erhalten die Bobinen durch ein Planetengetriebe eine Sonderbewegung, durch das ihre Achsen die Richtung im Raume ständig beibehalten, obgleich sie dabei eine Kreisbewegung um die Kabelachse ausführen. Bild 780 zeigt eine Teilansicht aus dem rotierenden Teil einer Kabelverseilmaschine.

Bild 781 zeigt eine andere Kabelverseilmaschine, auf der drei isolierte Kabeladern unter Dazwischenfügung zahlreicher Baumwoll-Lunten zu einem dreiadrigen Kabel verseilt werden. Hier ist das Rädertriebwerk für den Planetentrieb der drei Kabelbobinen deutlich zu erkennen. Die Aderbobinen stehen gleichachsig. Dagegen brauchen die Baumwollrollen etwas Derartiges nicht, da Baumwollfäden eine Verdrallung ohne Schaden aushalten.



782. Vakuumtrockenofen im Kabelwerk der AEG

Die mit Papier, Jute oder anderen Faserstoffen besponnenen Kupferkabel kommen in den Vakuumtrockenschrank, wo der Umspinnung durch die gleichzeitige Einwirkung von Wärme und Luftleere die letzte Spur von Feuchtigkeit entzogen wird

783. Versenkte Trockenöfen im Kabelwerk der Siemens-Schuckertwerke
Nachdem die Trocknung vollendet ist, läßt man von unten her unmittelbar die heiße, dünnflüssige Isoliermasse in den Trockenschrank einströmen. Sie tränkt die Kabelumspinnung und nimmt ihr dadurch die Möglichkeit, wieder Feuchtigkeit aus der Luft aufzunehmen

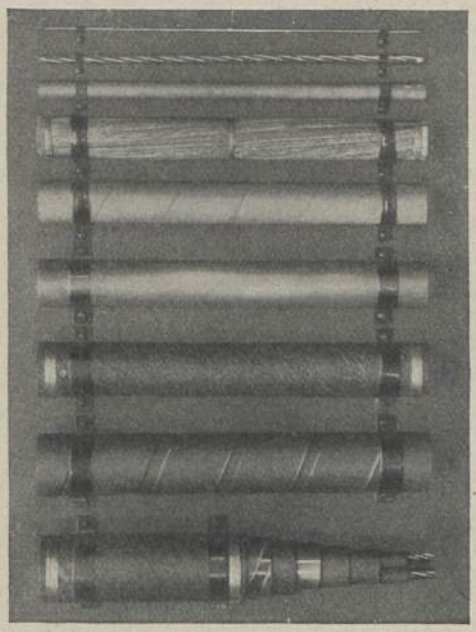
Verfolgen wir nun die weitere Entwicklung eines einfachen Faserstoffkabels. Die vieldrähtigen Kupferseile wurden auf Maschinen der geschilderten Art zunächst mehrfach mit starkem Jutegarn, Papier oder dergleichen umsponnen. Sie wurden danach zu zweit oder dritt unter Beigabe weiterer Jute-Einlagen verseilt. Schließlich wurde das so weit fertiggestellte Kabel nochmals mit einer starken Jute-Umspinnung versehen. Jetzt liegt es in einem ringförmigen Gefäß aus starkem, perforiertem Blech, wie es Bild 782 zeigt, und kommt dann in den Vakuumtrockenschrank, der dahinter sichtbar ist. In diesem Schrank wird eine Luftleere von nur wenigen Millimetern Quecksilbersäule erzeugt, und außerdem wird er auf einige 70 Grad geheizt. Die Jute, mit der das Kabel umsponnen wurde, machte einen staubtrockenen Eindruck. Trotzdem gehen hier bei der Behandlung im Vakuumtrockenschrank noch viele Liter klares Wasser aus ihr heraus. Erst danach ist das Kabel wirklich trocken im absoluten Sinne, und die Jute besitzt jetzt einen Höchstwert an Isolierfähigkeit. Aber dieser Zustand würde nicht andauern, wenn man das Kabel nun wieder sich selbst überließe, denn alle Faserstoffe sind stark hygroskopisch und saugen begierig Feuchtigkeit aus der Luft an. Deshalb wird das ganze Kabel einschließlich der Blechwanne, in der es liegt, jetzt in einen großen Tank mit heißem, flüssigem Isolierstoff versenkt, in dem sich die Jute mit der Harz- und Wachsmasse vollsaugt und jede Aufnahmefähigkeit für Feuchtigkeit verliert. Bei den neuesten Anlagen sind Trockenschrank und Isoliervorrichtung gleich in einem Stück ausgeführt, so daß das getrocknete Kabel erst gar nicht wieder in Berührung mit der Luft kommt. Bild 783 zeigt eine derartige Anlage der Siemens-Schuckertwerke. Sobald hier die Trocknung in den kesselartigen Gefäßen vollendet ist, wird eine Rohrleitung geöffnet, die das luftleere Innere des Trockenschrankes mit einem heißen Isolierbad verbindet. Unter der Wirkung des äußeren Luftdruckes tritt die heiße Flüssigkeit in den Trockenschrank und tränkt die Kabel gleich dort. Danach wird die Isolierflüssigkeit durch einen in den Schrank gegebenen Luftüberdruck wieder hinausgeblasen, die Verschlüsse des Deckels werden geöffnet (links in Bild 783), und der Deckel wird abgenommen. Ein Kran hebt die Blechmulde mit dem imprägnierten Kabel heraus und bringt sie zur Bleipresse.

Die nächste Fabrikationsetappe bringt die Umpressung des Kabels mit einem nahtlosen Bleimantel. Die Bleipresse arbeitet im Prinzip genau wie die Guttaperchapresse. Man unterscheidet Warmpressen mit Gasbeheizung, in denen das Blei so weit erhitzt wird, daß es breiig wird, und Kaltpressen, in denen das kalte Blei einfach durch einen genügend hohen Druck in Mantelform gepreßt wird.

Durch den Bleimantel ist das Kabel gegen Erdfeuchtigkeit geschützt. Aber es hat sich leider gezeigt, daß Ratten und Mäuse den Bleimantel des öfteren anknabbern und dadurch das Kabel verderben. Es wird daher häufig noch besonders armiert. Zu dem Zweck erhält es erst auf dem Bleimantel noch einmal eine Faserstoffumspinnung, die sofort mit Isolierstoff getränkt wird. Sie bildet die notwendige elastische Zwischenlage zwischen dem immerhin gegen mechanische Einwirkungen ziemlich empfindlichen Bleimantel und der nun aufzubringenden Eisenarmierung. Diese besteht entweder aus kräftigem Eisenband, das in Schraubenlinien um das Kabel gewickelt wird, oder aus einer größeren Anzahl von Stahldrähten von besonderem segmentförmigem Querschnitt, die es in Form eines geschlossenen Stahlmantels umhüllen. Diese letztere Form der Armierung oder Bewehrung wird besonders bei solchen Kabeln benutzt, die sich bei der Verlegung auf bedeutende Längen frei tragen müssen, insbesondere also bei Seekabeln und bei Schachtkabeln, welch letztere frei hängend in die bis zu tausend Meter tiefen Schächte eingebracht werden müssen. Um die eiserne Armierung wird nochmals eine Juteumhüllung gelegt und mit heißem Asphalt getränkt. Zum

Schluß wird das nun fertige Kabel mit einer Kalklösung bespritzt, um ein Kleben der asphaltierten Windungen aneinander zu verhüten, und auf die Transporttrommel gerollt.

In dem hier geschilderten Fabrikationsgang eines Bleikabels liegt die kritische Stelle bei der Aufbringung des Bleimantels. Die Frage lautet, ob dieser auch ohne den kleinsten Fabrikationsfehler, ohne die kleinsten dem Auge kaum sichtbaren Risse das Kabel vollkommen dicht umgibt. Vielfach erzwingt man an dieser Stelle eine erhöhte Sicherheit, indem man das Kabel mit zwei oder sogar drei entsprechend dünneren Bleimänteln übereinander versieht. In jedem Falle ist an dieser Stelle der Fabrikation eine scharfe Prüfung notwendig, und deswegen wird der Fabrikationsvorgang hier zunächst unterbrochen und das mit dem Mantel versehene Kabel kommt in die Prüfbottiche. Es sind recht umfangreiche mit einer Salzlösung gefüllte Bottiche. Das Kabel wird in die Lösung so hineingelegt, daß nur seine beiden Enden hinausragen. Danach wird die Kupferseele des Kabels mit dem einen Pol, der Bleimantel mit dem anderen Pol einer Hochspannungsquelle verbunden und der elektrische Widerstand der zwischen beiden befindlichen isolierenden Schicht genau gemessen. Dabei würde die Salzlösung an Fehlerstellen des Bleimantels gerade unter dem Einfluß der Hochspannung sehr schnell in das Kabel eindringen, die Isolation verschlechtern und dadurch den Fehler verraten. Erst nachdem das Kabel längere Zeit und dabei auch vorübergehend mit dem Anderthalbfachen seiner normalen Spannung in dieser Weise geprüft und für gut befunden worden ist, geht die Fabrikation weiter, und es wird in der beschriebenen Weise mit der Armierung versehen.



784. Der Werdegang eines dreiadrigen Starkstromkabels

Vom Draht zur Litze, zum isolierten Einzelleiter, zum versponnenen Dreileiter und so fort bis zum fertigen eisenbandarmierten Kabel

Bild 784 zeigt den Werdegang eines Dreileiterstarkstromkabels für eine Spannung von 6000 Volt bei einem Kupferquerschnitt von 16 Quadratmillimetern pro Ader. Die Abbildung zeigt von unten nach oben einen einzelnen Kupferdraht und eine aus sieben Drähten gesponnene Kupferader. Weiter eine solche Ader isoliert. Danach drei dieser Adern unter Dazugabe von Faserstoff zu einem Strang mit rundem Querschnitt verseilt. In der folgenden Etappe ist dieser Strang nochmals durch eine Umwicklung mit Band und Hartpapier isoliert, in der nächsten mit einem Bleimantel umpreßt. Es folgt eine Lage der federnden Juteschicht auf dem Bleimantel und dann die Eisenbandarmierung, die in diesem Falle aus zwei sich überlappenden Bandspiralen besteht. Die letzte Darstellung zeigt das fertige Kabel, wobei es auf der einen Seite stufenförmig angeschnitten ist, so daß man die einzelnen Fabrikationsetappen gut verfolgen kann.

Bild 786 zeigt ein Drehstromkabel für eine Spannung von 60 000 Volt zwischen den einzelnen Adern. Die Isolation der einzelnen Adern gegeneinander ist hier erheblich stärker als bei dem in Bild 784 gezeigten Kabel. Gut erkennbar sind die in Segmentform hinzugesponnenen Faserstoffe, durch welche die drei Adern zu einem kreisförmigen Querschnitt ergänzt werden. Dabei darf man nicht vergessen, daß die drei Kabeladern nicht etwa geradlinig nebeneinander herlaufen, sondern selbstverständlich ebenfalls miteinander verseilt sind. Nur durch diese Verseilung lassen sich ja alle schädlichen induktiven und kapazitiven Wechselwirkungen zwischen dem Kabel und seiner Umgebung aufheben. Auch hier folgt ein starker Bleimantel, eine Eisenbandarmierung und eine letzte Faserstoffhülle.

Für die Isolation der Hochspannungskabel nahm man in früheren Jahren ausschließlich Kautschuk, der nach dem bekannten Preßverfahren um die verzinnte Kupferseele herumgepreßt und dann vulkanisiert wurde. In neuerer Zeit spielen auch hier andere Stoffe und besonders das Papier eine bedeutende Rolle. Die Entwicklung geht scheinbar dahin, die Faserstoff- und Gummikabel immer mehr durch Papierkabel zu verdrängen, wobei das Papier fabrikatorisch ebenso behandelt, das heißt ebenso getrocknet und imprägniert wird wie die Jute.

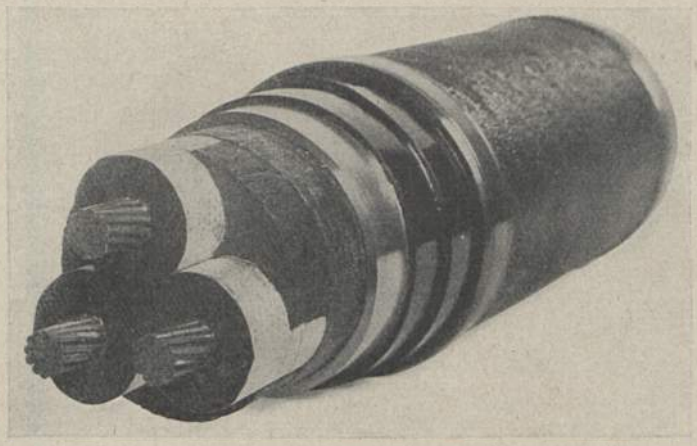
785. Verlegung eines Drehstrom-Hochspannungskabels in den Straßen von Buenos Aires

Das Kabel wird von der drehbar gelagerten Kabeltrommel her über zahlreiche Rollen abgezogen und in den Kabelgraben gebracht

Im allgemeinen werden die Starkstromkabel in Längen von 200 bis 500 Metern fabriziert, was in den Stadtnetzen für die Verlegung von Anschlußkasten zu Anschlußkasten voll ausreicht. Bisweilen jedoch und namentlich bei Seekabeln werden viel größere Längen von mehreren Kilometern notwendig. Da gibt es denn ganz gewaltige Trommeln und riesenhafte Kabelgewichte, die jeden Eisenbahntransport ausschließen.

Bei Landverlegungen läuft das Kabel entweder von der bewegten Trommel ab, oder es wird von der stillstehenden Trommel abgezogen wie auf Bild 785.

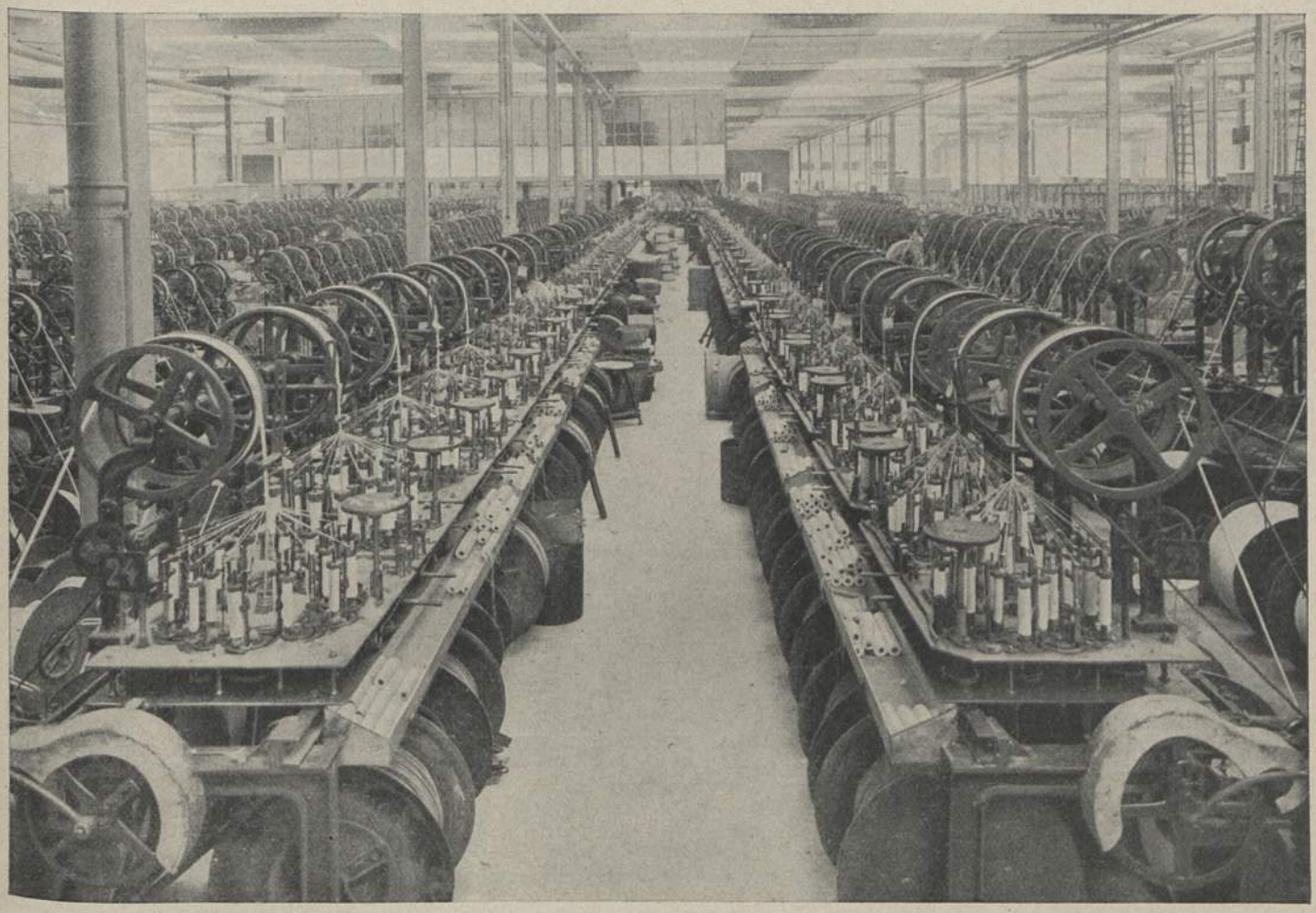
In das Arbeitsgebiet der Kabelfabriken fällt auch die Herstellung aller Installationsdrähte und Leitungen. Für diese, die nicht in das feuchte Erdreich gebettet werden sollen, kommt der Bleimantel nicht in Frage. Sie werden entweder mit Gummi umpreßt oder mit Faserstoffen umsponnen oder umklöppelt, die bisweilen noch in heißer Isoliermasse getränkt werden. Wohl das Interessanteste in diesem Teil der Fabrik sind die Klöppel- oder Flechtmaschinen, welche die Leitungen mit Garn umklöppeln. Betrachtet man einmal ein Stückchen umsponnener Litzenschnur etwas genauer, so sieht man, daß die Fäden, welche sie in Form eines geschlossenen Mantels umgeben, wirklich miteinander verflochten sind wie die Strähnen eines Zopfes, daß sie sich also fortwährend über- und unterschneiden. Diese Fadenführung wird auf den Klöppelmaschinen (Bild 787) in der Weise erzwungen, daß die Garnspulen, von denen die einzelnen Flechtfäden ablaufen, die zu umflechtende Leitung in Bahnen umkreisen, die sich fortwährend kreuzen, so daß jede der Spulen bald auf einem äußeren, bald auf einem inneren Kreis läuft. Bei dem gewaltigen Bedarf der elektrischen Industrie an solchen umklöppelten Leitungen arbeiten Tausende von Klöppelmaschinen in einem Saal und erfüllen ihn mit einem eigenartigen schnackernden Geräusch. Sinnverwirrend wirken dabei auch die Zehntausende von Garnspulen, die in unermüdlichem Wirbel ihre Bahnen ziehen.



786. Dreiadriges Drehstromkabel für 60 000 Volt

Die Abbildung läßt gut erkennen, wie die drei verseilten Einzelleiter durch Beigabe von Faserstoffeinlagen zu einem zylindrischen Körper ergänzt werden

Ein eigenartiges, wegen seiner leichten Verlegbarkeit und Unauffälligkeit in neuerer Zeit immer mehr Verwendung findendes Installationsmaterial ist der nach seinem Erfinder benannte Kuhlodraht. Zwei mit Gummi oder imprägniertem Faserstoff isolierte Drähte sind verseilt und dann in einem



787. Klöppelmaschinen im Kabelwerk der Siemens-Schuckertwerke

Das Kabel bzw. die bereits isolierte Litze tritt von unten her in die Maschine und läuft nach oben hin über eine Führungsrolle ab. Dabei flechten die sich in ihren Bahnen fortwährend überkreuzenden Garnspulen der Maschine einen Mantel in Klöppelmanier um die Litze

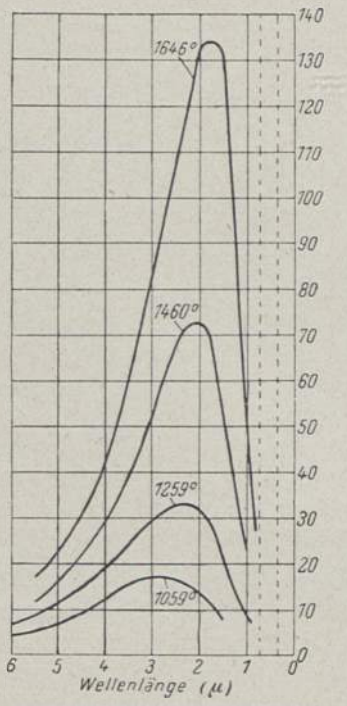
sie eng umschließenden Mantel aus verzinktem Eisenblech untergebracht, der aus einem Blechstreifen gebogen und durch Verfalzung der beiden Blechränder geschlossen ist. Das schwierige Problem der Falzbildung ist hier in einer geradezu genialen Weise gelöst. Der Blechmantel des fertigen Drahtes zeigt zwar die Falznaht, erinnert aber im übrigen an einen nahtlosen Bleimantel.

Der Vollständigkeit halber mag an dieser Stelle noch bemerkt sein, daß die Kabelwerke der großen Elektrizitätsfirmen nicht nur das gesamte Leitungsmaterial vom schwersten Kabel bis zum einfachen Klingeldraht herstellen, sondern daneben auch die verschiedenen Arten von Isolierrohren für die sogenannten Rohrverlegungen und weiter sämtliche Metallformstücke wie Kabelschuhe und dergleichen, die bei der Ausführung von Leitungsnetzen notwendig sind. Metallrohre und Gummirohre aller Art werden in diesen Werken gefertigt. Nach dem Preßverfahren entstehen die mannigfachen und teilweis recht komplizierten Formstücke aus Metall und Isolierstoffen. Nach dem Spritzgußverfahren werden Armaturteile fabriziert. Alles das, was die Monteure für die Errichtung von Freileitungs- und Kabelnetzen an Leitungsmaterial und Zubehörteilen benötigen, entsteht hier, um in breitem Strome den Baustellen zuzufließen.

*

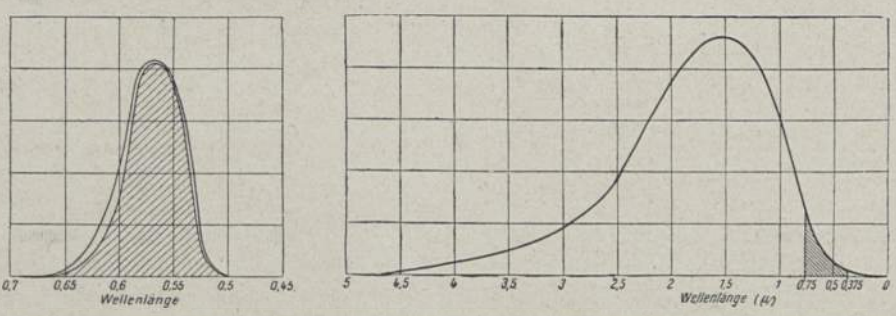
Ein fester Körper, der über die Temperatur seiner Umgebung erwärmt wird, sendet die ihm bei der Erwärmung zugeführte Energie wieder in Form von Strahlung aus. Die strahlende Energie ist eine Wellenbewegung des Lichtäthers, die sich mit der Lichtgeschwindigkeit von 300 000 Kilometern in der Sekunde durch den Raum fortpflanzt. Dabei besteht immer die Beziehung, daß die Zahl der Wellen oder Schwingungen in der Zeiteinheit multipliziert mit der Wellenlänge gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Die Wellenlänge selbst variiert bei der strahlenden Energie von vielen Kilometern (elektrische Wellen) bis zu Hundertmillionsteln eines Millimeters (Röntgenstrahlen). Ein winziger Teil aus dieser unendlichen Mannigfaltigkeit, die Wellenlängen von 750 bis 375 Millionsteln eines Millimeters, werden von unserem Auge als Licht empfunden. Die nächstlängeren spüren wir auf der Haut als strahlende Wärme.

Treiben wir nun die Erhitzung eines festen Körpers, etwa eines Stück Eisens im Schmiedefeuer allmählich immer weiter, so zeigt sich folgendes. Bei einer Temperatur von rund 500 Grad Celsius erstrahlt das Eisen in dunkler Rotglut. Bei weiterer Temperaturerhöhung geht die Farbe des glühenden Eisens allmählich in helles Rot, in Gelbrot und schließlich in Gelbweiß über. Gleichzeitig steigt die Menge des von dem Eisen ausgesandten Lichtes ganz bedeutend. Während ein dunkelrot glühendes Stück eben gerade noch gesehen wird, erhellt ein auf Schweißhitze gebrachtes die ganze Schmiede mit blendendem Licht. Schon diese einfachen, seit langen Zeiten bekannten Erfahrungen zeigen, daß man die Temperatur eines strahlenden, festen Körpers, eines sogenannten Temperaturstrahlers nach Möglichkeit in die Höhe treiben muß, wenn man eine gute Lichtausbeute, eine kräftige Beleuchtung mit ihm erzielen will.




788. Strahlungskurven des „absolut schwarzen Körpers" bei vier verschiedenen Temperaturen. Auf der Wagerechten sind die Wellenlängen in tausendstel Millimetern aufgetragen, senkrecht dazu die auf die betreffenden Wellenlängen entfallenden Energiebeträge. Der sichtbare Teil der Strahlung von Rot bis Violett liegt zwischen den beiden gestrichelten Linien ganz rechts

Exakt und zahlenmäßig wurden die Gesetze, denen ein Temperaturstrahler gehorcht, freilich erst festgelegt, nachdem man in der Lage war, mit besonderen hochempfindlichen Instrumenten wie Thermosäulen und Bolometern genau die einzelnen Energiebeträge zu messen, die ein Temperaturstrahler bei irgendeiner Temperatur im Bereich der verschiedenen Wellenlängen ausstrahlt. Bild 788 zeigt solche Strahlungskurven für einen schwarzen Körper bei vier verschiedenen Temperaturen. Die wagerechte Linie gibt dabei die Wellenlängen in tausendstel Millimetern. Nur das schmale zwischen den beiden punktierten senkrechten Linien liegende Gebiet entspricht der sichtbaren Strahlung von Rot bis Violett durch die Farben des Regenbogens. Das links davon liegende Gebiet gehört der Wärmestrahlung. Der senkrechte Abstand der einzelnen Kurvenpunkte von der wagerechten Grundlinie entspricht dem mit dieser Wellenlänge ausgestrahlten Energiebetrag. Eine Betrachtung der vier Kurven zeigt zunächst ein gewaltiges Anwachsen der gesamten ausgestrahlten Energiemenge, die ja durch die von der Kurve umrahmte Fläche dargestellt wird, mit wachsender Temperatur. Nach dem Strahlungsgesetz von Stephan und Boltzmann wächst die gesamte Strahlungsenergie eines schwarzen Körpers mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur (die absolute Temperatur, gemessen in Grad Kelvin gleich der Temperatur in Celsiusgraden vermehrt um 273 Grad). Außerdem aber läßt sich aus diesen vier Kurven auch deutlich erkennen, daß das Maximum der Strahlung, der Gipfel der Kurve sich mit wachsender Temperatur allmählich von links nach rechts, von der Wärmeseite zur Lichtseite hin verschiebt.

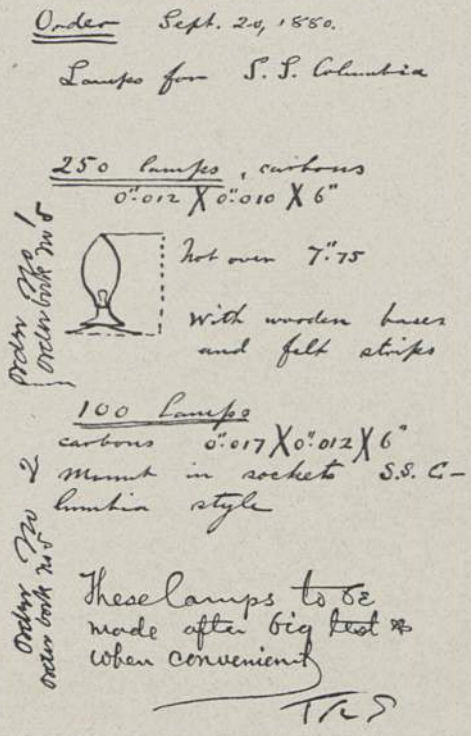



789 u. 790. Energiekurve der Gesamtstrahlung eines Glühwürmchens (links) und einer Kohlenfadenglühlampe (rechts)

Links: Das menschliche Auge kann Strahlungen von 0,7 tausendstel Millimetern (rot) bis 0,4 tausendstel Millimetern (violett) wahrnehmen. Die Strahlung des Glühwürmchens liegt innerhalb dieser Grenzen, und zwar zum größten Teil im Gelbgrün. Rechts: Der schraffierte Teil bedeutet die sichtbare Strahlung des Glühfadens. Das Verhältnis der schraffierten Fläche zu der gesamten, von der Kurve umrandeten Fläche gibt den beleuchtungstechnischen Wirkungsgrad der Lampe

Das Ideal wäre es natürlich, wenn die Strahlung mit ihrem Maximum mitten in den Bereich der sicht-

baren Strahlung hineinfiele und überhaupt nur innerhalb dieses Bereiches Energie ausgestrahlt würde. Aber dieses Ideal des 100prozentigen kalten Lichtes ist unserer Technik gegenwärtig noch unerreichbar und wird es vielleicht für immer bleiben. Nur in der Natur finden wir etwas Derartiges bei den leuchtenden Organen der Tiere und Pflanzen. So zeigt Bild 789 die Energiekurve der Gesamtstrahlung eines Glühwürmchens. Bei ihrer Betrachtung ist zu berücksichtigen, daß die Wellenlänge von 6 Zehntausendsteln eines Millimeters dem Grün, diejenige von 5,5 Zehntausendsteln dem Gelbgrün entspricht. Der größte Teil der Strahlung liegt in diesem Farbengebiet, woraus sich die grünliche Farbe des leuchtenden Glühwürmchens ergibt. Hier fällt jedenfalls die gesamte überhaupt nur erzeugte Strahlung in das sichtbare Gebiet. Dagegen hat die Strahlungskurve einer elektrischen Glühlampe etwa die in Bild 790 dargestellte Form, nur die kleine schraffierte Fläche ist nutzbare Lichtenergie, die ganze übrige große Fläche nutzlose Strahlung, zum überwiegenden Teil dunkle Wärmestrahlung.




791. Die erste Bestellung auf Glühlampen in Edisons Orderbuch

Die vorstehenden theoretischen Betrachtungen aus dem Gebiet der Strahlungslehre zeigen, daß ein Temperaturstrahler eine um so wirksamere und wirtschaftlichere Lichtquelle werden muß, je höher man seine Temperatur zu treiben vermag. Dabei erfolgt die Erhitzung in allen elektrischen Lampen durch die Zuführung elektrischer Leistung, die sich in Watt messen läßt. Für die Angabe der Lichtstärke benutzt man in Deutschland die Hefnerkerze, die ihren Namen nach dem bereits erwähnten Erfinder der Differentialbogenlampe v. Hefner-Alteneck trägt. Hefner gab die Konstruktion einer kleinen mit Amylazetat gespeisten Lampe an, deren Flamme in horizontaler Richtung eine Lichtstrahlung aussendet, die als Einheit der Lichtstärke als Normal- oder Hefnerkerze bezeichnet wird. Die Einheit der Lichtleistung ist das Lumen, das ist diejenige Lichtmenge, die auf jeden Quadratmeter einer Kugeloberfläche auffällt, deren Halbmesser ein Meter ist und in deren Mittelpunkt sich eine Lichtquelle mit der nach allen Richtungen hin gleichmäßigen Lichtstärke von einer Hefner-Kerze befindet. Da die Oberfläche einer Kugel von ein Meter Halbmesser 12,57 Quadratmeter beträgt, so würde die Hefner-Lampe einen Lichtstrom von 12,57 Lumen aussenden, wenn sie nach allen Richtungen gleich stark strahlte. Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist das Lux; sie wird auf einer Fläche von einem Quadratmeter erzeugt, wenn auf diese ein Lichtstrom von einem Lumen trifft. Mit Hilfe besonderer Apparate, der Photometer, mißt man die Lichtstärke einer Lichtquelle, indem man diese mit einer anderen von bekannter Lichtstärke vergleicht. Aus der so gemessenen Lichtstärke in Hefner-Kerzen ergibt sich, da der Wattverbrauch einer elektrischen Lampe bekannt ist, ihr spezifischer Verbrauch in Watt pro Kerze und ebenso ihre Lichtausbeute pro Watt. Die Strahlungstheorie kommt zu dem Ergebnis, daß ein idealer Temperaturstrahler, bei dem die gesamte zugeführte Energie in Form von sichtbarer Strahlung ausgesandt würde, eine Lichtleistung von etwa 22 Hefner-Kerzen pro Watt haben müßte. Dagegen hatten die ersten von Edison auf den Markt gebrachten Kohlenfadenglühlampen einen spezifischen Verbrauch von fünf Watt pro Hefner-Kerze. Ihr Wirkungsgrad betrug also nur 1% des wenigstens theoretisch Möglichen.

Viel günstiger lagen die Verhältnisse von Anfang an bei den elektrischen Bogenlampen. An den Spitzen der Bogenlampenkohlen wird der Kohlenstoff bis zu einer Temperatur von 3600 Grad Celsius erhitzt, bei der er einen Moment flüssig wird, um dann sofort wegzudampfen. Bei einer solchen Temperatur muß der Wirkungsgrad, wie sich nach der in Bild 788 gegebenen Kurvendarstellung ohne weiteres vermuten läßt, viel besser sein als bei einer Kohlenfadenlampe, deren Faden etwa mit 1700 Grad glüht, und er ist es auch in der Tat. Schon die ersten Bogenlampen gaben zwei Hefnerkerzen pro Watt, hatten also einen zehnfach besseren Wirkungsgrad als die ersten Kohlenfadenglühlampen. Wenn die Glühlampe trotzdem Eingang gewinnen und sogar langsam aber stetig das Bogenlicht verdrängen konnte, so war das in anderen Eigenschaften der Glühlampe begründet. Bild 659 auf Seite 386 zeigt Edisons älteste Kohlenfadenlampe mit einem Faden aus verkohltem Papier. Wohl macht das Ganze noch mehr den Eindruck eines Laboratoriumapparates als eines Industrieerzeugnisses. Immerhin sind Einzelheiten wie die Verbindung des Kohlenfadens

792. Geheimrat Professor Dr. Walter Nernst, der Erfinder der Nernstlampe. Phot. M. Höhlig, Berlin

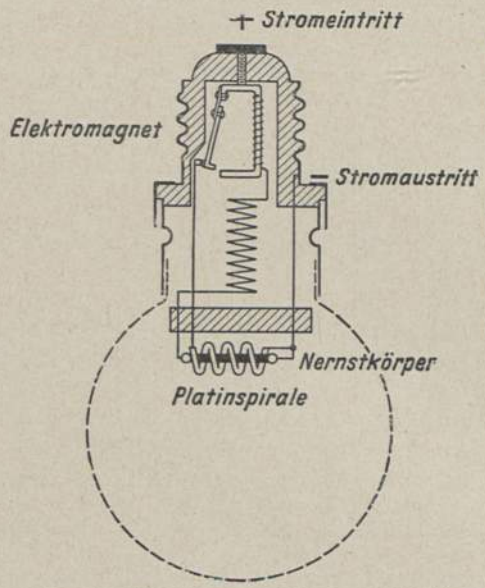
793. Dr. Karl Freiherr Auer von Wellsbach, der Erfinder des Gasglühlichts und der Osmiumlampe

mit den Zuleitungen und die Durchführung der Leitungen in Form von Platindrähten durch das Glas schon recht gut ausgebildet und finden sich wenig verändert auch bei den Metalldrahtlampen unserer Tage. Bild 791 gibt die ersten Lampenbestellungen aus Edisons Auftragsbuch wieder. Zunächst eine Order auf 250 Glühlampen für den Dampfer Columbia, die erste größere Installation, die Edison für fremde Rechnung ausführte. Bild 796, 1—3 zeigt die Formen der ersten in den achtziger Jahren in Deutschland hergestellten Kohlenfadenlampen.

An und für sich war Edison durchaus auf dem richtigen Weg, als er die Kohle als Material für seinen Leuchtfaden wählte, denn von allen überhaupt bekannten Stoffen hat sie den höchsten Schmelzpunkt, wie aus der folgenden Tabelle hervorgeht.

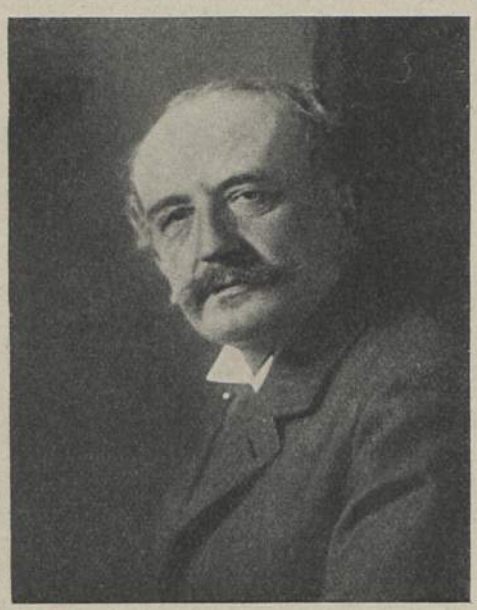
| Material | Schmelzpunkt in Grad Celsius |
|---|---|
| Aluminium | 657 |
| Silber | 962 |
| Kupfer | 1084 |
| Nickel | 1452 |
| Eisen | 1600 |
| Platin | 1800 |
| Osmiumfaden | 2500 |
| Tantaldraht | 2770 |
| Wolframdraht | 3370 |
| Kohlenfaden | 3600 |

Aber leider war es nicht möglich, den Kohlenfaden in dem Glaskolben auch nur annähernd bis zur Nähe seines Schmelzpunktes zu erhitzen. Schon bei viel tieferen Temperaturen setzte unter der Wirkung des elektrischen Stromes eine Zerstäubung des Fadens ein, welche die Lebensdauer der Lampe schwer beeinträchtigte. Immerhin gelang es, den spezifischen Verbrauch der Kohlenfadenlampe durch systematische Verbesserungen des Fadens allmählich bis auf zwei Watt pro Hefnerkerze herabzudrücken. Besonders vorteilhaft wirkte dabei die in den neunziger Jahren erfundene Methode der sogenannten Metallisierung der Kohlenfäden. Der fertiggestellte Kohlenfaden wird dabei in einem elektrischen Ofen, also nicht durch direkte Strombeschickung, sondern von außen her einige Zeit auf eine Temperatur von etwa 3500 Grad Celsius erhitzt. Dabei sintern die aschenartigen Bestandteile des Fadens zusammen, er zeigt danach ein graues metallisches Aussehen, und derartige Lampen können so hoch beansprucht werden, daß sie nun mit einem spezifischen Verbrauch von nur noch zwei Watt pro Kerze bei einer hinreichenden Lebensdauer brennen. Damit war aber auch erreicht, was sich mit dem Kohlenfaden überhaupt erreichen ließ. Gleichzeitig begann die Erfindung Auer v. Welsbachs, das Gasglühlicht, dem elektrischen Licht eine so schwere Konkurrenz zu bereiten, daß unbedingt etwas Grundlegendes geschehen mußte, wenn anders nicht eine vollkommene Verdrängung der elektrischen Glühlichtbeleuchtung eintreten sollte.




794. Einrichtung der Nernstlampe

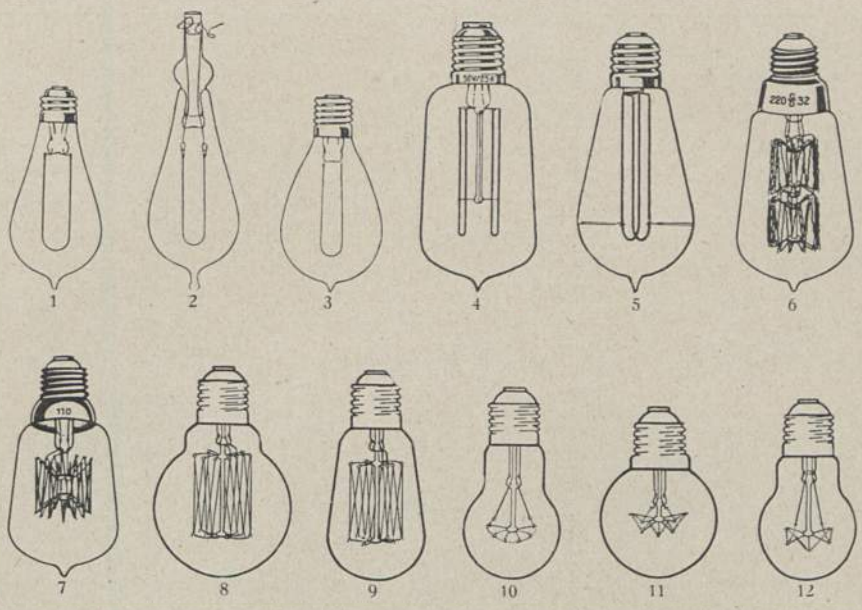
Die Bestrebungen hierzu setzten um die Jahrhundertwende von verschiedenen Seiten ungefähr gleichzeitig und mit verschiedenen Mitteln ein. An erster Stelle muß der bekannte Berliner Physiker, Professor Dr. W. Nernst, genannt werden, der es mit einem Leiter zweiter Klasse versuchte. Sein Leuchtstäbchen bestand aus einer Mischung von Zirkonium-, Magnesium- und Thoriumoxyd. Ein solches Stäbchen konnte in freier Luft mit einer Temperatur von etwa 2200 Grad Celsius gebrannt werden und hatte dabei einen spezifischen Verbrauch von etwa 1,5 bis 1,7 Watt pro Kerze. Das bedeutete auch den besten Kohlenfadenlampen gegenüber einen merklichen Fortschritt. Aber die Leiter zweiter Klasse sind nur in glühendem Zustande stromleitend, bei gewöhnlicher Temperatur dagegen fast vollkommene Isolatoren. Es war deshalb notwendig, die Nernstlampe mit einem besonderen Heizwiderstand in Form einer Platinspirale (heute technisch „Wendel" genannt, weil sie nicht wie die echte Spirale in einer Ebene liegt, sondern die Form der Wendeltreppe zeigt) auszurüsten, die hellrot aufglühte, sobald die Lampe eingeschaltet wurde, und den Oxydstift erhitzte. Sobald dann der Strom durch den Stift floß, betätigte er ein Relais und schaltete die Heizwendel aus. Bild 794 zeigt die Einrichtung der Nernstlampe. Zu beachten ist dabei, daß die Glasglocke durch Öffnungen mit der Außenluft in Verbindung steht. Die Nernstlampe kam etwa im Jahre 1900 recht zahlreich zur Verwendung. War sie doch das erste Mittel, mit dem die Elektrotechnik den immer gefährlicher werdenden Ansturm der Gasbeleuchtung zurückzuschlagen versuchte. Aber sie mußte wieder verschwinden, sobald Neueres, Besseres auf den Markt kam.



795. Wilhelm von Siemens,
der Nachfolger von Werner Siemens in der Leitung des Siemens-Konzerns, gab den Anstoß zur Konstruktion der Tantallampe

Der nächste Versuch in dieser Beziehung sollte gerade von dem Manne ausgehen, der vorher dem Gaslicht durch die Erfindung des Glühstrumpfes die Überlegenheit über das elektrische Glühlicht verschafft hatte. Auch Auer von Welsbach begann sich um die Jahrhundertwende mit einer Verbesserung der elektrischen Glühlampe zu beschäftigen, und zwar wählte er als Fadenmaterial das Osmium, das bei einem Schmelzpunkt von 2500 Grad in der Tat nicht ungeeignet erschien. Es gelang ihm auch, Osmiumfadenlampen herzustellen (Bild 796, 4 u. 5), die einen um 50% besseren Wirkungsgrad als die besten Kohlenfadenlampen besaßen und eine Lebensdauer bis zu mehreren tausend Stunden aufwiesen. Aber diesen zweifellosen Vorzügen standen doch wieder manche Nachteile gegenüber. Infolge der hohen Leitfähigkeit des Osmiums, die große Fadenlängen erforderte, war es nur möglich, Lampen für Spannungen bis zu etwa

37 Volt zu bauen. Man mußte also bei 110 Volt drei solcher Lampen, bei 220 Volt ihrer sechs hintereinander schalten. Außerdem wurde der Faden in der Glut weich, und es war nur möglich, die Lampen genau senkrecht nach unten hängend zu brennen. Sie fanden ebenso wie die Nernstlampen vorübergehend starke Verbreitung, aber auch sie mußten wieder verschwinden, als Besseres kam.

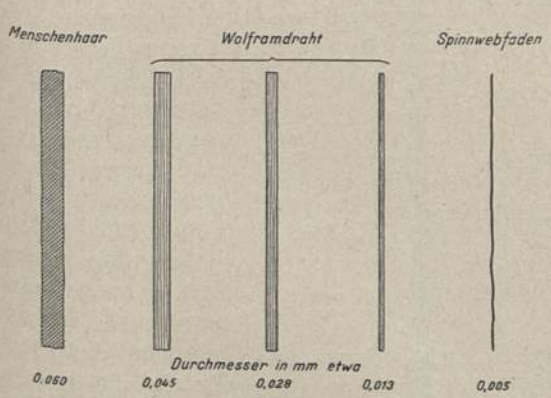



796. Verschiedene Typen von Glühlampen

1—3 die ersten in Deutschland hergestellten Kohlenfadenlampen für eine Spannung von 110 Volt, 4 u. 5 Osmiumlampen nach Auer, 6 u. 7 Tantallampen, 8—12 luftleere und gasgefüllte Wolframdrahtlampen

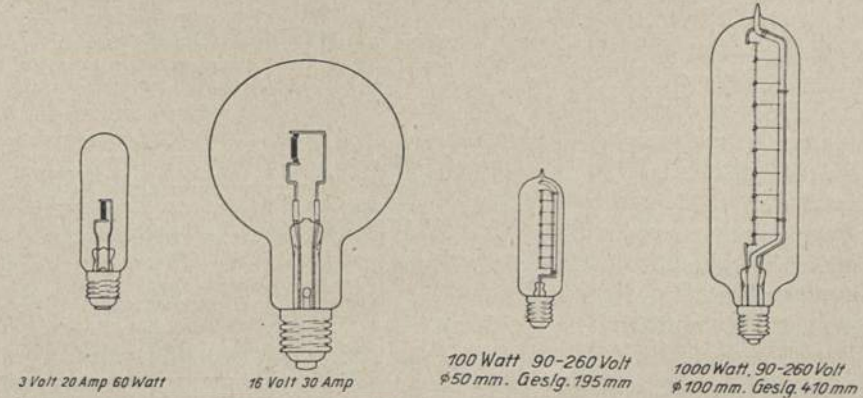
Während die Nernstlampe von der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft auf den Markt gebracht worden war, war auch die Siemensgruppe nicht untätig geblieben. Der damalige Leiter des Konzerns, Wilhelm von Siemens, erkannte klar, daß etwas Einschneidendes geschehen müsse, wenn anders das elektrische Licht nicht verschwinden solle. Er gründete ein besonderes Laboratorium, das unter der Leitung Werner von Boltons stand und die Aufgabe hatte, systematisch eine Verbesserung der elektrischen Glühlampe zu erzwingen. Aus der Liste der bekannten Stoffe (S. 446) konnten als Leuchtfadenmaterial nur noch Tantal mit einem Schmelzpunkt von 2770 Grad Celsius und Wolfram mit 3370 Grad in Frage kommen. Während aber das Wolfram sich als absolut spröde und unbearbeitbar erwies, ließ sich das Tantal in vorzüglicher Weise zu feinsten Drähten bis zu 0,05 Millimeter Durchmesser ausziehen. Es war in dieser Beziehung auch dem Osmium überlegen, aus dem Auer von Welsbach den feinen Leuchtfaden nur durch allerlei Kunstgriffe herstellen konnte. Ganz besonders bemerkenswert aber bleibt die Art und Weise, wie man sich hier zum ersten Male grundlegend und für alle späteren Glühlampen maßgebend mit der bei Metalldrahtlampen nun einmal unvermeidlichen großen Leuchtdrahtlänge abfand. Während die Länge des Kohlenfadens in den Lampen für 220 Volt etwa 20 Zentimeter betrug, handelte es sich jetzt um Tantaldrahtlängen von einem Meter und mehr, und dabei war dieser Draht so außerordentlich fein, daß er sich in glühendem Zustande überhaupt über keine größere Länge freitragen konnte. Man baute daher in den Glaskolben der Tantallampe einen ganz neuartigen Träger ein, über dessen Halter der Leuchtdraht in mäßiger Spannung und vielen Zickzackwindungen hin und her gezogen wurde (Bild 796), bis die erforderliche Leuchtdrahtmenge auf kleinem Raum untergebracht war. Wir werden auf diese Art der Drahthalterung noch später bei den Wolframlampen zurückkommen, die sie mit ganz geringfügigen Abänderungen übernommen haben. Durch diese neue Anordnung wurde es nun möglich, Tantallampen für Spannungen bis zu 220 Volt und mit Lichtstärken von 16 Normalkerzen an zu bauen. Bild 796 zeigt solche Tantallampen aus dem Jahre 1906, die bereits viel mehr an die heutigen Glühlampen als an die alten Edisonlampen erinnern.

Die Tantallampe bedeutete einen weiteren großen Fortschritt, aber auch hier war die Freude nicht ganz ungetrübt. Vor allen Dingen stellte sich recht überraschend heraus, daß sie für Wechselstrom nicht zu gebrauchen war. Während alle bisherigen Glühlampen Gleichstrom und Wechselstrom durchaus gleich gut vertrugen, zeigte der Tantaldraht unter dem Einflusse des Wechselstromes schon nach sehr kurzer Zeit eine ganz merkwürdige Strukturveränderung. Er zerfiel in kurze Abschnitte, die zunächst noch etwa wie die Teile eines Bambusrohres durch verdickte Knoten verbunden waren, sich aber immer weiter seitlich gegeneinander verschoben und schließlich ganz auseinandergingen. Bei der zunehmenden Verbreitung des Wechselstromes war diese Beobachtung ein schwerer Schlag




797. Vergleich verschieden starker Fäden

Die Wolframdrähte sind dünner als ein Menschenhaar, die dünnsten nur etwa doppelt so stark wie Spinnwebfäden

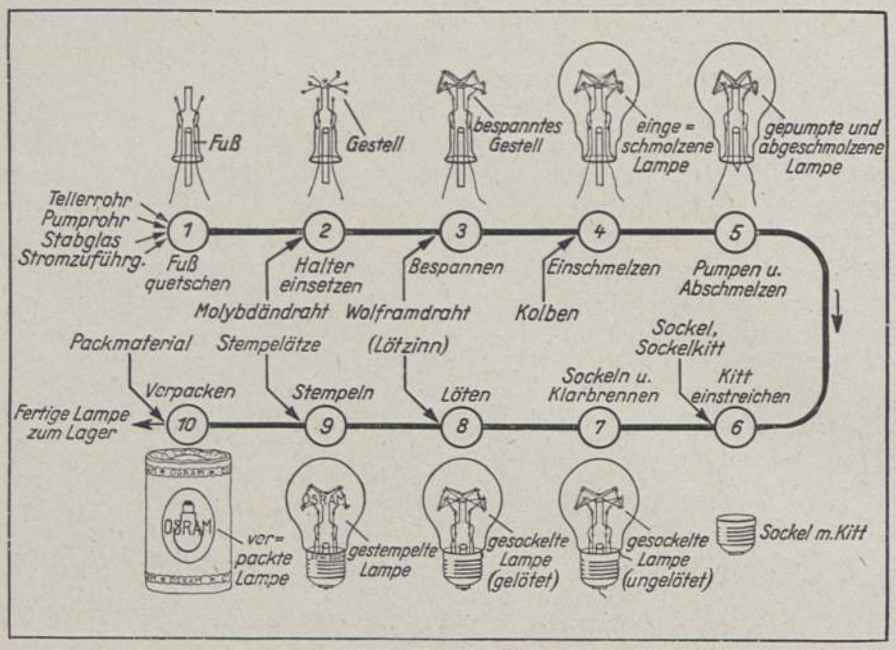



798. Wolframbandlampen und Wolframnitra-Soffitten-Lampen

Die ersteren finden in den Kinoprojektionsapparaten Verwendung, die letzteren dienen zur Beleuchtung von Theatersoffitten, Schaufensterauslagen und Lesepulten

für die Erfinder der Tantallampe. Aber schon war an einer anderen Stelle wieder etwas Neues geschehen, was die Technik der elektrischen Glühlichtbeleuchtung ein bedeutendes Stück weiterbringen sollte.

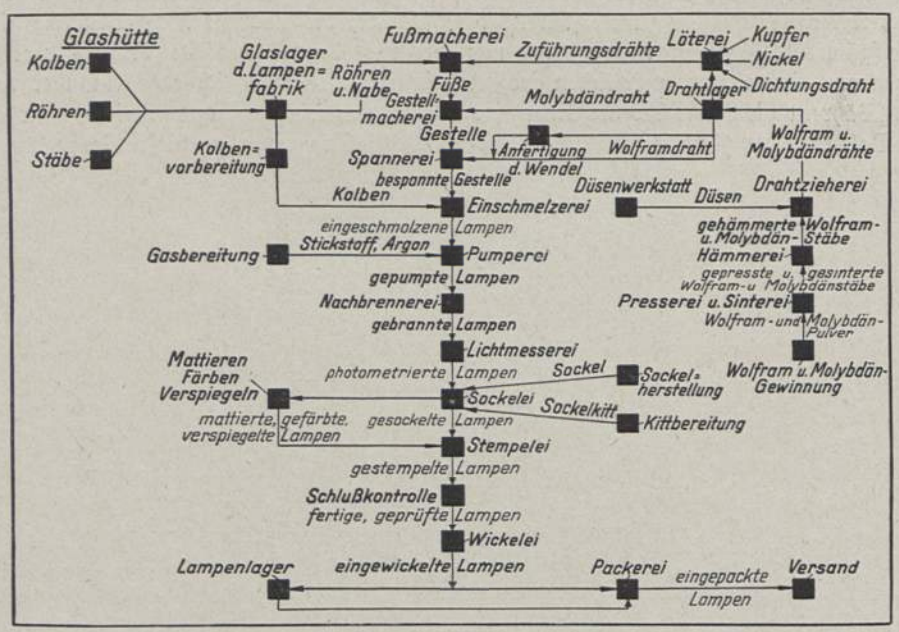
In der Liste der schwerst schmelzbaren Körper (Seite 446) war jetzt nur noch das Wolfram übrig, das durch seine Sprödigkeit bisher alle Erfinder abgeschreckt hatte, so sehr sein hoher Schmelzpunkt auch locken mochte. Jetzt machten sich unabhängig voneinander die Laboratorien der verschiedenen




799. Schema der Fließarbeit bei der Herstellung einer gasgefüllten Wolframdrahtlampe

großen Elektrizitätskonzerne und Lampenfabriken an die fast unlösliche scheinende Aufgabe heran, das spröde Metall in die Form eines feinen Leuchtdrahtes zu zwingen. Aus allen diesen Arbeiten kristallisierte sich im Laufe weniger Jahre das Wolframspritzverfahren heraus, mit dem sich bereits recht brauchbare Wolframlampen erzeugen ließen. Das Wolfram wurde dabei aus einem Wolframerz auf chemischem Wege in Form eines äußerst feinen metallischen Pulvers gewonnen. Das getrocknete Pulver wurde mit einem chemisch unwirksamen Bindemittel zu einer plastischen Pasta angerührt, und diese Pasta wurde schließlich unter sehr starkem Druck durch die haarfeine Bohrung eines Diamanten hindurchgepreßt oder hindurchgespritzt. Sie trat an der anderen Seite des Steines in Form eines zusammenhängenden Fadens heraus. Durch eine Behandlung im elektrischen Ofen wurde das Bindemittel ausgetrieben, während die Wolframteilchen zusammensinterten. So erhielt man Wolframfäden, die in ähnlicher Weise wie die Tantaldrähte auf einem Haltergestell in Zickzackform untergebracht wurden. Diese Wolframlampe (Bild 796, 8 u. 9) gestattete eine beträchtlich stärkere spezifische Belastung als die Tantallampe. Man konnte sie bei befriedigender Lebensdauer mit einer Temperatur von etwa 2000 Grad brennen, was einem Verbrauch von 1,1 Watt pro Hefnerkerze entsprach. In 30 Jahren hatte man jetzt den Wirkungsgrad der Glühlampe verfünffacht. Aber auch die Wolframlampe mit gespritzten Fäden war noch nicht vollkommen fehlerfrei. Die Wolframteilchen des feinen Fadens waren ja nur zusammengesintert, ohne ihre Sprödigkeit dabei zu verlieren. Schon geringe Erschütterungen genügten, um Fadenbrüche herbeizuführen.

Die Befreiung von diesem Übelstande brachte die amerikanische Laboratoriumstechnik. Sie machte das für so lange Zeit unmöglich Gehaltene doch schließlich möglich und verwandelte das bis dahin so unbedingt spröde Wolfram in ein geschmeidiges Metall, das sich ebenso gut zu feinsten Drähten ausziehen läßt wie das Tantal. Auch dies neue Verfahren geht von dem chemisch gewonnenen reinen Wolframpulver aus, das zunächst unter sehr starkem hydraulischen Druck in die Form eines Stabes gepreßt wird. Dieser Stab, der äußerst zerbrechlich ist, wird in einer Wasserstoffatmosphäre mit Hilfe des elektrischen Stromes in hellste Weißglut versetzt, wobei das Wolfram stark zusammensintert und an Festigkeit gewinnt. Der so vorbereitete Stab kommt dann weiter in weißglühendem Zustande in automatische Hämmerwerke, die ihn zu größerer Länge aushämmern und dabei seine Struktur immer weiter verbessern. Ist der Hämmerprozeß schließlich bei matter Rotglut vollendet, so hat man Wolframstäbe von etwa Streichholzdicke, die so geschmeidig geworden sind, daß man sie bei geringerer Erwärmung in der üblichen Weise durch Zieheisen ziehen und in feineren und immer feineren Draht verwandeln kann. Bald ist dabei für das Zieheisen die untere Grenze erreicht, und der gebohrte Diamant tritt an dessen Stelle. Dabei nimmt die Geschmeidigkeit des einst so spröden Materials noch immer



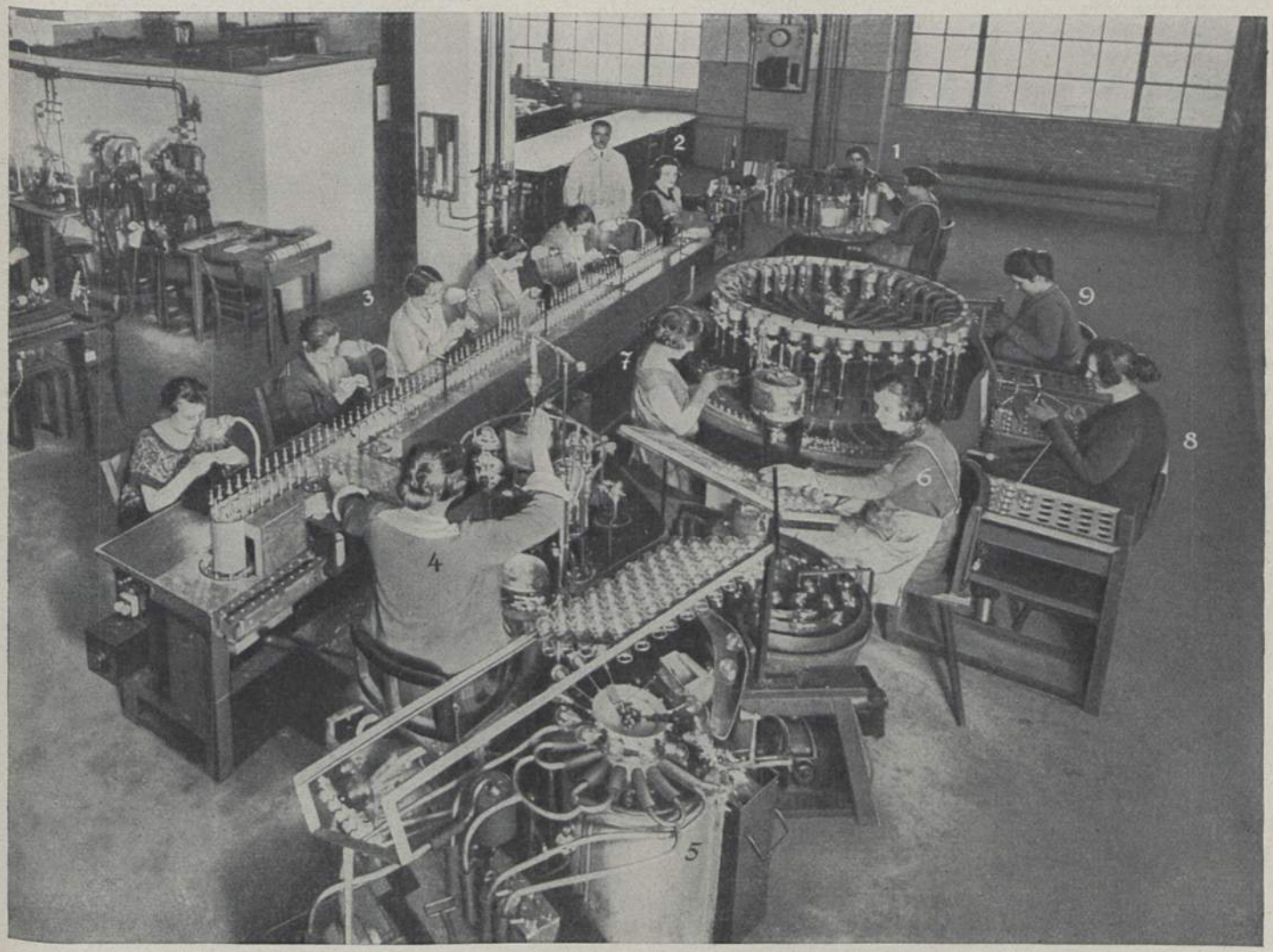

800. Fabrikationsschema einer elektrischen Glühlampe vom Antransport der Rohstoffe bis zur versandfertigen Lampe

weiter zu, und es kann schließlich in kaltem Zustande bis zu einem Durchmesser von einigen Tausendsteln eines Millimeters ausgezogen werden. Was das zu bedeuten hat, mag aus Bild 797 hervorgehen. Es zeigt links in stark vergrößertem Maßstabe ein Menschenhaar, in der Mitte drei verschieden starke Wolframdrähte für verschiedene Lampentypen und rechts schließlich einen Spinnwebfaden. Der dünnste Wolframdraht ist nur etwa doppelt so stark wie der Spinnwebfaden.

Das Mittel, um so feine Drähte zu ziehen, sind die gebohrten Diamanten, deren Herstellung eine besondere Kunst für sich bedeutet. Es müssen von den beiden Seiten des Steines her konische Löcher gebohrt werden, die an ihrem Treffpunkt eine winzige Öffnung von der gewünschten Größe ergeben. Aber diese Öffnung darf nicht unregelmäßig, zackig und scharfkantig sein, denn man will einen gleichmäßigen Wolframdraht von kreisförmigem Querschnitt ziehen. Es ist daher nötig, die Steine nach Herstellung der Bohrung mit unendlich feinen Schleifnadeln, die mit Diamantstaub bestrichen werden, sauber auszuschleifen, um das Ziel zu erreichen.

Die Erfindung, Wolfram zu ziehen, wurde 1910 in Amerika gemacht und kam zunächst an die Allgemeine Elektricitätsgesellschaft, die mit der General-Electric-Company eine Interessengemeinschaft hatte. Jetzt aber zeigte es sich, daß auch die anderen großen Lampenfirmen über grundlegende Patente verfügten. Der Siemens-Konzern über die bereits besprochene Unterbringung eines langen Leuchtdrahtes in einem kleinen Glaskolben, der Auer-Konzern über eine besondere Art von elastischen Drahthaltern, und so kam es zwischen diesen drei großen Gruppen für die Fabrikation der Wolframlampe zu einer Patentgemeinschaft, die alle unproduktiven Patentstreitigkeiten mit einem Schlage aus der Welt schaffte. Nach dem Kriege ging diese Entwicklung noch einen Schritt weiter, indem die drei großen Lampenfabriken dieser Gruppen zu einem einzigen Betriebe, dem Osram-Konzern, vereinigt wurden.

Der Name Osram hat im großen Publikum vielfach mißverständlich zu der Annahme geführt, daß der Leuchtdraht der Osramlampen aus einer Legierung von Osmium und Wolfram bestände. Das ist ebensowenig der Fall, wie etwa die Wotanlampen des Siemens-Konzerns eine Legierung von Wolfram und Tantal enthalten. Man suchte bei den beiden Konzernen einfach für die neuen Wolframdrahtlampen schlagkräftige Namen. Eine einfache Bezeichnung als Wolframlampe wäre nach den Bestimmungen des Warenzeichengesetzes nicht zulässig gewesen. Es mußten notwendigerweise Phantasienamen gebildet werden, und diese Namen wurden nun tatsächlich „Legierungen" aus Tantal, Wolfram und Osmium, während die Drähte der damit bezeichneten Lampen lediglich aus Wolfram bestehen.

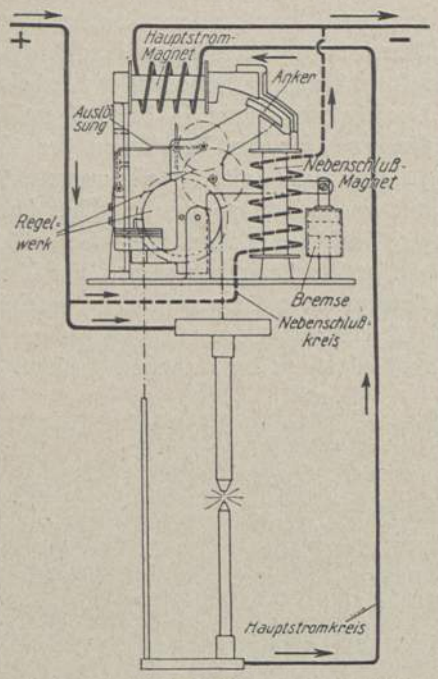



801. Fließarbeit bei der Glühlampenfabrikation

1. Fuß quetschen. 2. Halter einsetzen. 3. Bespannen. 4. Einschmelzen. 5. Pumpen und Abschneiden. 6. Kitt einstreichen. 7. Sockeln. 8. Löten. 9. Stempeln. Vgl. Bild 799. Osram G. m. b. H., Berlin

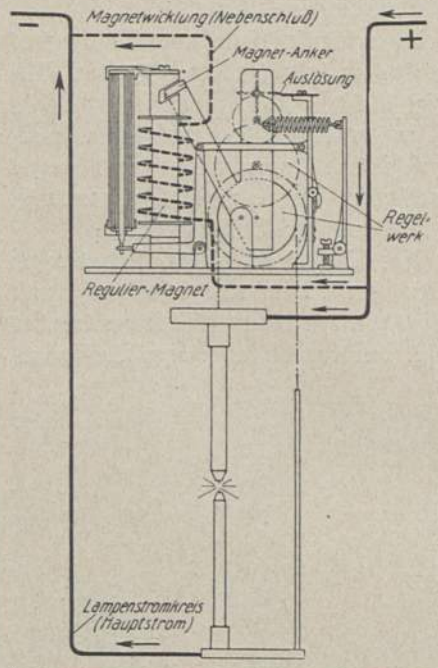
Die luftleere Wolframdrahtlampe mit einer Glühtemperatur von etwa 2100 Grad ist noch um mehr als 1000 Grad vom Schmelzpunkt des Wolframs entfernt. Genaue, besonders von M. v. Pirani durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, daß die Lichtausbeute an Lumen pro Watt schon bei geringfügigen Temperaturerhöhungen bedeutend zunimmt. Bei einer Drahttemperatur von 2105 Grad liefert ein Watt gerade eine Kerze, bei einer Temperatur von 2385 Grad, also immer noch mehr als 700 Grad vom Schmelzpunkte entfernt, bringt ein Watt bereits zwei Kerzen, bei 2750 Grad vier Kerzen hervor. Warum sollte es denn nicht möglich sein, den Draht stärker zu belasten und dementsprechend bessere Wirkungsgrade zu erzielen? Der Grund war der gleiche wie bei den Kohlenfadenlampen. Bei höherer Temperatur zerstäubte das Wolfram und schlug sich in Form eines schwarzen Wolframspiegels auf der Glaswand nieder, während der Leuchtdraht immer dünner wurde und immer dunkler brannte. Der Zerstäubung ließ sich entgegenwirken, wenn man die Glaskolben nicht luftleer pumpte, sondern sie mit einem chemisch unwirksamen Gas, wie Stickstoff, Wasserstoff, Argon und dergleichen, füllte. Dann bildeten die Gasmoleküle gewissermaßen ein Hindernis für die Wolframmoleküle, die von dem glühenden Draht zur Glaswand hinfliegen wollten. Aber leider betätigten sich die gleichen Gasmoleküle auch als vorzügliche Wärmeleiter. Sie entzogen dem glühenden Draht ganz gewaltige Wärmemengen und leiteten sie zur Glaswand und zum Sockel, die dadurch sehr stark erhitzt wurden. Die Energieverluste durch diese Wärmeleitung wurden so hoch, daß eine einfache Wolframdrahtlampe von der in Bild 796, 8 dargestellten Form, wenn man sie nicht möglichst vollkommen evakuierte, sondern mit Gas füllte, nicht 1,1 Watt, sondern 4 Watt für die Hefnerkerze verbrauchte. Im ersten Augenblick schien der Fall vollkommen hoffnungslos.

Aber eine Überlegung ergab folgendes. Die Abgabe von Wärme aus dem glühenden Draht an das umgebende Gas ist, abgesehen von anderen Faktoren, direkt proportional der wirk-



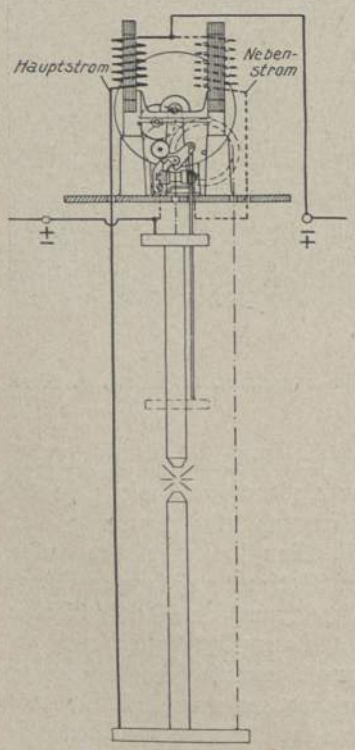

802. Differentialbogenlampe für Gleichstrom

Der Anker des Regelwerkes wird vom Hauptstrom- und vom Nebenschlußmagneten der Lampe in entgegengesetzten Richtungen beeinflußt

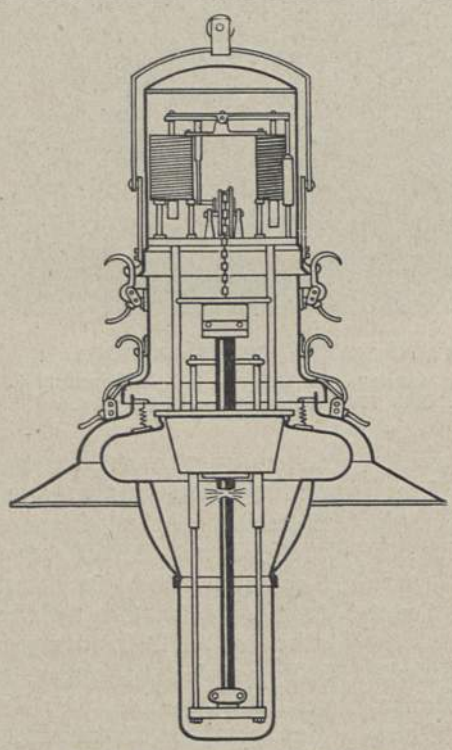



803. Nebenschlußbogenlampe für Gleichstrom

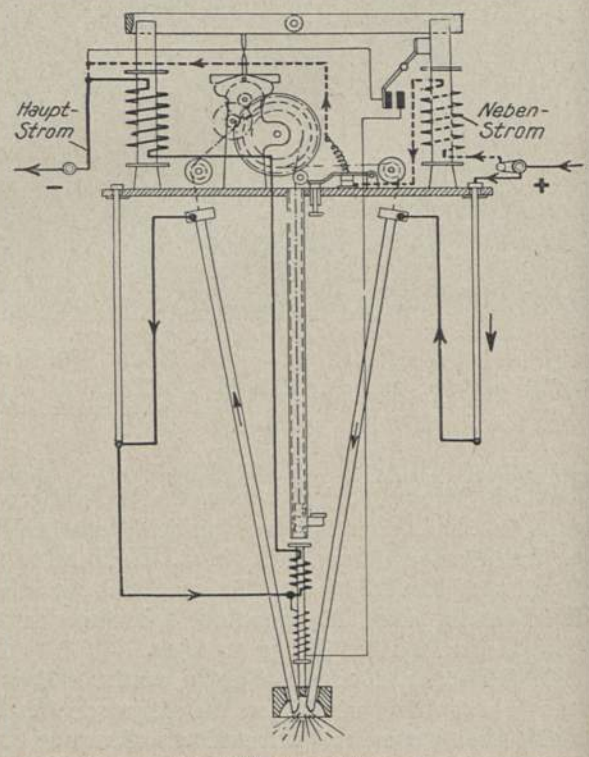
Die Hauptstromspule der Differentialbogenlampe ist hier durch eine Feder ersetzt. Die Nebenschlußlampe reguliert auf eine konstante Lichtbogenspannung



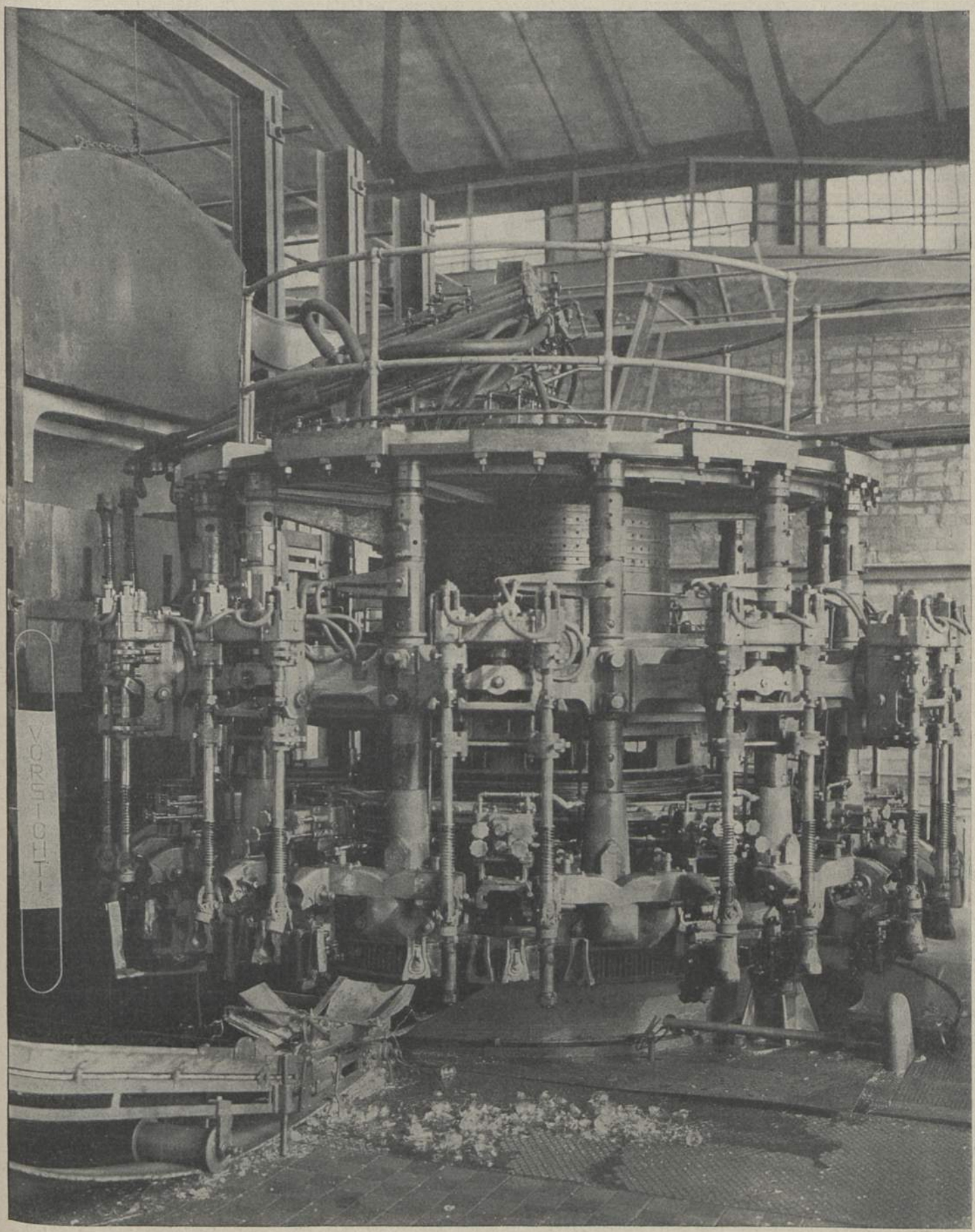

804. Motorwechselstrombogenlampe



805. Dauerbrandbogenlampe



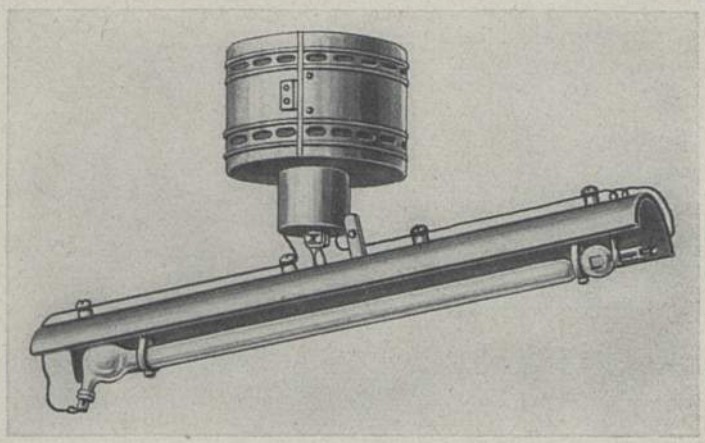

806. Effektbogenlampe



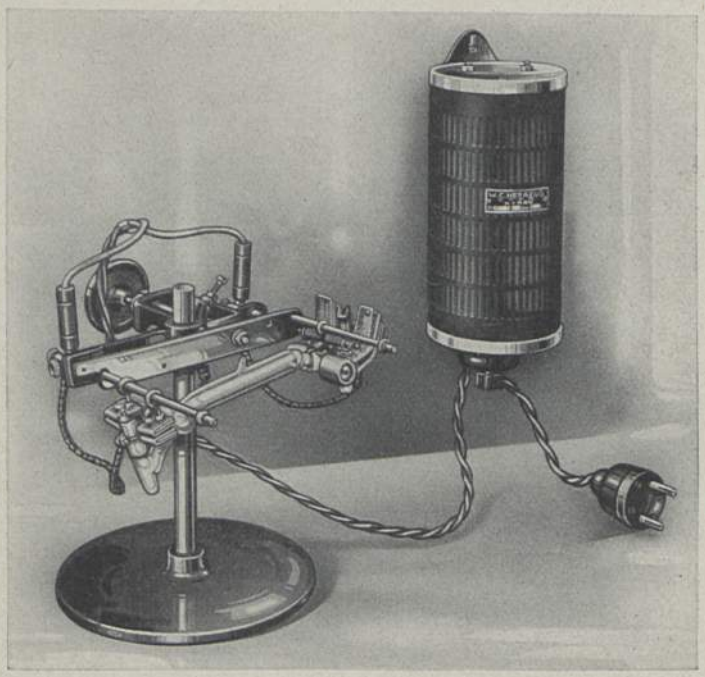

807. Westlake-Kolbenblasmaschine

Jede der drei im Osram-Maschinenglaswerk, Berlin-Siemensstadt, aufgestellten Maschinen vermag vollkommen selbsttätig 50 000 Glühlampenkolben täglich zu erzeugen

samen Berührungsfläche zwischen Draht und Gas. Gelang es, diese Fläche durch irgendeinen Kunstgriff zu verringern, so mußten die Verhältnisse sich bessern. Das glückte, indem man den Wolframdraht in Form einer engen Wendel aufwickelte, deren einzelne Windungen sich nicht berühren, doch so dicht zusammenliegen, daß die ganze Wendel sich in bezug auf die Wärmeleitung wie ein massiver Draht vom Durchmesser der Wendel verhält. Naturgemäß lassen sich in eine Wendel von etwa einem Millimeter Durchmesser Längen des feinen Wolframdrahtes unterbringen, welche die Wendellänge vielmals übertreffen, so daß das ganze Leuchtsystem dadurch räumlich stark verkleinert wird. Man trifft nun die Anordnung (Bild 796, 10—12) so, daß die Wendeln in Girlandenform an den feinen Haltern eines Trägers aufgehängt werden. Durch diese Anordnung wurde es möglich, die Drahttemperatur bis auf etwa 2500 Grad zu steigern und Lampen mit einer mittleren Lebensdauer von 1000 Stunden zu schaffen. Im luftleeren Raum würde ein Wolframdraht bei dieser Temperatur für die Hefnerkerze nur 0,4 Watt verbrauchen. Bei der Gasfüllung treten durch die Wärmeleitung, die bis zu einem gewissen Grade immer noch wirksam bleibt, Energieverluste auf, die bei kleineren Lampen prozentual höher sind als bei größeren. So gelang es, für die üblichen Lichtspannungen gasgefüllte Lampen zu bauen, die in den größten Typen nur noch etwa ein halbes Watt für die geleistete Kerze brauchen, während der Wattverbrauch bei den kleineren Typen steigt und bei den ganz kleinen schließlich den Wert der besten Drahtlampen von rund einem Watt erreicht. Hier ist die Entwicklung noch im Fluß, und von Jahr zu Jahr gelingen Verbesserungen der Wirtschaftlichkeit auch an den kleineren Typen der gasgefüllten Lampe. Sie stellt gegenwärtig die Gipfelleistung der Lampenbaukunst dar, und es ist sehr schwer zu sagen, ob noch grundlegende Verbesserungen zu erwarten sind, und aus welcher Richtung sie kommen könnten. In der Liste der uns heute bekannten einfachen Stoffe findet sich jedenfalls keiner, der geeigneter als das Wolfram für die Herstellung eines Leuchtdrahtes, d. h. eines elektrisch beheizten Temperaturstrahlers, wäre. Aber wenn man sich des ungeheuren Fortschrittes und der allgemeinen Überraschung erinnert, die seinerzeit das Gasglühlicht für die Beleuchtungstechnik bedeutete, so wird man sich auch hier hüten, die Möglichkeit irgendeines weiteren sprunghaften Fortschrittes zu leugnen. Manche Techniker erwarten das Heil der Zukunft von einem selektiven Strahler, d. h. einem Körper, der nicht wie die Kohle und die meisten Metalle über die ganze Länge des dunklen Wärmespektrums, sondern hauptsächlich innerhalb des sichtbaren Spektrums strahlt. Es hat auch nicht an Versuchen gefehlt, die Oxyde der seltenen Erden, das Zeroxyd und Thoroxyd, denen der Glühstrumpf seine wunderbare Wirkung verdankt, zur Herstellung von elektrisch beheizten Strahlern zu benutzen, bisher ist allen diesen Unternehmungen der Erfolg versagt geblieben. Theoretisch aber besteht durchaus die Möglichkeit solcher selektiven Strahler, und ein einziger glücklicher Fund könnte einen sprunghaften Fortschritt bringen.



808. Quecksilberdampflampe mit gläsernem Körper



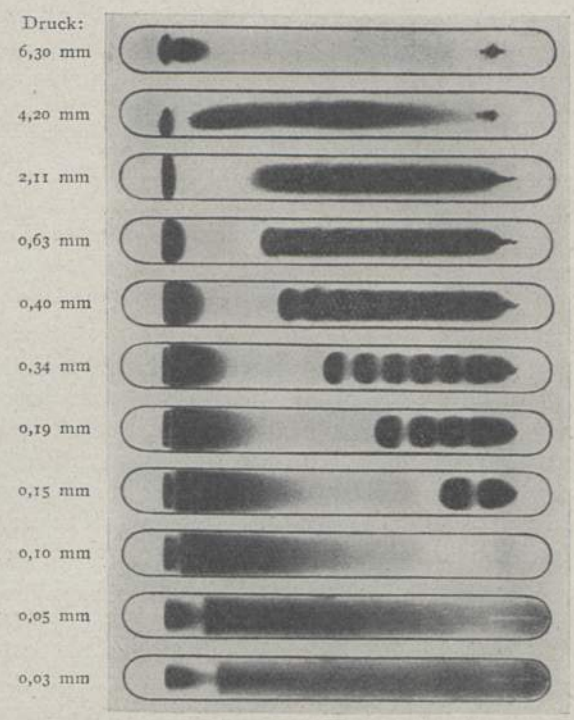
809. Quecksilberdampflampe mit Quarzkörper
W. C. Heraeus G. m. b. H., Hanau a. M.

Betrachten wir nun den Werdegang der Osram-Lampen für allgemeine Beleuchtungszwecke. Vom Wolframerz geht der Weg über die Wolframsäure und das reine Wolframpulver zum Grobzugdraht und schließlich zum Feinzugdraht, der auf Rollen aufgespult in die Lampenfabrik gelangt. Die Fabrikation der Lampe beginnt mit dem Tellerrohr, einem kurzen zylindrischen Glasrohr, das auf der Tellerdrehmaschine am einen Ende bis zur Erweichung erhitzt und tellerartig aufgedreht wird. An einer anderen Stelle tritt das Rohglas in Form massiver Stäbe in die Fabrikation, wird auf bestimmte Längen geschnitten und am oberen Ende linsenförmig zusammengestaucht. An einer dritten Stelle werden die Stromzuführungen vorbereitet. Sie bestehen bei den meisten Typen aus Kupferdrähten für die äußere Zuleitung, Kupfermanteldrähten für den Durchgang durch die Glaswand und ebenfalls Kupferdrähten für die weitere Führung in der Lampe bis zum Leuchtdraht. Die Enden des Leuchtdrahts werden an den Zuleitungen angeschweißt.

Nun werden Tellerrohr, Glasstab und die beiden Stromzuführungen in der Fußquetschmaschine zusammengesteckt, durch Gasbrenner bis zur Erweichung erhitzt und durch einen Preßdruck in die Form des Lampenfußes (Bild 799, 1) gebracht. In der nächsten Fabrikationsetappe wird die Linse des Glasstabes erweicht, und die einzelnen aus elastischem Molybdändraht bestehenden halterförmigen Halterungen werden in sie eingesteckt. Damit ist das Gestell zum Aufspannen des Leuchtdrahtes fertig (Bild 749, 2). Der gezogene Wolframdraht, der infolge seiner Elastizität noch stark federt und unregelmäßig

liegen würde, muß vorher auf einer Lehre elektrisch geformt werden. Er wird auf einen Kern aufgewickelt und in einer Wasserstoffatmosphäre kurze Zeit mit Hilfe des elektrischen Stroms geglüht. Nach der Erkaltung wird der Kern herausgeätzt, und nun läßt sich die Drahtwendel leicht und schnell über die Arme der Lampenhalterung spannen (Bild 799, 3).

Es folgt die Verbindung des bespannten Gestells mit dem Glaskolben zur Lampe. Die Kolben kommen als Rohkolben in die Lampenfabrik. Hier wird der untere Teil, der unvermeidliche, aber der weiteren Verarbeitung schädliche Glasspannungen enthält, abgeschmolzen. Danach wird der verkürzte Kolben mit dem Gestell zusammengeschmolzen. Die so gebildete Lampe wird luftleer gepumpt und unter Umständen mit Gas gefüllt. Danach wird das Pumpenröhrchen auch abgeschmolzen, und es folgt die Sockelung. Der an anderer Stelle fertiggestellte Sockel wird mit dem Glaskörper verkittet, und seine beiden Metallpole werden mit den beiden Stromzuführungen der Lampe durch Lötung verbunden (Bild 799, 4—8).



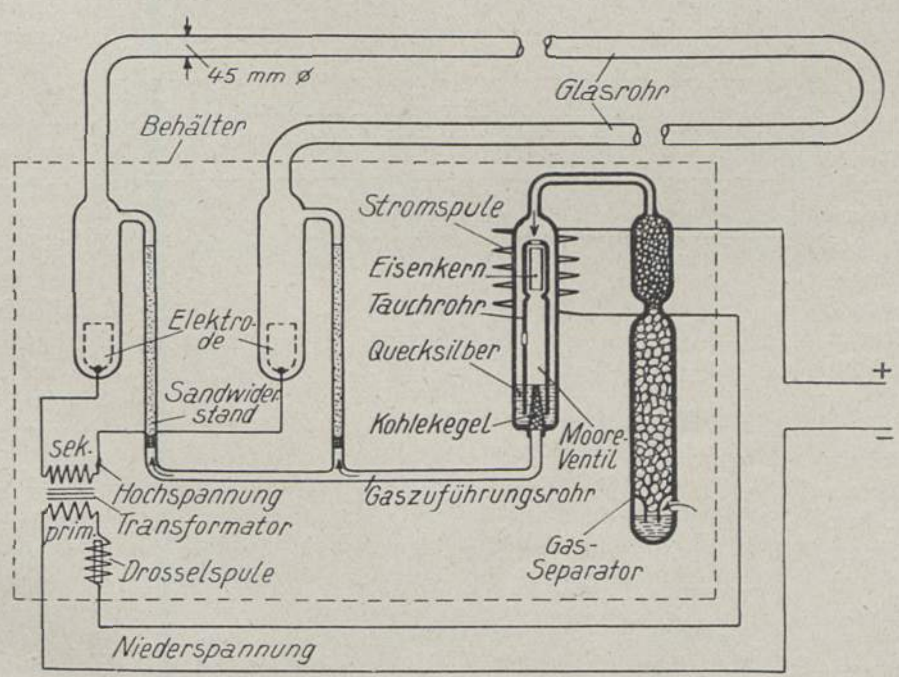

810. Elektrische Entladungserscheinungen in verdünnter Luft bei verschiedenem Luftdruck Nach H. Seemann

Die Lampenfabrikation ist eine ausgesprochene Massenfabrikation, die jährlich Hunderte von Millionen elektrischer Glühlampen erzeugt. Gerade bei einer solchen Fabrikation muß das Streben darauf gerichtet sein, die Arbeitsvorgänge so wirtschaftlich wie möglich zu gestalten, um billige Lampen zu erstellen. Mit welchen Mitteln das erreicht wird, zeigen die Bilder 799 bis 801 und 807.

Die Fabrikation des Lampensockels beginnt mit glattem Messingrohr, das in sechs Arbeitsvorgängen, die von vollkommen automatisch arbeitenden Werkzeugmaschinen geleistet werden, die Form des fertigen Sockelringes erhält. Eine Stanzmaschine stellt aus Messingblech den zweiten Pol des Sockels, das Kontaktplättchen, mit einem Schlage her, und die Vereinigung dieser beiden Metallteile mit einem Glasfluß ergibt den fertigen Sockel.

Bei der Herstellung der Lampen selbst findet ebenfalls höchste Konzentration und Arbeitsersparnis statt. Die modernen großen Glühlampenfabriken sind auf die neuzeitliche Fließarbeit eingerichtet, bei der das Arbeitsstück auf kürzestem Wege, unter Vermeidung aller unnötigen Transporte und Aufenthalte, von Arbeitsetappe zu Arbeitsetappe weitergeleitet wird. Bild 799 zeigt das Schema der Fließarbeit bei der Herstellung gasgefüllter Lampen von der Fußquetschmaschine bis zum Packraum. In Wirklichkeit sind die einzelnen in diesem Schema dargestellten Arbeitsstationen freilich selbst wieder ausgedehnte und ebenfalls nach dem System der Fließarbeit organisierte Fabrikationsvorgänge. Die starke Pfeillinie in Bild 799 bedeutet den Hauptstrom der Fließarbeit. Die dünneren Pfeillinien geben an, was während dieses Arbeitsganges auf den verschiedenen Arbeitsstationen an Rohmaterial oder vorbereiteten Einzelteilen diesem Hauptstrom zufließt. Wie sich die komplette Herstellung der elektrischen Glühlampe vom Einkommen des Rohmaterials in die Fabrik bis zum Hinausgehen der fertigen Lampen im Schema darstellt, veranschaulicht Bild 800.

Obwohl man aus wirtschaftlichen Gründen eifrig bestrebt ist, die Zahl der verschiedenen Lampentypen möglichst niedrig zu halten, ist sie immer noch reichlich groß. Bild 798 zeigt links Wolframbandlampen, in denen der leuchtende Körper nicht aus feinem Draht, sondern aus Wolframband besteht, sie brauchen geringe Spannungen und hohe Stromstärken und kommen besonders für Projektionszwecke in Betracht; rechts sind Soffittenlampen zu sehen, bei denen der Leuchtdraht bzw. die leuchtende Wendel über eine größere Länge geradlinig angeordnet ist. Lampen dieser Art kamen zuerst bei der Bühnenbeleuchtung in Verbindung mit den als Soffitten bekannten Versatzstücken zur Verwendung. Heut werden sie außerdem in Klavier- und Leselampen sowie zur Schaufensterbeleuchtung stark benutzt.

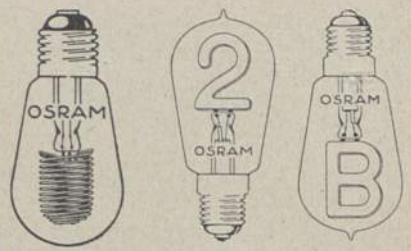



811. Schematische Darstellung einer Moore-Lichtanlage

Mit der gasgefüllten Wolframdrahtlampe hatte die elektrische Glühlampe in einer fünfunddreißigjährigen Entwicklung die Wirtschaftlichkeit erreicht, welche das Bogenlicht bereits bei seinem ersten Auftreten besaß. Aber auch das Bogenlicht war während dieser Zeit nicht stehengeblieben. Die Fortschritte betrafen einmal das Regelwerk und zweitens die

Beschaffenheit der Kohlenstäbe. In seiner Differentialbogenlampe hatte von Hefner-Alteneck, wie bereits auf Seite 380 f. ausgeführt wurde, eine Lampe geschaffen, die auf ein konstantes Verhältnis zwischen Spannung und Stromstärke einregulierte, sich also genau wie ein Ohmscher Widerstand verhielt. Auch schon bei den zuerst noch fast ausschließlich gebräuchlichen Hauptschlußdynamos war es möglich, eine größere Anzahl dieser Differentiallampen in Reihe zu schalten. Das Aufkommen des Glühlichtes führte zwangläufig zur Verwendung von Nebenschlußdynamos, die eine auch bei stark wechselnder Stromstärke konstant bleibende Spannung zu liefern vermochten und für die spannungsempfindlichen Glühlampen liefern mußten. Beim Anschluß an solche Lichtnetze mit gleichbleibender Spannung konnte man aber auf die Doppelschlußwirkung der Differentiallampe verzichten und eine Nebenschlußlampe bauen, deren Regelwerk nur eine parallel zum Lichtbogen liegende Spule, eine Nebenschluß- oder Spannungsspule besitzt und die einzelne Lampe auf eine unter allen Umständen konstant bleibende Spannung einreguliert. Die Bilder 802 und 803 geben die einfachen Schemas der Differential- und der Nebenschlußbogenlampe für Gleichstrom und übereinanderstehende Kohlen. Der obere und untere Kohlenhalter sind dabei durch eine Kette verbunden, die, vom oberen Kohlenhalter ausgehend, über ein Kettenrad des Regelwerkes läuft, in einem der seitlichen geschlitzten Führungsrohre nach unten geht und hier mit dem unteren Kohlenhalter verbunden ist. Es leuchtet wohl ein, daß eine solche Lampe eine Fixpunktlampe sein, d. h. daß sich ihr Brennpunkt stets an derselben Stelle befinden muß, ganz gleich, wie weit der Abbrand der Stifte vorgeschritten ist. Das ganze Uhrwerk ist um einen Punkt drehbar und mit einem Weicheisenanker verbunden, der von dem oder den Magneten der Regulierspulen beeinflußt wird und dabei das Werk bald mehr nach rechts, bald nach links ausschwenkt. Wird dabei die Lichtbogenspannung zu groß, so gibt die dadurch bewirkte Schwenkung des Regelwerkes das Laufwerk frei, und die Kohlen können zusammenlaufen, bis die Lichtbogenspannung genügend gesunken ist.

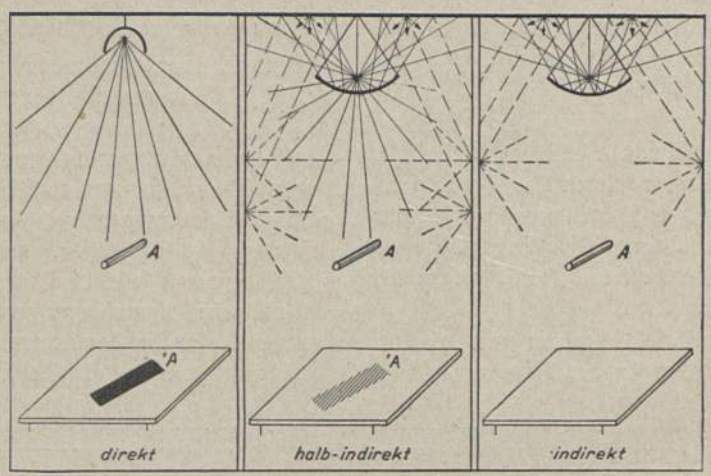
Nach einem anderen Prinzip arbeiten die Motorregelwerke der Wechselstromlampen. Hier induzieren die Wechselfelder eines Nebenschlußmagneten und eines Hauptschlußmagneten Ströme in einer Kupferscheibe, die in dieser ein Drehmoment hervorrufen. Die Bewegung der Scheibe wird durch ein Zahnradwerk auf die Kettenscheibe übertragen (Bild 804).



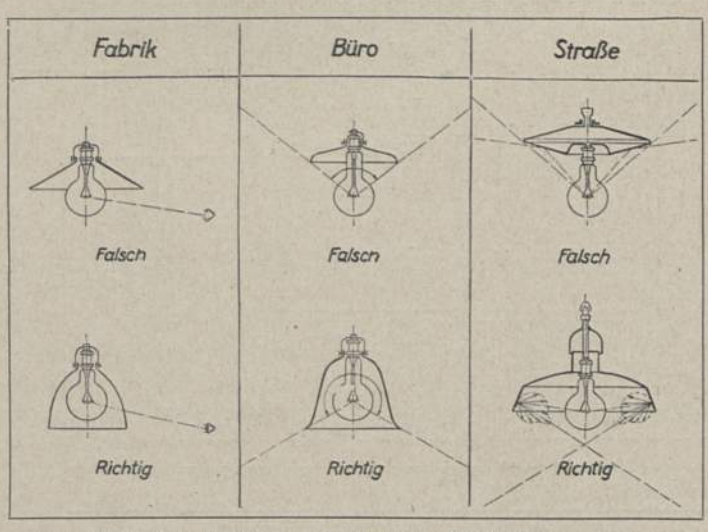

812. Glimmlampen

Während die Stromausnutzung bei den Bogenlampen von Anfang an erheblich besser als bei den Glühlampen war, erforderten sie einen ziemlich beträchtlichen Aufwand für die Bedienung. Normalerweise mußten die Kohlenstifte jeden Tag erneuert werden. Man suchte diese Unkosten zunächst durch den Bau von Doppellampen zu verringern. Diese Lampen hatten zwei Paar Kohlenstifte und schalteten automatisch das zweite Paar ein, sobald das erste abgebrannt war. Ein wesentlicher Fortschritt nach dieser Richtung ergab sich jedoch erst, als man den Lichtbogen fast luftdicht einschloß, so daß er dem Einfluß des Luftsauerstoffes ziemlich entzogen war. Diese Anordnung brachte in den sogenannten Dauerbrandlampen (Bild 805) ungefähr eine Verzwanzigfachung der bisherigen Brenndauer. Dafür wurde freilich die Stromausnutzung gegenüber den offenen Lampen etwas ungünstiger.

Bis gegen Ende des Jahrhunderts bestanden die Kohlenstifte aus reiner Kohle. Sie wurden aus einem Gemisch von Ruß und Teer in hydraulischen Pressen in Stabform gepreßt und unter Luftabschluß geglüht. Die positive Kohle der Gleichstrombogenlampen wurde als Dochtkohle ausgeführt, d. h. in Röhrenform gepreßt, und bekam in den Hohlraum ein Gemenge aus Ruß und Wasserglas, den sogenannten Docht, der dem Lichtbogen eine ruhige Lage sicherte. Wiederholt waren dabei schon Versuche gemacht worden, den Kohlen andere Stoffe, wie Salze und dergleichen, beizumengen, um dadurch eine selektive Strahlung und verbesserte Lichtausbeute zu erreichen. Besonders unter dem Einfluß des Auerschen Gasglühlichtes nahmen diese Bestrebungen zu, aber erst im Jahre 1899 hatte Bremer Erfolg. Er gab seinen Kohlen Dochte, die in der Hauptsache aus Metallsalzen bestanden. Mit Bariumsalzen erzielte er weißes, mit Strontiumsalzen rotes, mit Kalziumsalzen gelbes Licht. An Wirkungsgrad waren diese Effektkohlen den Reinkohlen sofort stark überlegen. Der Energieaufwand sank bis auf etwa 0,2 Watt für die Hefnerkerze. Dabei war der eigentlich leuchtende Teil jetzt der Lichtbogen oder, wie man auch sagte, der Flammbogen, während bei den Reinkohlenlampen das Licht hauptsächlich von den weißglühenden Kohlenspitzen ausgeht. Die Kohlenstifte stehen bei den Effektlampen nebeneinander in Form eines V




813. Die drei Arten der Beleuchtung
Direkte, halbindirekte und indirekte Beleuchtung




814. Beispiele falscher und richtiger Reflektoranordnungen

gegeneinander geneigt. Zwischen ihren unteren Enden bildet sich der Lichtbogen, der durch einen Blasmagneten noch besonders ausgebreitet und verlängert wird. Man benutzt dabei die Tatsache, daß auch der Lichtbogen ein Teil des Stromkreises ist und den elektrodynamischen Einwirkungen eines Magnetfeldes ebenso unterliegt wie jeder andere stromdurchflossene Leiter. Da aber der Lichtbogen elastisch und frei beweglich ist, so kann er durch einen passend angebrachten Elektromagneten in jede gewünschte Form gebracht werden, wie Bild 806 erkennen läßt.

Trotz aller dieser Fortschritte und Verbesserungen wird die Bogenlampe jedoch gegenwärtig unaufhaltsam von der Wolframdrahtlampe verdrängt. Dem nur wenig geringeren Energieverbrauch der Bogenlampe stehen die unvermeidlichen Bedienungsunkosten der Bogenlampe und die keineswegs zu vernachlässigenden Ausgaben für die Kohlenstifte gegenüber. Nur bei einem hohen Kilowattstundenpreis geht die Wirtschaftlichkeitsberechnung zugunsten der Bogenlampe auf. Aber auf dem Gebiete, auf dem sie ihre Laufbahn einst begann, als Leuchtturmlampe, wird die Bogenlampe heute noch vielfach verwendet und sendet in Verbindung mit Parabolspiegeln und Linsen ihre mächtigen Lichtkegel viele Meilen weit über die See. Als das Kino aufkam, schien ihr hier ein neues großes Anwendungsgebiet erschlossen zu werden. Aber auch schon hier macht ihr die Wolframlampe bedenkliche Konkurrenz.

Zu den Bogenlampen gehört auch eine Lampe mit flüssigen Elektroden an Stelle der festen Stifte, die Quecksilberbogenlampe oder Quecksilberdampflampe. Man kann sich schließlich darüber streiten, ob man es hier mit einem einfachen Lichtbogen oder einem unter der Wirkung des Stromdurchganges selektiv strahlenden Dampf zu tun hat. In ihrer ersten Form (Bild 808) war die Quecksilberdampflampe ein langes Glasrohr mit zwei Quecksilberbehältern an den Enden, die ein ausschließlich aus einer grünen und violetten Strahlung zusammengesetztes Licht aussandte und etwa ein halbes Watt für die Kerze verbrauchte. In ihrer Vervollkommnung als Quarzlampe (Bild 809) besitzt sie ein viel kleineres Gefäß aus Quarz oder geschmolzenem Bergkristall mit einem Schmelzpunkt von etwa 1400 Grad. Hier ist die spezifische Belastung und die Temperatur viel höher, und dabei sinkt der Wattverbrauch bis unter 0,2 Watt pro Kerze, während die Farbe des Lichtes in ein gelbliches Weiß übergeht. Die Quarzlampe dürfte wohl die wirtschaftlichste aller elektrischen Lampen sein. Unter Benutzung der am Eingang dieses Abschnittes gegebenen Werte kann man ihren Wirkungsgrad zu 25% des überhaupt theoretisch Möglichen errechnen. Leider läßt aber die Farbe ihres Lichtes ihre Verwendung hauptsächlich nur für Reklamebeleuchtungen zu.

Von oben beleuchtet

Von vorn beleuchtet

Von oben rechts beleuchtet

Von links vorn beleuchtet

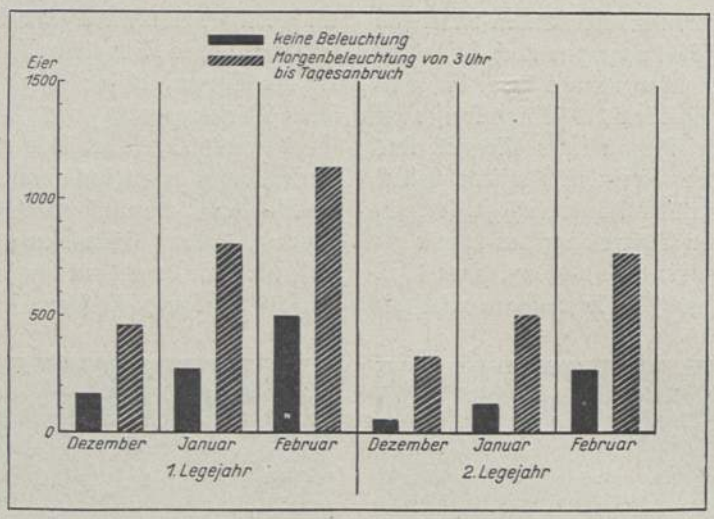
815. Einfluß des Lichteinfallwinkels auf die Wirkung einer Büste

Von den Dampflampen führt der Weg zu den elektrischen Lampen, deren Lichtwirkung auf dem Leuchten stromdurchflossener Gase beruht, zu den sogenannten Lumineszenzstrahlern. Diese Erscheinung ist schon sehr früh entdeckt worden. Man beobachtete, daß der luftleere Raum über dem Quecksilber eines Barometers im Dunkeln leuchtete, wenn das Barometer geschüttelt und dabei Reibungselektrizität erzeugt wurde. Wie sich die Entladungserscheinungen in verdünnter Luft bei verschiedenen Drucken abspielen, zeigt Bild 810. Die Zahlen links geben dabei den Luftdruck in Millimetern der Quecksilbersäule an. Der normale Luftdruck einer Atmosphäre entspricht bekanntlich einer Quecksilbersäule von 760 Millimetern. Die in Bild 810 an vierter Stelle gezeigte Röhre hat demnach nur noch einen Druck von rund ein Tausendstel Atmosphäre, die letzte Röhre einen Druck von ein Zwanzigtausendstel Atmosphäre. Die Lichterscheinungen setzen bei einem Druck von etwa sechs Millimetern ein. Der negative Pol ist dabei von einem tiefblauen Licht umhüllt, während vom positiven Pol rotes Licht ausgeht und dazwischen ein dunkler Raum bleibt. Bei weiter getriebener Luftverdünnung wächst das positive Licht immer weiter in die Röhre hinein, bis es diese schließlich vollkommen ausfüllt.

Schon um die Mitte des vorigen Jahrhunderts gehörten Versuche mit evakuierten Glasröhren zu den wirkungsvollsten Experimenten, und man hoffte, auf diesem Wege das kalte Licht zu finden, bei dem alle zugeführte Energie restlos in sichtbare Strahlung umgewandelt würde. Leider muß vorwegnehmend gesagt werden, daß alle diese Hoffnungen bisher wenigstens unerfüllt geblieben sind. Man benutzt leuchtende Gase heut in dem von dem Amerikaner Moore angegebenen Röhrenlicht, den Edelgasleuchtröhren und in den Glimmlampen für Beleuchtungszwecke. Der Wirkungsgrad ist dabei aber wesentlich schlechter als bei den Temperaturstrahlern. Er beträgt 1,5 Watt pro Kerze bei dem

Röhrenlicht und sogar 4 bis 5 Watt bei den Glimmlampen.

Bei dem Moore-Licht kommen gläserne Leuchtröhren mit einem äußeren Durchmesser von 45 Millimetern zur Verwendung, die an Ort und Stelle zu größeren Längen zusammengeschmolzen werden und in ihren Krümmungen den Formen der Architektur folgen. Es sind Leuchtröhren von 20 bis 60 Metern Länge zur Ausführung gekommen. Dabei rechnet man für den Meter Röhrenlänge eine Spannung von 400 Volt, so daß die größeren Beleuchtungsanlagen dieser Art eine Betriebsspannung von mehr als 20 000 Volt benötigen. Es kann daher nur Wechselstrom verwendet werden, der in dem zu beleuchtenden Raum in unmittelbarer Nähe der Beleuchtungsanlage auf diese Spannung hinauftransformiert wird. Bild 811 zeigt das Schema einer solchen Anlage. Das Leuchtrohr kommt mit seinen beiden Enden wieder ziemlich dicht zusammen, so daß längere Hochspannungsleitungen vermieden werden. Der Transformator und die Stromzuführungen zu der Röhre sind zuverlässig gekapselt, um Unfälle durch die unbedingt tödlich wirkende Spannung zu verhüten. Das Schema zeigt weiter auch das Moore-Ventil, durch das von Zeit zu Zeit ein wenig frisches Gas von außen her in die Röhre gelassen wird. In diesem Ventil befindet sich ein Kegel aus poröser Kohle, der unter normalen Verhältnissen von einem Quecksilberbad bedeckt ist. Während des Betriebes wird nun allmählich ein Teil der in der Röhre befindlichen Gasmoleküle in die Glaswand getrieben. Der Druck wird geringer und der Stromdurchgang schwächer. Man sagt, die Röhre ist härter geworden. Jetzt gibt das Ventil unter der Wirkung einer vom Strome durchflossenen Spule die Spitze des Kohlenkegels ein wenig aus dem Quecksilber frei, es dringt von außen her ein wenig Luft bzw. ein anderes Gas durch die Kohlenporen, die Röhre läßt wieder mehr Strom hindurch, und das Ventil schließt sich wieder.



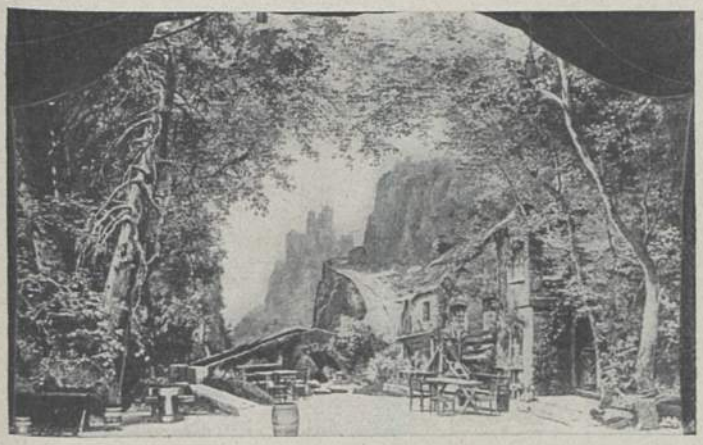

816. Graphische Darstellung des Einflusses der elektrischen Beleuchtung auf die Legetätigkeit der Hühner

Die Farbe des Moore-Lichtes hängt von der Art des Gases in der Leuchtröhre ab. Eine Füllung mit Stickstoff gibt ein angenehmes gelbrosa Licht. Mit Kohlensäure wird ein fast reinweißes Licht erzielt, bei dem sich Farben fast ebenso gut wie bei Tageslicht erkennen lassen.

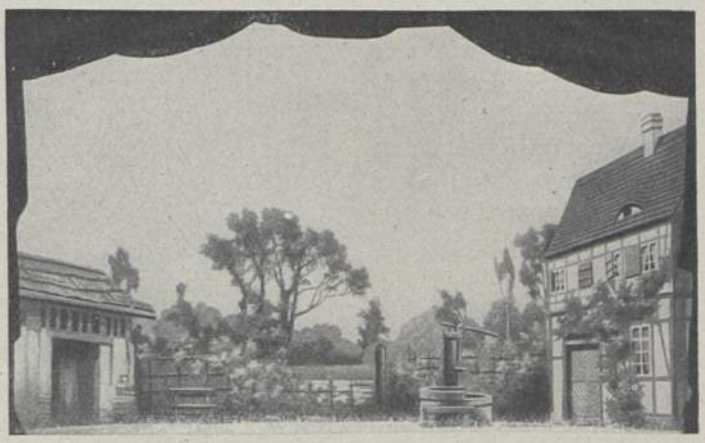
Während bei den Leuchtröhren, dem Moore-Licht und den Edelgasleuchtröhren, die ganze Gassäule leuchtet, wird bei den Glimmlampen nur das sogenannte negative Glimmlicht zur Lichterzeugung ausgenutzt. Dieses überzieht die ganze Oberfläche der in geringem Abstand voneinander angeordneten Elektroden und strahlt ein mattrötliches Licht aus. Die Lampen (Bild 812) werden in einer den gewöhnlichen Glühlampen sehr ähnlichen Form für die normalen Lichtspannungen hergestellt und können ohne weiteres in jede vorhandene Fassung eingeschraubt werden. Die einfache Glimmlampe wird hauptsächlich für Lichtsignale verwendet, beispielsweise in Verbindung mit den Klappentafeln von Haustelegraphen. Auch findet sie vielfach in Bürohäusern Anwendung, wo sie auf den Korridoren vor den einzelnen Zimmertüren angebracht durch ihr Aufleuchten oder Verlöschen anzeigt, ob der betreffende Raum besetzt ist. Schließlich ist sie ein recht brauchbares und wohlfeiles Nachtlicht, da ihr Stromverbrauch so gering ist, daß die meisten Zähler darauf nicht mehr ansprechen. Eine andere Form der Glimmlampe ist die Buchstabenlampe, die für Reklamezwecke Verwendung findet. Es lassen sich aus diesen Letternlampen sehr wirksame Lampenleisten mit den verschiedensten Texten zusammenstellen.

Die verschiedenen vorstehend behandelten Lichtquellen finden nun in Verbindung mit geeigneten Leuchten Anwendung zur Herstellung von Beleuchtungen. Hier hat sich im Laufe

817. Schaufenster in schlechter (links) und guter (rechts) Beleuchtung



Eine Freilandschaft unter der Fortuny-Kuppel



Eine Freilandschaft mit Rundhorizont

818. Die elektrische Beleuchtung auf der Bühne

der letzten Jahre eine Sonderwissenschaft und Technik der Beleuchtung entwickelt, denn es hat sich gezeigt, daß man auch mit den besten Lampen schlechte, ja geradezu schädliche und gefährfährliche Beleuchtung herstellen kann, wenn man ungeeignete Beleuchtungskörper verwendet. Grundsätzlich unterscheidet man drei Arten der Beleuchtung, die direkte, die halbindirekte und die indirekte (Bild 813). Bei der direkten Beleuchtung fällt das Licht der Lampe direkt auf die zu beleuchtenden Flächen. Gefordert wird aber auch hier, daß die Lampe durch eine Schale oder einen Schirm so umhüllt ist, daß ihr Licht nicht direkt in das Auge fallen und Blendung verursachen kann. Bei der halbindirekten Beleuchtung fällt ein Teil des Lampenlichtes durch eine halbdurchsichtige Schale direkt auf die zu beleuchtende Fläche, ein anderer Teil wird nach oben gegen die möglichst weiße Decke geworfen und gelangt von dort, nochmals reflektiert, erst indirekt nach unten. Bei der indirekten Beleuchtung ist die Ampelschale vollkommen undurchsichtig, und die gesamte Lichtmenge wird gegen die Decken und Wände geworfen und von dort reflektiert.

Beispiele für falsche und richtige Anordnungen von Glocken und Reflektoren gibt Bild 814. Bei den falschen Anordnungen fällt das grelle Licht des Leuchtkörpers direkt in das Auge und verursacht Blendung. Bei den richtigen ist die Glockenform so gewählt, daß einerseits eine Blendung sicher vermieden und anderseits die Leuchtkraft der Lampe möglichst ausgenützt wird.

Erstrebt werden muß bei allen Beleuchtungen eine gewisse Ausgeglichenheit der den Raum durchflutenden Lichtenergie. Wie sehr eine Beleuchtung, bei der das nicht der Fall ist, die Dinge entstellen kann, zeigt die Büste in Bild 815, die von einer Lichtquelle aus direkt unter verschiedenen Einfallwinkeln beleuchtet wird. Hier ist die Wirkung in jedem Falle unnatürlich und entstellt das beleuchtete Objekt. Die direkte Beleuchtung erweist sich als zu hart, die indirekte wäre zu flau. Nur die halbindirekte Beleuchtung bringt alle Einzelheiten und Feinheiten der Büste am besten zum Ausdruck.

819. Bühnenbild der Versuchsbühne der AEG

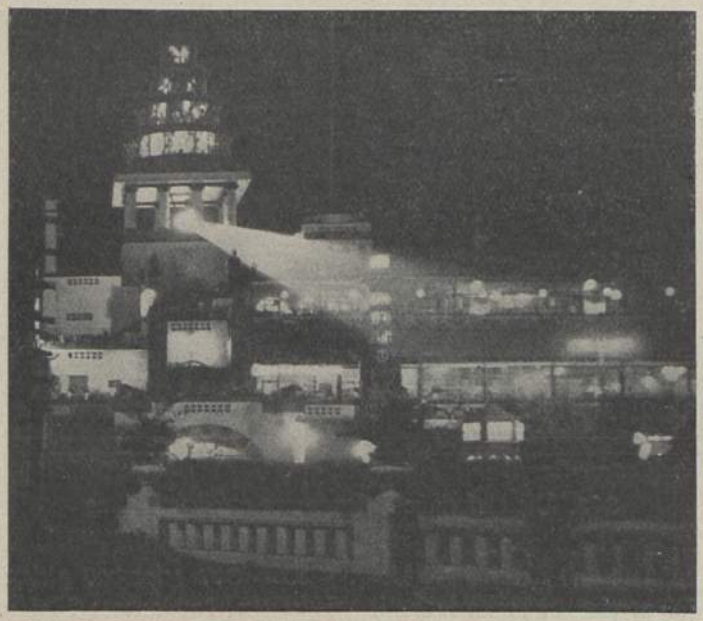
Bild 817 zeigt das gleiche Schaufenster einmal mit einer schlechten, das andere Mal mit einer guten Beleuchtung. Zu bemerken ist dabei, daß der Aufwand an elektrischer Energie in beiden Fällen gleich ist, die Wirkung sich aber infolge der verschiedenen Beleuchtungskörper und Stellungen der Lampen sehr verschieden darstellt.

Besonders wichtig ist die Auswahl richtiger Beleuchtungskörper in Fabrikräumen. Gefordert wird eine ausreichende Beleuchtung aller Arbeitsstellen, die sich recht fühlbar in einem Zurückgehen der Betriebsunfälle bemerkbar macht. Eine Blendung muß unter allen Umständen vermieden werden. Sie wäre auch in Fabrikräumen mit laufenden Maschinen besonders gefährlich, da das durch eine nackte grelle Lampe geblendete Auge längere Zeit nicht fähig ist, die Gegenstände deutlich zu unterscheiden, wodurch Betriebsunfälle wie das Hineingeraten in Transmissionen und dergleichen begünstigt werden. Die eingehenden Betriebsstatistiken großer, gut geleiteter Fabriken beweisen überzeugend, daß eine gute sachgemäße Beleuchtung nicht nur die Betriebssicherheit erhöht, sondern auch auf die Quantität und Qualität der geleisteten Arbeit einen günstigen Einfluß ausübt.

Daß die künstliche Beleuchtung auch auf anderen Gebieten Vorteile bringen kann, zeigt die in Bild 816 gegebene Darstellung des Einflusses der Beleuchtung auf die Legetätigkeit der Hühner. Es geht daraus deutlich hervor, daß die künstliche Beleuchtung der Hühnerställe während der lichtarmen Wintermonate die Eiablage mindestens verdoppelt, in einigen Fällen sogar vervierfacht hat. Mit diesen und manchen ähnlichen Beobachtungen hängt es zusammen, daß die elektrische Beleuchtung in den letzten Jahren auch in den landwirtschaftlichen Betrieben eine starke Zunahme erfahren hat.

Neben der einfachen Gebrauchsbeleuchtung sind Beleuchtungen für Reklamezwecke und Festlichkeiten zu nennen, bei denen man durch besondere Lichteffekte entweder die Aufmerksamkeit des Publikums

erregen oder eine festliche Stimmung hervorrufen will. Als Beispiel einer Reklamebeleuchtung mag die in Bild 822 gezeigte Frontillumination eines großen Warenhauses gelten. Die Figuren und Buchstaben an den Hausfronten sind aus lichtstarken Glühlampen zusammengestellt und heben sich wirkungsvoll von dem Hintergrunde ab. Ganz anders wirkt die in Bild 821 dargestellte Beleuchtung. Es ist eine sogenannte Flutlichtbeleuchtung, bei der die Front des Gebäudes von den Lichtkegeln kräftiger Scheinwerfer mit blendendem Licht übergossen wird. So tritt das derart beleuchtete Gebäude plastisch wie in vollem Tageslicht aus der dunklen Umgebung heraus. Bild 820 zeigt schließlich die Beleuchtungseffekte, die sich durch die Verbindung der verschiedenen elektrischen Lichtquellen erzielen lassen. Das Bild zeigt die Beleuchtung eines großen Vergnügungsparkes durch Flutlicht und Scheinwerfer. Das ganze Gelände ist dabei von einem Lichtmeer übergossen, aus dem sich einzelne besonders hell erleuchtete Partien noch herausheben.



820. Eine Gartenillumination
Flutlicht in Verbindung mit Scheinwerferbeleuchtung

Eng verwandt mit diesen Festbeleuchtungen ist die Bühnenbeleuchtung. Die Schaubühne war ja gerade die Stelle, an der das junge elektrische Glühlicht zuerst Bürgerrecht gewann. Es war möglich, einzelne Glühlampen oder auch Lampengruppen von einer einzigen Zentralstelle aus durch eine einfache Hebelbewegung nicht nur ein- und auszuschalten, sondern unter Verwendung von Vorschaltwiderständen auch stetig in ihrer Helligkeit zu regulieren. Indem man nun weiter mit farbigen Lampen arbeitete, beispielsweise immer je vier Lampen mit weißem, rotem, blauem und gelbem Glaskolben nebeneinanderstellte, wurde es möglich, alle nur erdenkbaren Farbenstimmungen der Natur vom rosigen Sonnenaufgang durch die hellen Mittagsstunden bis zur Sternennacht auf der Bühne getreulich nachzuahmen. Nicht mit Unrecht hat man den großen Bühnenregulator, von dem aus die vielen Tausende von Glühlampen einer solchen Bühnenbeleuchtung gesteuert werden, als ein Licht- und Farbenklavier bezeichnet. Die fortschreitende Bühnentechnik brachte den Kuppelhorizont an Stelle der früheren gemalten Hintergründe, und dadurch ließen sich wieder ganz neue Effekte erreichen. Es wurde nun möglich, die an sich rein weiße Kuppel dieses Horizontes in allen Farben vom lichten Himmelsblau bis zum dunklen Gewittergrau zu beleuchten und durch Projektionsapparate Wolken jeder Gestalt und Farbe darüber hinziehen zu lassen. Durch die Verschiebung zweier verschiedener Wolkenbilder vor dem Lichtbündel der Projektionslampe ließ sich dabei sogar das natürliche Spiel des Entstehens und Vergehens einzelner Wolkenformen täuschend nachahmen. Gegenwärtig hat man die ältere

821. Flutlichtbeleuchtung
Die Fassade des Gebäudes wird durch Scheinwerfer erhellt und scheint dadurch selbstleuchtend zu werden

Art der Bühnenbeleuchtung mit kleinen Glühlampen vielfach zugunsten der Starklichtlampen aufgegeben. Aber für die Beleuchtung einzelner Versatzstücke und Soffitten kommen sie stets zur Anwendung, während die Hauptbeleuchtung des Horizontes und der Spielfläche durch Starklichtlampen bewirkt wird.

Die Bilder 818 und 819 geben einige mit diesen Mitteln erstellte Bühnenbilder. Bild 818 zeigt links eine Freilandschaft unter der Fortuny-Kuppel mit ausgesteiften Setzstücken, rechts eine Freilandschaft mit Rundhorizont. Bild 819 veranschaulicht ein Bühnenbild der Versuchsbühne der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft. Man kann diese vollkommen unbelebte Gebirgsszene in wechselnden Lichtstimmungen vom Alpenglühen bei Sonnenaufgang durch Gewitterstürme und Sonnenschein lange Zeit gefesselt beobachten, ohne den Mangel einer Handlung zu empfinden. Gerade auf diesem Gebiete erhebt sich die Beleuchtungstechnik zu einer wirklichen Kunst und schafft Effekte von früher nicht geahnter Schönheit. Nur die wenigsten Theaterbesucher dürften sich freilich darüber klar sein, eine wie wichtige Person der Beleuchter im Theaterbetriebe ist, und wie sehr er durch eine sachgemäße Bedienung der vielen Hebel die darstellenden Künstler und die Wirkung des gesprochenen Wortes zu unterstützen vermag. Die oft gebrauchte Redensart „Etwas ins rechte Licht setzen" gewinnt hier eine sehr reale Bedeutung.

Die Bühnenbeleuchtung ist das vornehmste Gebiet der elektrischen Beleuchtungstechnik und wird es voraussichtlich immer bleiben.

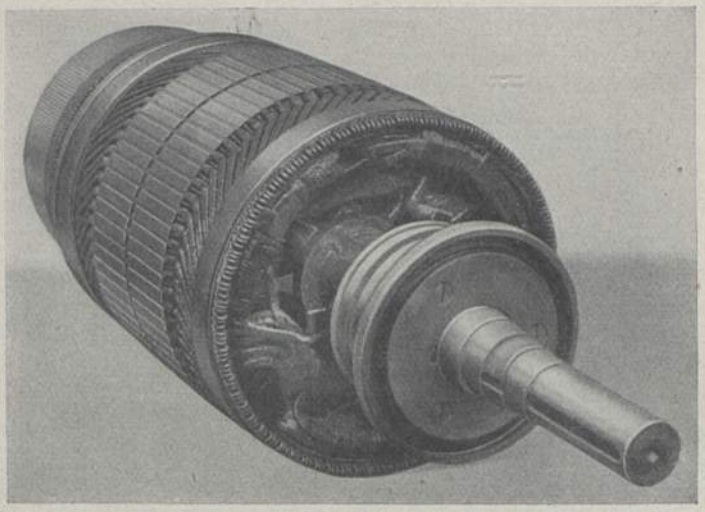
822. Reklamebeleuchtung

Das Firmenschild auf dem Dache besteht aus Neon-Leuchtröhren, die Beleuchtung an den Hausfronten ist aus lichtstarken Glühlampen aufgebaut

Bereits in Abschnitt 31 wurde bei der Behandlung der elektrodynamischen Wirkungen und der elektromagnetischen Induktion (S. 368, 369 u. 385) mitgeteilt, daß jede Gleichstromdynamo auch als Gleichstrommotor arbeiten kann. Unter Zuführung mechanischer Energie liefert sie Elektrizität, und umgekehrt gibt sie mechanische Arbeit ab, wenn ihr elektrischer Strom zugeführt wird. Die erste praktische Ausnutzung dieser Tatsache wurde in Deutschland schon vor fünfzig Jahren versucht. Hermann Meyer berichtet darüber in seinen Erinnerungen:

„Im Jahre 1878 wurde in einem Kgl. Institut in Spandau die erste elektrische Kraftübertragung eingerichtet. Den Strom gab eine Maschine Modell DO, eine Maschine des gleichen Typs wurde als Motor verwendet. Beide besaßen Reihenschaltung. Durch den Motor wurde eine in geringer Entfernung von der Antriebswelle des Stromgebers liegende Transmissionswelle angetrieben. Die Maschinen arbeiteten zwar störungsfrei, unerwünscht aber waren die bedeutenden Unterschiede in der Umlaufszahl bei Belastungsschwankungen. Um diesen Übelstand zu beseitigen, mußte ich einen von der angetriebenen Transmissionswelle betätigten und mit Kontakten versehenen Fliehkraftregler anbauen, der einen im Stromkreis liegenden Widerstand zu- und abschaltete. So wurde die Geschwindigkeit genügend gleichmäßig gehalten. Die Bedienung erforderte jedoch viel Sorgfalt, auch fehlte noch das rechte Vertrauen zu der elektrischen Kraftübertragung. Man kam daher schließlich doch zu dem Entschluß, diese Kraftübertragung zu beseitigen und eine mechanische Übertragung durch eine Welle einzurichten. Das erschien damals noch sicherer."

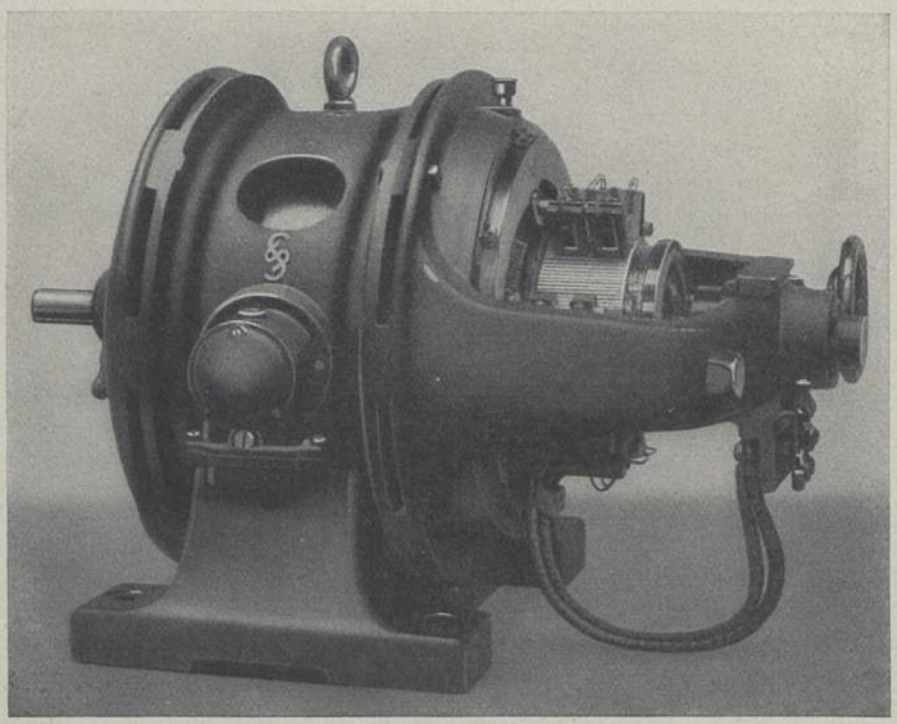
Daß dieser erste Versuch erfolglos verlief, lag einerseits in der damaligen Unvollkommenheit der elektrischen Maschinen und außerdem in der unglücklichen Wahl von Hauptschlußwicklungen sowohl für den Stromerzeuger wie für den Motor. Ebenso wie für die Dynamo (vgl. Seite 377 f.) gibt es auch für den Elektromotor die drei Möglichkeiten der Hauptschluß-, Nebenschluß- und Verbundwicklung. Je nach der gewählten Wicklung zeigt der Motor ein sehr verschiedenes Verhalten, und nach diesem Verhalten muß die Motorenart für jeden Sonderfall gewählt werden. In dem hier geschilderten Fall des Transmissionsantriebes einer Fabrik wäre ein Nebenschlußmotor das richtige gewesen, wie die nachstehenden Ausführungen zeigen werden.



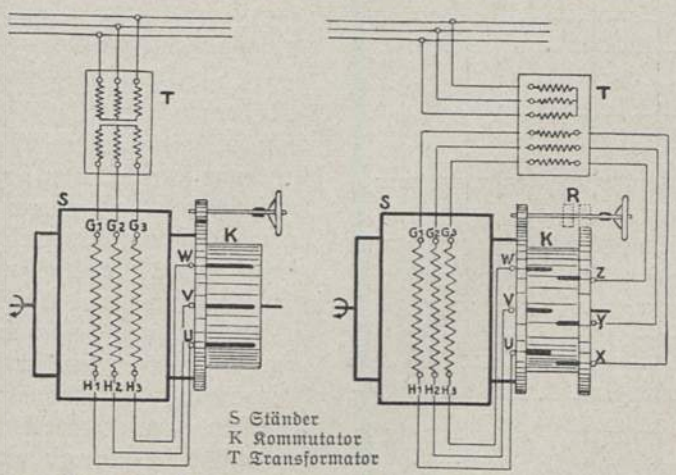
823. Anker eines Drehstrom-Nebenschlußmotors

Will man sich über das Verhalten eines Gleichstrom-Elektromotors klar werden, so muß man folgendes berücksichtigen. Der Ohmsche Widerstand der Ankerwicklung ist im allgemeinen sehr gering. Er beträgt bei mittleren Motoren etwa ein Ohm. Wollte man die ganze übliche Netzspannung von 220 Volt auf den stillstehenden Anker schalten, so würde er momentan einen Strom von etwa 220 Ampere aufnehmen, die Sicherungen würden durchschmelzen oder seine Windungen würden verbrennen. Wenn sich nun aber der Anker unter dem Einflusse eines seine Windungen durchfließenden Stromes dreht, so treten doppelte Wirkungen in ihm auf. Einerseits unterliegt er dem elektrodynamischen Gesetz und vollführt als Motor eine Drehung, da seine stromdurchflossenen Windungen sich ja in einem magnetischen Feld befinden. Andererseits aber treten in diesen nunmehr in einem magnetischen Feld bewegten Drähten nach dem Gesetz der elektromagnetischen Induktion elektromotorische Kräfte auf, die der Richtung des den Motoranker speisenden Stromes entgegengerichtet sind. Das heißt also, der in Bewegung geratende Motoranker entwickelt eine mit steigender Tourenzahl steigende elektromotorische Gegenkraft. Bei mittleren Motoren für 220 Volt beträgt diese Gegenkraft bei normaler Tourenzahl 200 bis 210 Volt, so daß nur noch eine Ankerstromstärke zustande kommt, die etwa dem zehnten bis zwanzigsten Teil der bei stillstehendem Anker eintretenden entsprechen würde. Aus diesem Verhalten folgt zunächst, daß man jedem Gleichstrommotor, abgesehen von den ganz kleinen Typen in Staubsaugern, Fönapparaten und dergleichen, einen Anlaßwiderstand geben muß, der mit dem Motor hintereinandergeschaltet am Netz liegt und dessen einzelne Widerstandsspulen beim Anlassen des Motors nur allmählich und in dem Maße, in dem der Anker auf Touren kommt, aus dem Stromkreise herausgenommen werden. Das gilt in gleicher Weise für Hauptschluß- wie für Nebenschlußmotoren.

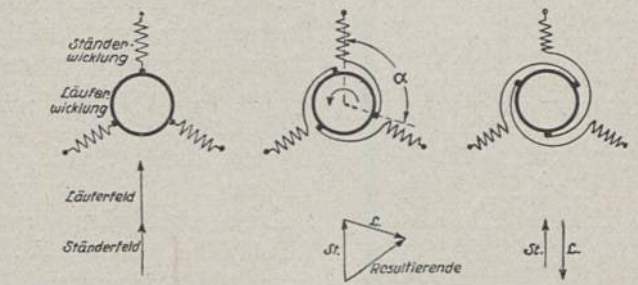
Betrachten wir nun das Verhalten eines Hauptschlußmotors. Der gleiche Strom durchfließt hier hintereinander die Wicklungen der Feldmagnete und die des Ankers. Da im Anfang die elektromotorische Gegenkraft des Ankers fehlt, so wird der Strom in beiden Wicklungen sehr stark sein, es werden sich von recht starken Strömen durchflossene Ankerdrähte in einem sehr starken magnetischen Felde befinden und daher auch mit einer sehr großen elektrodynamischen Kraft in Bewegung gesetzt werden. Das bedeutet aber, daß der Hauptschluß-Gleichstrommotor schon bei geringer Tourenzahl mit großer Kraft angeht, ebenso wie sich etwa ein Zugpferd vor dem noch stillstehenden Wagen mit großer Kraft in das Geschirr legt, um ihn allmählich in Schwung zu bringen. Infolge dieser Eigenschaft ist der Hauptschlußmotor der gegebene Traktionsmotor. Er kommt für den Betrieb von elektrischen Bahnen, Fahrstühlen, Fördermaschinen, Kränen und dergleichen in Frage, kurz, überall dort, wo es sich darum handelt, größere Massen oder Lasten allmählich und mit großer Kraft in Bewegung zu setzen. Wenn weiter während des Betriebes die Belastung aus irgendwelchen Gründen größer wird, beispielsweise eine Straßenbahn bergauf fahren muß, so



824. Drehstrom-Reihenschlußmotor der Siemens-Schuckertwerke. Die normale Drehzahl des Motors beträgt 1500 Umdrehungen in der Minute. Er ist zwischen 750 und 1850 Umdrehungen durch Bürstenverschiebung regelbar

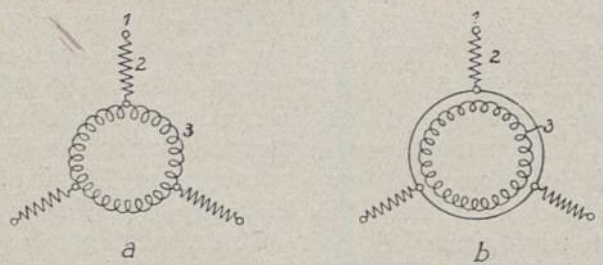



825. Drehstrom-Reihenschlußmotor mit Vordertransformator
Links mit einfachem Bürstensatz, rechts mit doppeltem Bürstensatz.

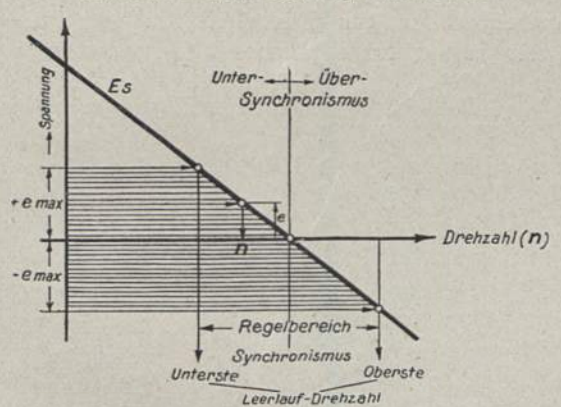



Anfahr- oder Nullstellung, Betriebsstellung, Kurzschlußstellung

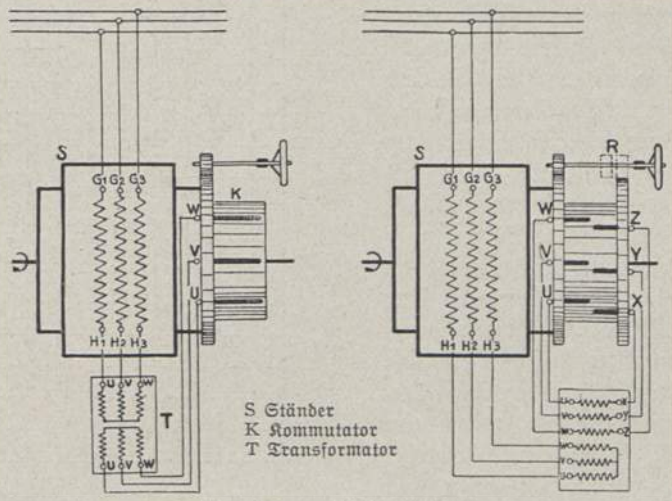
827. Drehstrom-Reihenschlußmotor mit einfachem Bürstensatz
Richtung des Ständer- und Läuferfeldes in Abhängigkeit von der Bürstenstellung



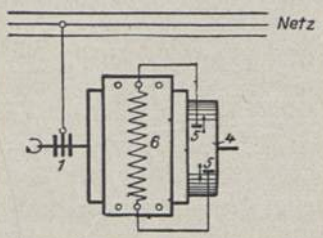

830. Schema der Läuferwicklung des Drehstrom-Nebenschlußmotors
2 Schleifringwicklung, 3 Kommutatorwicklung, a beide Wicklungen verkettet, b beide Wicklungen unverkettet



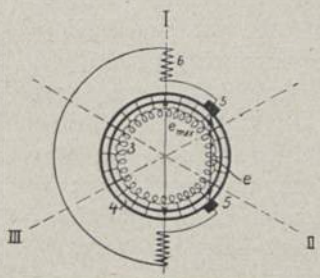

831. Regelbereich, Grunddrehzahlen eines Drehstrom-Nebenschlußmotors
Es Ständerschlupfspannung, e Kommutator-Regelspannung, e/max maximale Kommutatorspannung



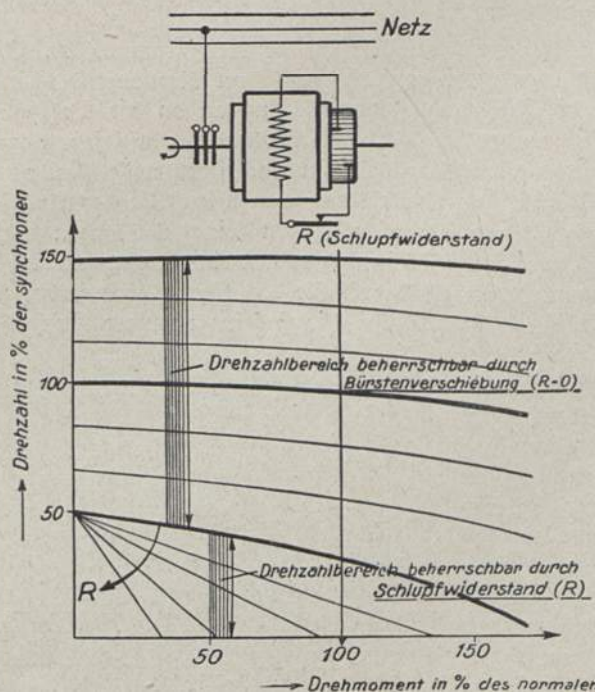

826. Drehstrom-Reihenschlußmotor mit Zwischentransformator
Links mit einfachem Bürstensatz, rechts mit doppeltem Bürstensatz.




828. Drehstrom-Nebenschlußmotor mit Läuferspeisung und Drehzahlregelung durch Bürstenverschiebung
1 Schleifringe (Netzanschluß), 4 Kommutator, 5 gegenläufige Bürsten, 6 Ständerwicklung

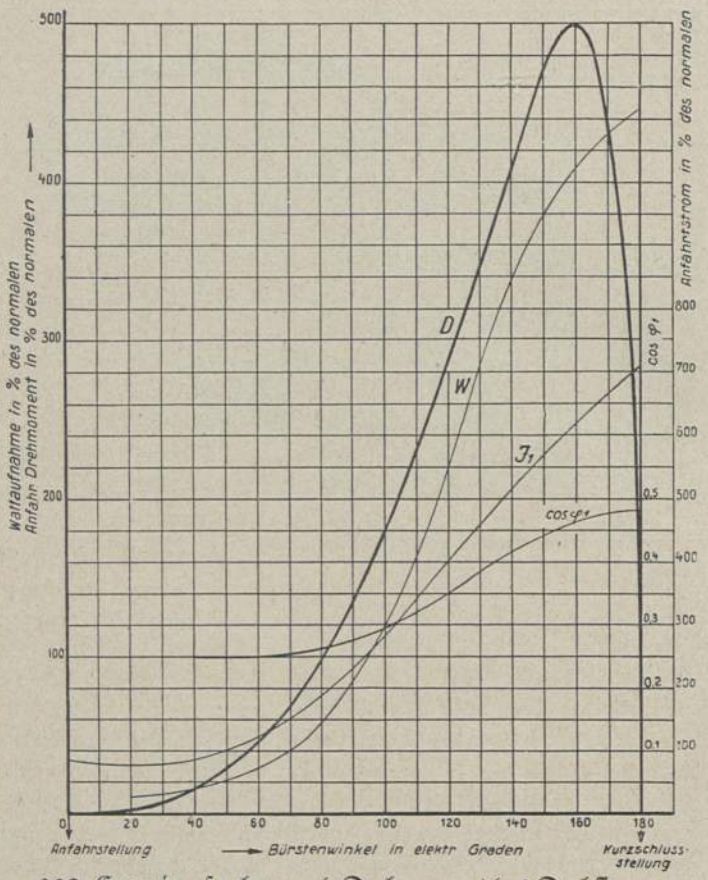



829. Regelung eines läufergespeisten Drehstrom-Nebenschlußmotors
3 Kommutatorwicklung, 4 Kommutator, 5 gegenläufige Bürsten, 6 Ständerwicklung, e Regelspannung von 0 bis ± e/max




832. Drehzahl-Charakteristik und -Bereich eines Drehstrom-Nebenschlußmotors
mit Läuferspeisung und Drehzahlregelung durch Bürstenverschiebung

wird die größere Beanspruchung zunächst die Drehzahl des Ankers verringern. Infolgedessen nimmt die elektromotorische Gegenkraft des Ankers ab, es fließt stärkerer Strom in Feld und Anker, und mit erheblich vermehrter Drehkraft stellt sich der Hauptstrommotor bei merklich verringerter Drehzahl auf die neuen Verhältnisse ein. Er ist also innerhalb weiter Grenzen elastisch. Bedenklich werden die Verhältnisse freilich, wenn eine starke Entlastung eintritt, wenn etwa der Riemen, mit dem der Motor eine Transmission treibt, abrutscht. Der entlastete Motor wird sofort schneller laufen. Der schnellere Lauf ergibt eine Vergrößerung der elektromotorischen Gegenkraft des Ankers und somit eine Verringerung der Stromstärke. Das dadurch schwächer werdende Magnetfeld gestattet wiederum einen schnelleren Ankerlauf, und so geht es in unheilvoller Wechselwirkung weiter, bis die Fliehkräfte zu groß werden und der Anker explodiert. Man sagt: Der Motor ist durchgegangen. Da der Hauptstrommotor diese Eigenschaft besitzt, darf er nicht in Betrieben verwendet werden, in denen eine solche vollkommene Entlastung möglich ist.

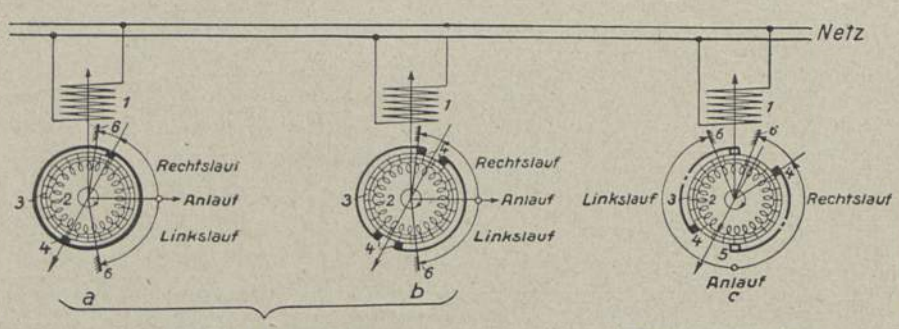



833. Energieaufnahme und Drehmoment des Drehstrom-Reihenschlußmotors

mit einfachem Bürstensatz und Zwischentransformator. D Anfahr-Drehmomente, $J_1$ Anfahr-Ständerstrom, cos $\varphi_1$ Leistungsfaktor, W Wattaufnahme in Abhängigkeit vom Bürstenwinkel. Ständerspannung = konstant = normal

Wesentlich anders verhält sich der Nebenschlußmotor. Bei ihm liegt, wenn wir vorläufig von dem Regulierwiderstand absehen, die Feldwicklung von Anfang an an der Netzspannung. Das magnetische Feld des Motors hat also sofort unabhängig von allen Vorgängen im Ankerstromkreise seine endgültige Stärke. Der Anker, dem man mit Hilfe des Anlaßwiderstandes einen Strom gibt, den seine Wicklungen noch vertragen, wird sich in diesem Felde mit einer geringeren Kraft in Bewegung setzen als der Anker des Hauptschlußmotors in seinem stärkeren Feld. Einmal auf seine normale Drehzahl gebracht, wird er diese auch bei Belastungsschwankungen mit großer Konstanz beibehalten, da ihm schon sehr geringe Veränderungen seiner Drehzahl diejenigen Veränderungen der Ankergegenkraft und der dadurch bedingten Ankerstromstärke und Ankerzugkraft bringen, die notwendig sind, um die Belastungsschwankungen auszugleichen. Insbesondere wird der Nebenschlußmotor auch bei einem plötzlichen vollständigen Wegfall der äußeren Belastung nicht durchgehen, da bereits eine Erhöhung seiner Drehzahl um wenige Prozent in dem unverändert gebliebenen Magnetfeld genügt, um die elektromotorische Gegenkraft des Ankers so weit zu steigern, daß er nur noch ganz geringe, eben für die Überwindung der Reibungswiderstände ausreichende Mengen elektrischer Energie aufnimmt. Diese Eigenschaften haben dem Nebenschluß-Gleichstrommotor eine weitgehende Verbreitung in den industriellen Betrieben verschafft, in denen es auf eine möglichst gleichbleibende Tourenzahl auch bei wechselnden Belastungen ankommt.

Der Anlaßwiderstand nimmt sowohl beim Hauptschluß- wie beim Nebenschlußmotor die sehr beträchtliche Anlaßstromstärke auf und muß so bemessen sein, daß er sie ohne schädliche Erhitzung verträgt. Dabei wirkt aber der Umstand vorteilhaft, daß das Anlassen vom Stillstand bis zur Erreichung der vollen Tourenzahl sich in einigen Sekunden vollzieht, so daß die Drähte dieses Widerstandes nicht für eine Dauerbelastung bemessen zu werden brauchen. Der Anlaßwiderstand ist eben ausschließlich zum Anlassen, aber nicht zum Regulieren der Motordrehzahl bestimmt. Eine solche Regulierung würde auch wenig wirtschaftlich sein, da man dabei einen recht beträchtlichen Teil der dem Netz entnommenen Energie nutzlos in dem Widerstand niederschlagen, d. h. in Wärme verwandeln würde. Verhältnismäßig einfach gestaltet sich die Regulierung bei den Nebenschlußmotoren. Hier genügt es, einen veränderlichen Drahtwiderstand in den Stromkreis der Feldwicklungen zu legen, der ja nur einen geringen Prozentsatz der gesamten dem Motor zugeführten Stromstärke aufnimmt. Dementsprechend braucht dieser Widerstand, der nun freilich für eine Dauerbelastung einzurichten ist, doch nur aus verhältnismäßig recht dünnen Drähten zu bestehen, und auch die Energieverluste in ihm sind sehr gering, da sie ja immer nur einen Prozentsatz des



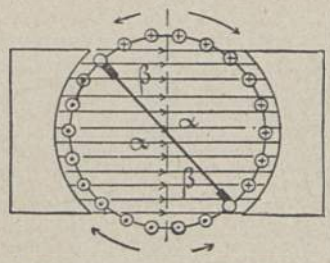

Einfacher Bürstensatz Doppelter Bürstensatz
Durchmesser-Kurzschluß Sehnen-Kurzschluß

834. Grundschaltungen des Einphasen-Repulsionsmotors

mit Drehzahlregelung durch Bürstenverschiebung. 1 Ständerwicklung (Netzanschluß), 2 Läuferwicklung, 3 Kommutator, 4 bewegliche Bürste, 5 feste Bürste, 6 Anschlag

an sich schon geringen Prozentsatzes der Feldenergie ausmachen. Durch Einschalten von Widerstand verringert man dabei den Feldstrom, dementsprechend auch die Feldstärke, und zwingt dadurch den Anker zu schnellerem Lauf, da er nur so in dem geschwächten Felde die nötige elektromotorische Gegenkraft entwickelt.

Bei Hauptstrommotoren ist die Regulierung nicht ganz so einfach, obwohl dieser Motor sich, wie gesagt, schon zum Teil automatisch den jeweiligen Veränderungen der Betriebsverhältnisse anpaßt. Eine Regulierung, welche der eben besprochenen Regulierung des Nebenschlußmotors in der Wirkung gleichkommt, erreicht man, indem man einen Regulierwiderstand parallel zu den Feldwicklungen des Hauptschlußmotors vorsieht. Der gesamte Stromkreis erfährt also eine Verzweigung. Der Strom durchfließt erst den Anker und teilt sich dann in zwei Ströme, die nebeneinander durch die Feldwicklungen und den Regulierwiderstand fließen, und deren Summe immer gleich dem gesamten Motorstrom ist. Je nach der Einstellung des Regulierwiderstandes entzieht dieser dabei den Feldwicklungen mehr oder weniger Strom, man erreicht also auch hier eine Feldschwächung und eine entsprechende Steigerung der Tourenzahl. Eine andere Art der Regulierung besteht darin, daß man die Feldwicklungen in einzelne Abschnitte unterteilt und diese nach Bedarf bald hintereinander, bald nebeneinander schaltet. Trotzdem aber braucht man in den meisten Fällen noch für Dauerbetrieb zu bemessende und entsprechend starke und auch kostspielige Regulierwiderstände, die im Hauptstromkreis liegen. Die Einzelheiten einer solchen Regulierung sind in Band II dieses Werkes auf Tafel XXVI bei der Besprechung der elektrischen Einrichtungen von Straßenbahnwagen dargestellt.



835. Schema eines Repulsionsmotors

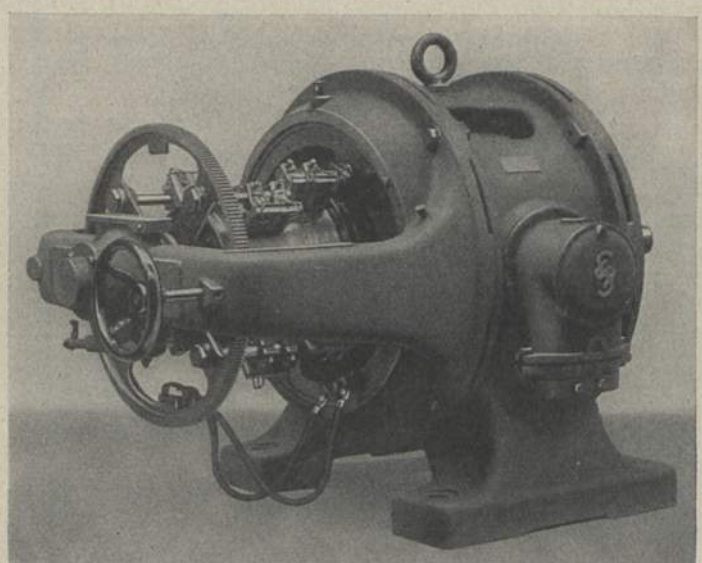
Für den mit Doppelschlußwicklung versehenen Gleichstrommotor gilt das auf Seite 378 über die Doppelschlußdynamo Gesagte. Je nachdem die eine oder die andere Wicklung überwiegt, je nachdem er also unter- oder übercompoundiert ist, wird er mehr die Eigenschaften des Nebenschluß- oder des Hauptschlußmotors zeigen, in jedem Falle aber eine Mischung beider aufweisen.

Wenden wir uns nun der zweiten großen Motorengruppe, den Drehstrom-Elektromotoren, zu. Hier ist an erster Stelle der Drehstrom-Induktionsmotor zu nennen (vgl. Seite 395 f.), bei dem lediglich der feststehende Teil, der Ständer, aus dem Netz gespeist wird, während der Läufer sich unter der Wirkung der in ihm induzierten Ströme dreht und dabei je nach der Belastung mehr oder weniger hinter der Drehung des Ständerfeldes zurückbleibt. Der Induktionsmotor besitzt zwar bis zu einem gewissen Grade die automatische Selbstregelung und Elastizität des Gleichstrom-Hauptschlußmotors. Diese reicht jedoch nicht aus, um ihn ohne weiteres für den Betrieb von Bahnen, Kränen und dergleichen an Stelle des Gleichstrom-Hauptschlußmotors zu verwenden, und zwar um so mehr, als seine Regulierfähigkeit verhältnismäßig gering ist. Sie kann nur durch Einschalten von Widerstand in den Läuferstromkreis erfolgen, wobei nicht nur die Tourenzahl, sondern auch das Drehmoment stark abfallen.

Auch die zweite Art des Drehstrommotors, der Drehstrom-Synchronmotor, wurde bereits auf Seite 419 behandelt. Dieser Motor besitzt Eigenschaften, die denen des Gleichstrom-Nebenschlußmotors ziemlich ähnlich sind, nur fällt bei ihm jede Möglichkeit, die Drehzahl zu regulieren, weg. Diese ist ein für allemal durch die Periodenzahl des Netzstromes und die Wicklung der Maschine bestimmt und wird genau innegehalten. Für viele Betriebe ist das erwünscht, und da dieser Motor außerdem der schädlichen Phasenverschiebung im Netz entgegenarbeitet, erfreut er sich einer ziemlichen Verbreitung.

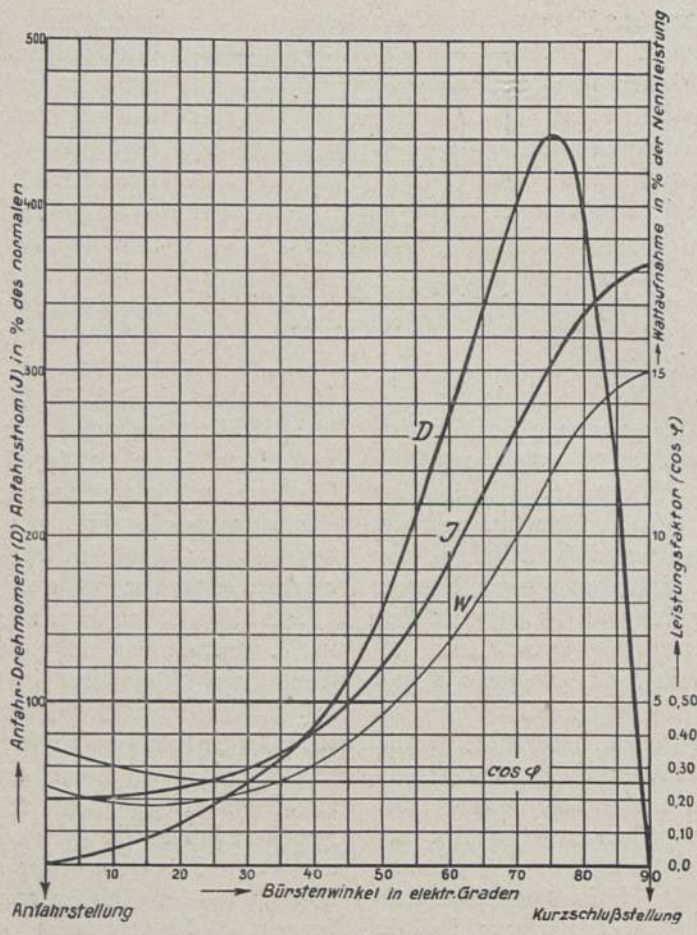
Mit diesen beiden Typen hat man aber bei der Versorgung mit Drehstrom noch nicht das, was namentlich der Gleichstrom-Hauptschlußmotor bietet, und so sind denn noch zwei andere Arten von Drehstrommotoren entwickelt worden. An erster Stelle mag der Drehstrom-Reihenschlußmotor mit Drehzahlregelung durch Bürstenverschiebung genannt werden. Der Drehstrom-Reihenschlußmotor ist ebenso wie der Drehstrom-Induktionsmotor ein ständergespeister Drehfeldmotor. Ebenso wie beim Induktionsmotor wird auch hier unter der Einwirkung des im Ständer erzeugten Drehfeldes in den Windungen des Läufers durch Induktion Strom erzeugt. Aber die Windungen des Läufers werden hier nicht kurz geschlossen, sondern mit Hilfe eines Kommutators und eines Bürstensystems entweder direkt oder indirekt mit der Ständerwicklung in Reihe geschaltet. Die Bilder 825 und 826 geben schematisch die Schaltung dieses Motors.

Der Motor ist in üblicher Weise aus Blechpaketen aufgebaut. Der Ständer trägt die normale Wicklung eines Drehstrom-Induktionsmotors, der Läufer dagegen eine normale Gleichstrom-Trommelwicklung, die in üblicher Weise mit dem Kommutator verbunden ist. Auf diesem schleifen Bürsten, die entweder direkt oder über einen Zwischentransformator mit der Ständerwicklung verbunden sind. Ferner sind zwei grundsätzliche Bauarten zu unterscheiden, je nachdem ein einfacher verschiebbarer Bürstensatz (Bilder 825 u. 826 links) vorhanden ist oder zwei voneinander unabhängige Bürstensätze, die gegeneinander verschoben werden können (Bilder 825 u. 826 rechts). Durch die verschiedene Stellung der Bürsten können nun das im Ständer durch direkte Stromzuführung und im Läufer durch Induktion erzeugte Drehfeld innerhalb weitester Grenzen gegeneinander verschoben werden (Bild 827). Bei der dort links gezeigten Stellung ist das Drehmoment des Motors null



836. Einphasen-Repulsionsmotor mit doppeltem Bürstensatz von Siemens-Schuckert. Normale Drehzahl 1360 Umdrehungen in der Minute. Regelbereich für Dauerbetrieb zwischen 680 und 1500 Umdrehungen

und die Stromaufnahme ein Minimum. Man bezeichnet diese Stellung als die Nullstellung oder Anfahrstellung. Werden die Bürsten (Bild, Mitte) aus der Anfahrstellung verschoben, so entsteht ein Drehmoment, das bei einer Bürstenverschiebung um einen Winkel von 160 Grad sein Maximum erreicht. Das ist die Betriebsstellung. Eine weitere Verschiebung der Bürsten führt wieder zu einer Abnahme des Drehmomentes, während die Stromaufnahme in unzulässiger Weise ansteigt. Diese sogenannte Kurzschlußstellung (Bild, rechts) darf im Betriebe nicht erreicht werden. Bild 833 zeigt das Verhalten eines Drehstrom-Reihenschlußmotors bei den verschiedenen Bürstenstellungen in Kurvendarstellung. Die mit D bezeichnete Kurve gibt das Drehmoment, die mit W bezeichnete die Energieaufnahme in Watt, die mit $J_1$ bezeichnete den aufgenommenen Strom. Wie die Kurvendarstellung zeigt, ist der Drehstrom-Hauptschlußmotor innerhalb der weitesten Grenzen regulierbar. Dabei hängt das Drehmoment im Gegensatz zum Gleichstrom-Hauptschlußmotor keineswegs von der Umdrehungszahl des Motorankers ab, sondern kann bei jeder Tourenzahl einreguliert werden. Das Verwendungsgebiet des Motors in Drehstromnetzen entspricht ungefähr demjenigen des Hauptschlußmotors in Gleichstromnetzen. Man benutzt ihn zum Antriebe von Zentrifugalpumpen und Ventilatoren, Kolbenpumpen und Kompressoren, Druckmaschinen, Haspeln, Kranhubwerken, Schiebebühnen, kleineren Walzwerken, Pressen und Baggern.

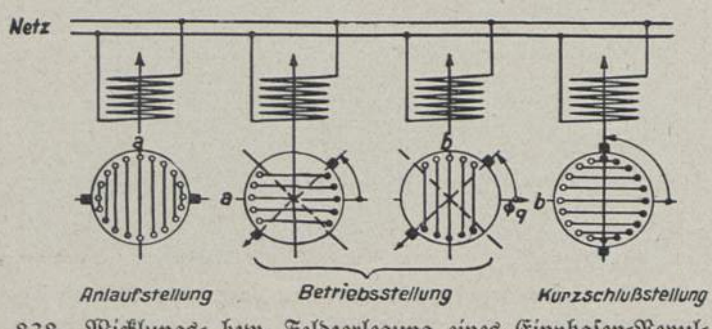



837. Einphasen-Repulsionsmotor mit Bürstenverschiebung und Sehnenkurzschluß

3,5 Kilowatt bei 220 Volt, 50 Perioden in der Sekunde, 1500 Touren. D Anfahr-Drehmoment, J Anfahr-Ständerstrom, cos φ Leistungsfaktor, W Wattaufnahme in Abhängigkeit vom Bürstenwinkel. Ständerspannung = konstant = normal

Der Drehstrom-Nebenschlußmotor mit Läuferspeisung und Drehzahlregelung durch Bürstenverschiebung (Bild 828) ähnelt zwar äußerlich dem Drehstrom-Reihenschlußmotor insofern, als er auch einen Kommutator und verstellbare Bürsten besitzt. Im übrigen unterscheidet er sich grundsätzlich von ihm. Es ist ein läufergespeister Drehstrommotor, und zwar besitzt der Läufer (Bild 823) zwei elektrisch vollkommen voneinander getrennte Wicklungen, erstens die in Bild 830 mit 2 bezeichnete normale Drehstromwicklung, welcher der aus dem Netz kommende Drehstrom über drei Schleifringe (1) zugeführt wird, und zweitens eine in Bild 830 mit 3 bezeichnete normale Gleichstrom-Trommelwicklung, die in üblicher Weise mit einem Kommutator verbunden ist. Auf dem Kommutator schleifen (Bild 828) drei Paar gegenläufige Kohlenbürsten (5), die den in der Kommutatorwicklung induzierten Strom in die Ständerwicklungen (6) ableiten. Der Ständer hat eine normale Drehstromwicklung. Die drei Phasen sind jedoch nicht wie bei einem gewöhnlichen Drehstrommotor miteinander verkettet, sondern jede von ihnen (Bild 829) ist für sich mittels zweier gegenläufiger Bürsten mit der Kommutatorwicklung verbunden.

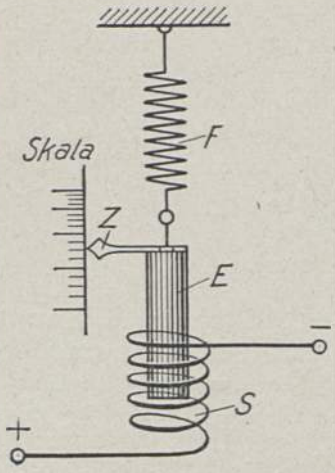
Der Motor wirkt wie folgt. Die vom Netz her dem Läufer durch die drei Schleifringe zugeführte konstante Drehstromspannung erzeugt in der Maschine ein Drehfeld. Dieses induziert in der Schleifring- und der Kommutatorwicklung eine von der Tourenzahl des Läufers völlig unabhängige Spannung. Andere Verhältnisse treten im Ständer auf. Das hier induzierte Drehfeld hängt in seiner relativen Geschwindigkeit gegenüber dem Ständer von der Läuferdrehzahl ab. Aus dem Zusammenwirken dieses Ständerfeldes mit den verschieden großen, dem Kommutator bei verschiedenen Bürstenstellungen entnommenen Strömen ergibt sich nun eine Regelbarkeit dieses Motors innerhalb sehr weiter Grenzen. Bild 832 zeigt dies Verhalten in Form von Schaulinien. Der hier behandelte Motor ist in diesem Fall zwischen 150 und 50 % der normalen Drehzahl durch einfache Bürstenverschiebung, d. h. ohne jeden Energieverlust regelbar. Eine weitere Regelung bis fast zum Stillstand ist durch zwischen Kollektor- und Ständerwindungen gelegte Regulierwiderstände R erreichbar. Dabei zeigt der Motor ein Verhalten, das demjenigen des Gleichstrom-Nebenschlußmotors sehr ähnlich ist, d. h. eine praktische Unabhängigkeit der Tourenzahl von der augenblicklichen Belastung und die Unmöglichkeit des Durchgehens. Er ist daher überall dort am Platze, wo in Gleichstromnetzen der Gleichstrom-Nebenschlußmotor Verwendung finden würde. Die hier zuletzt besprochenen beiden Motortypen sind Konstruktionen der Siemens-Schuckertwerke und diesen patentrechtlich geschützt. Ähnliche Maschinen werden auch von anderen großen Konzernen hergestellt.




838. Wicklungs- bzw. Feldzerlegung eines Einphasen-Repulsionsmotors mit Drehzahlregelung durch Bürstenverschiebung

Der Drehstrom bedeutet in der Geschichte der Elektrotechnik eine wichtige Etappe. Nur durch ihn wurde der Sprung vom Gleichstrom zum Wechselstrom überhaupt möglich, der dann

weiterhin zu dauernden Spannungserhöhungen und den heutigen Fernübertragungen führen sollte. In neuerer Zeit macht sich jedoch immer mehr das Bestreben geltend, mit einfachem einphasigen Wechselstrom auszukommen und auf den dreiphasigen Wechselstrom mit seinen drei Leitungen zu verzichten. Das gilt in ganz besonderem Maße für den elektrischen Vollbahnbetrieb. Die Verwendung von Drehstrom bedeutet hier, wenn wie üblich für eine Phase die Erde als Rückleitung benutzt wird, immer noch zwei Fahrdrähte, d. h. etwa den doppelten Aufwand für die Oberleitungsanlage gegenüber einer einfachen Wechselstrombahn. In ähnlicher Weise machte sich der Wunsch nach einfachen Wechselstrommotoren aber auch in zahlreichen ortsfesten Betrieben geltend. Man braucht ja nur an die vielen Wohnungen im Bereiche einer Drehstromversorgung zu denken, in die für Beleuchtungszwecke fast immer nur zwei Phasen eingeführt werden. Es würde eine unerträgliche Komplikation bedeutet haben, wenn man nun auch für die mannigfachen kleinen Haushaltmotoren die dritte Phase hätte einführen und die ganze Installation einschließlich der Steckdosen dreipolig anlegen müssen. In der Tat ist es denn auch der Technik der letzten Jahrzehnte gelungen, recht brauchbare Motoren für einphasigen Wechselstrom zu schaffen.

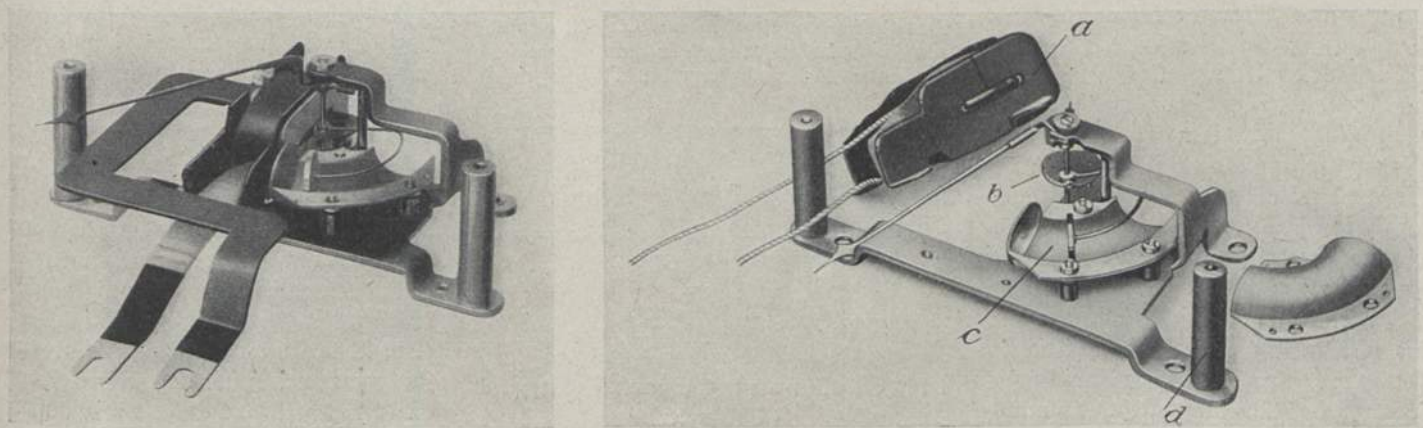



839. Älteste Anordnung eines Weicheiseninstrumentes

An einer Spiralfeder F hängt ein Weicheisen-Hohlzylinder E und taucht in die Stromspule S. Der mit dem Zylinder E fest verbundene Zeiger Z spielt über eine Skala

Betrachten wir zunächst noch einmal das Schaltungsschema eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors (S. 381). Der Strom durchfließt hintereinander die Feldwicklung, in der er einen Kraftlinienfluß erzeugt, und die Ankerdrähte, in denen er der elektrodynamischen Wirkung dieses Kraftlinienflusses unterliegt, so daß der Anker ein Drehmoment in einer bestimmten Richtung erhält. Kehrt man nun die Richtung des durch den Motor fließenden Stromes um, so ergibt sich folgendes: Da er jetzt die Feldwindungen in umgekehrter Richtung durchfließt, entsteht auch ein magnetischer Kraftfluß in einer um 180 Grad verdrehten Richtung. Aber gleichzeitig hat ja auch der Strom in den Ankerdrähten seine Richtung umgekehrt, und der Anker erfährt daher ein Drehmoment in derselben Richtung wie vorher. Das heißt also: eine Umkehrung der Stromrichtung übt auf die Drehrichtung eines Hauptstrommotors keinen Einfluß aus. Das gleiche gilt auch für den Nebenschlußmotor. Nun ist ja aber ein Wechselstrom nichts anderes als ein Strom, der seine Richtung fortwährend wechselt. Schaltet man also einen Gleichstrommotor an ein Wechselstromnetz, so müßte er eigentlich auch laufen, vorausgesetzt, daß die besonderen Wechselstromerscheinungen, wie Wirbelströme, Phasenverschiebung und induktiver Widerstand, nicht so groß werden, daß sie alles andere überwuchern. Man wird also bei diesen Motoren zuerst einmal auch die Feldpole aus fein unterteiltem Eisen aufbauen und außerdem, in Rücksicht auf den Scheinwiderstand oder Drosselwiderstand der Feldwicklungen, deren Windungszahlen erheblich niedriger als bei einem gleichen für Gleichstrombetrieb bestimmten Motor machen müssen. Geschieht dies aber, dann erhält man in der Tat Motoren, die nun auch bei Wechselstrom gut laufen und je nach ihrer Schaltung auch hier den Charakter von Hauptschluß- oder Nebenschlußmotoren aufweisen. In neuerer Zeit sind die meisten kleinen Elektromotoren für hauswirtschaftliche Betriebe, wie den Antrieb von Nähmaschinen, Küchenapparaten, Staubsaugern usw., derartig gebaut. Sie haben an einer geschützten Stelle ein paar feine Sicherungen, die leicht herausgenommen und wiedereingesetzt werden können. Die Feldwicklungen sind zunächst für Gleichstrombetrieb berechnet. Bei Gleichstrom sollen die Sicherungen herausgenommen sein. Bei Wechselstrombetrieb werden sie eingesetzt. Man schließt dadurch so viele Windungen der Feldwicklungen kurz, daß nun auch genügend Wechselstrom durch den Motor gehen und ihn antreiben kann.

Für größere Leistungen wählt man andere Anordnungen, um einen zuverlässig und funkenfrei arbeitenden Motor zu erhalten. Von diesen erfreut sich der Repulsionsmotor (Bild 836) einer besonderen Verbreitung und soll deshalb an dieser Stelle etwas eingehender besprochen werden. Die Bezeichnung Repulsion (Zurückstoßung oder Abstoßung) wurde zuerst von dem Physiker Elihu Thomson für die elektrodynamische Erscheinung der Abstoßung zweier zueinander parallel, aber in entgegengesetzter Richtung fließender Ströme benutzt. Thomson gab dazu folgenden sehr überzeugenden Vorlesungsversuch an:




840. Dreheisenmeßwerk von Siemens & Halske und seine Einzelteile

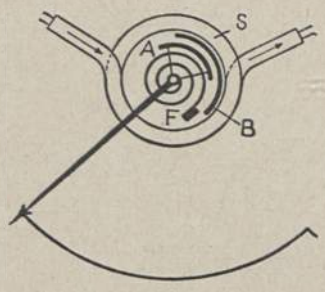
Die geradlinige Bewegung des Weicheisens in Bild 839 ist hier in eine kreisförmige verwandelt. Der drehbar gelagerte Eisenkern taucht in die Stromspule. Mit der Achse des Kernes ist ein Skalenzeiger fest verbunden und außerdem eine Dämpferscheibe, die in einer Dämpferkammer spielt. Der obere Teil der Dämpferkammer ist im Bilde links abgenommen. a Spulenkasten mit Kupferdrahtwicklung, b beweglicher Eisenkern, c Luftdämpfung mit Rohr und Kolben, d Lagerblock mit Skalenprägern

Über einen Eisenkern aus Blechlamellen ist eine Drahtspule mit vielen Windungen geschoben, die mit Wechselstrom gespeist werden kann. Der Eisenkern ragt noch einige Zentimeter aus der Spule nach oben heraus und ist oberhalb derselben von einem ganz locker sitzenden starken Kupferring umgeben. Dieser Ring wirkt wie die kurz geschlossene Sekundärwicklung eines Transformators. Sobald man der Spule Wechselstrom zuführt, treten in dem Kupferring sofort ebenfalls sehr starke Wechselströme auf, die aber den Kern in umgekehrter Richtung umfließen. Im gleichen Augenblick zeigt sich die Repulsion, indem der Kupferring mit großer Gewalt bis zur Saaldecke emporgeschleudert wird.

Diese Erscheinung der Repulsion wird nun auch im Repulsionsmotor benutzt, dessen Schema Bild 835 darstellt. Der Repulsionsmotor ist ebenfalls ein Kommutatormotor. Der Wechselstrom wird jedoch nur den Feldwindungen, also dem Ständer zugeführt und erzeugt ein Wechselfeld, das seinerseits induzierend auf die normale Gleichstrom-Trommelwicklung des Ankers wirkt. Weiter sind nun die beiden Kommutatorbürsten, die sich im Bild 835 diametral gegenüberstehen, durch eine starke Leitung kurz geschlossen. Dadurch erhält aber der Motor im Gegensatz zu dem einfachen Induktionsmotor eine durch die Verschiebung der Bürsten gesteuerte, praktisch verlustlose Drehzahlregelbarkeit, ein hohes Anfahrdrehmoment und einen guten Leistungsfaktor.

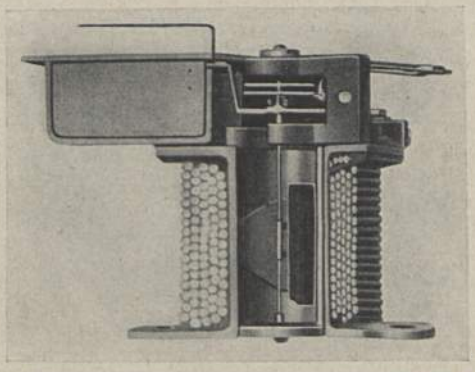
Die Wirkungsweise dieses Motors geht aus den in Bild 834 gezeigten Bürstenstellungen und Stromflüssen des Ankers hervor. Wird die Ständerwicklung an eine konstante Spannung gelegt und stehen die Bürsten in der Anfahrstellung, so wird dem Netz nur der für die Magnetisierung des Feldes erforderliche Strom entnommen. Der Anker ist hierbei stromlos, da sich bei dieser Bürstenstellung alle Spannungen aufheben. Werden jedoch die Bürsten nach einer beliebigen Richtung verschoben, so kann man sich (Bild 838 Mitte) die Ankerwicklung in zwei aufeinander senkrecht stehende Spulen (a und b) zerlegt denken. Die erstere ist gleichachsig mit der Ständerwicklung und wird daher von dieser induziert wie die Sekundärwicklung eines Transformators von der Primärwicklung. Die zweite Wicklung steht räumlich senkrecht zur Ständerwicklung und erzeugt daher ein Feld senkrecht zur Achse der Ständerwicklung. Durch das Zusammenwirken dieses Feldes mit dem gleichphasigen Ankerstrom entsteht nun in genau der gleichen Weise wie bei jedem Reihenschlußmotor ein Drehmoment. Die Richtung desselben ist stets der Richtung der Bürstenverschiebung entgegengesetzt. Durch eine stärkere oder geringere Bürstenverschiebung werden sowohl die Windungszahlen von a wie die von b geändert. Das Drehmoment und auch die Drehzahl lassen sich dadurch in höchst einfacher Weise ohne Anlasser und Regulierwiderstände innerhalb weiter Grenzen regeln. Die Kurvendarstellung im Bild 837 zeigt das Anfahr-Drehmoment, den Anfahr-Ständerstrom und die Wattaufnahme eines Repulsionsmotors bei verschiedenen Bürstenstellungen. Aus den Kurven geht hervor, daß hier ganz ähnlich wie bei dem früher besprochenen Drehstrom-Nebenschlußmotor die Bürstenstellung nicht über einen bestimmten Betrag hinaus verschoben werden darf, der hier bei 70 Grad liegt. Eine weitere Entwicklung des dem Repulsionsmotor zugrunde liegenden Gedankens führt zu Motoren mit doppelten Bürstensätzen, die jedoch im Prinzip ebenso arbeiten wie der einfache Diametralbürstensatz (Bild 834). Der Repulsionsmotor zeigt im Betriebe ein ähnliches Verhalten wie der Gleichstrom-Hauptschlußmotor. Insbesondere geht er beim plötzlichen Aussetzen der Belastung durch und muß dagegen, namentlich bei Riemenantrieb, wo immer mit einem gelegentlichen Abrutschen des Riemens zu rechnen ist, gesichert werden. Die Sicherung kann auf verschiedene Weise erfolgen. Einmal durch einen mit der Motorwelle in fester Verbindung stehenden Zentrifugalregulator, der den Netzstrom abschaltet, sobald die Tourenzahl über eine gewisse Höhe steigt. Außerdem benutzt man namentlich bei kleineren Motoren die Bremswirkung einer Käfigwicklung von der Art, wie sie auf Seite 395 bei der Besprechung des Drehstrom-Induktionsmotors gezeigt wurde. Die Käfigwicklung muß dabei so bemessen werden, daß die in ihr induzierten Ströme und die damit verbundenen Energieverluste bei normalen Tourenzahlen in mäßigen Grenzen bleiben, bei einer stärkeren Tourenerhöhung aber stark anwachsen und bremsen.

In den hier geschilderten Maschinen besitzt man nun für alle vorkommenden Stromarten und für die mannigfachsten Bedürfnisse der verschiedenen industriellen Betriebe die geeigneten Motoren. Zu betonen wäre nur noch die Anpassung dieser Motoren auch an die rein äußerlichen Verhältnisse der Betriebe, in denen sie arbeiten sollen. Es ist natürlich ein großer Unterschied, ob ein Elektromotor in einem trockenen sauberen Raum arbeiten soll oder etwa in einer chemischen

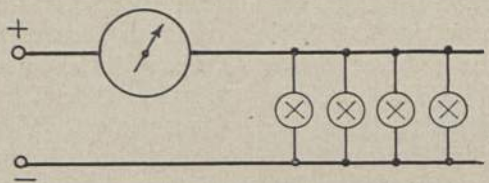



841. Schema eines anderen Weicheiseninstrumentes

In der stromdurchflossenen Spule S ist der Weicheisenkörper B fest, der Weicheisenkörper A drehbar gelagert. Infolge ihrer gleichnamigen Magnetisierung stoßen sich die beiden Eisenteile ungefähr proportional der durch die Spule fließenden Stromstärke ab

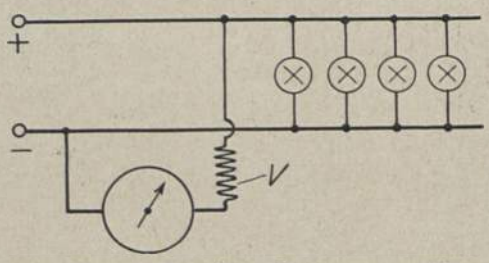


842. Weicheisen-Meßinstrument der AEG nach vorstehendem Schema. In der geschnittenen Stromspule sind der feste und der bewegliche Eisenkörper deutlich zu erkennen




843. Schaltung eines Strommessers (Amperemeter)

Das Instrument liegt in einer der Stromzuführungen. Seine Windungen werden von der gesamten Verbrauchsstromstärke durchflossen

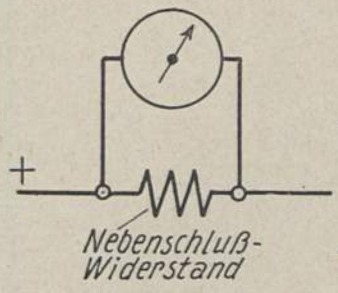



844. Schaltung eines Spannungsmessers (Voltmeter)

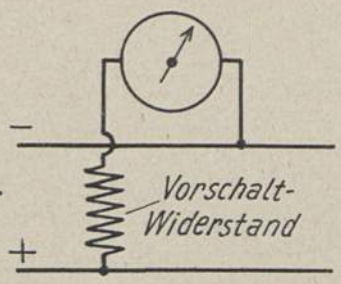
Das Instrument liegt im Nebenschluß zu den Verbrauchsstellen an den beiden Stromzuleitungen. Es nimmt die volle Netzspannung auf. Aus konstruktiven Gründen wird es im allgemeinen in Verbindung mit einem Vorschaltwiderstand verwendet

Fabrik, in der die Luft mit Säuredämpfen beladen ist. Ob er etwa in einer Zuckerfabrik eine Zentrifuge zu treiben hat und stets einem Guß heißer Melasse ausgesetzt ist, oder ob er gar in einem Salz- oder Kohlenbergwerk aufgestellt wird, wo Salzsohle, Kohlenschlamm und dergleichen seine Lebensdauer bedrohen, während Kollektorfunken zur Zündung von Schlagwettern führen können. Je nach der Art dieser Umstände muß der Motor mehr oder weniger geschützt werden, und die großen elektrischen Firmen unterscheiden grundsätzlich eine offene, eine halboffene und eine geschlossene Bauart. An und für sich ist natürlich eine offene Bauart erwünscht, da sie eine kräftige Durchlüftung und wirksame Abführung der Wärme begünstigt. Bei der halboffenen und noch viel mehr bei der geschlossenen Bauart muß man die natürliche Ventilation durch künstliche Mittel verstärken und geht bei den besonders schwer gekapselten Motoren in Bergwerks- und Hüttenbetrieben so weit, Preßluft in das Motorgehäuse hineinzublasen.

Auch hinsichtlich seiner Drehzahlen hat sich der Elektromotor im Laufe der Jahrzehnte mehr und mehr den Anforderungen der Betriebe angepaßt, in denen er zu arbeiten hat. Ebenso wie die ersten Dynamomaschinen waren auch die ersten Elektromotoren ausgesprochene Schnelläufer. Ihre Drehzahlen mußten durch Zwischenübertragungen auf den vierten bis zehnten Teil hinabgesetzt werden, was durch Riemenantrieb oder Zahnradgetriebe erreicht wurde. Beide Übertragungsarten sind nicht schön, machen mehr oder weniger Lärm und bringen einen neuen Unsicherheitsfaktor in das Ganze. Ebenso wie bei der Dynamo war auch beim Elektromotor die direkte Kupplung das anzustrebende Ideal und ist, wie der nächste Abschnitt zeigen wird, heut zum größten Teil erreicht. Die Voraussetzung dafür war, daß der Elektromotor ebenso wie die Dynamo zum Langsamläufer entwickelt wurde. Das bedeutete notgedrungenerweise eine Vergrößerung der Abmessungen und Gewichte und dementsprechend auch eine Verteuerung. Dafür sind aber die Vorteile des direkten Antriebes und die Energieersparnisse so beträchtlich, daß die Mehrkosten dadurch schnell wettgemacht werden. Man kann wohl ohne Übertreibung behaupten, daß der elektromotorische Antrieb irgendwelcher Maschinen und Apparate heute in 99% aller Fälle das technisch und wirtschaftlich Vollkommenste ist.




845. Erweiterung des Meßbereiches eines Amperemeters durch Hinzuschaltung eines Nebenschlußwiderstandes



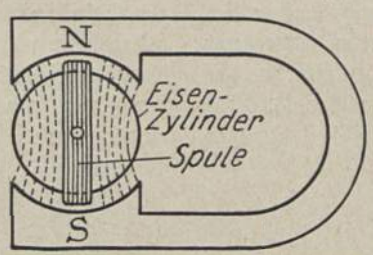

846. Erweiterung des Meßbereiches eines Voltmeters durch Hinzuschaltung eines Vorschaltwiderstandes

*

Als im Laufe des vergangenen Jahrhunderts aus der physikalischen Disziplin der Elektrizitätslehre die Elektrotechnik entstand, übernahm sie von dieser das Bedürfnis nach fortgesetzten und möglichst genauen Messungen der verschiedenen elektrischen Größen. Insbesondere sind es die Stärke und die Spannung des elektrischen Stromes, das Produkt beider, die Leistung und schließlich das Produkt der Leistung mit der Zeit, d. h. die elektrische Arbeit, deren Messung in der Praxis interessieren. Letzten Endes lebt ja die ganze gewaltige Starkstromindustrie von den Geldern, die aus dem Verkauf der elektrischen Energie an das große Publikum einkommen, und diese Summen, die allein in Europa hoch in die Milliarden gehen, werden nach den Angaben registrierender Meßinstrumente, der Elektrizitätszähler, erhoben und verrechnet. Abgesehen von allen technischen Notwendigkeiten wäre also auch die ganze wirtschaftliche Struktur der Elektrotechnik ohne genaue Meßinstrumente nicht denkbar.

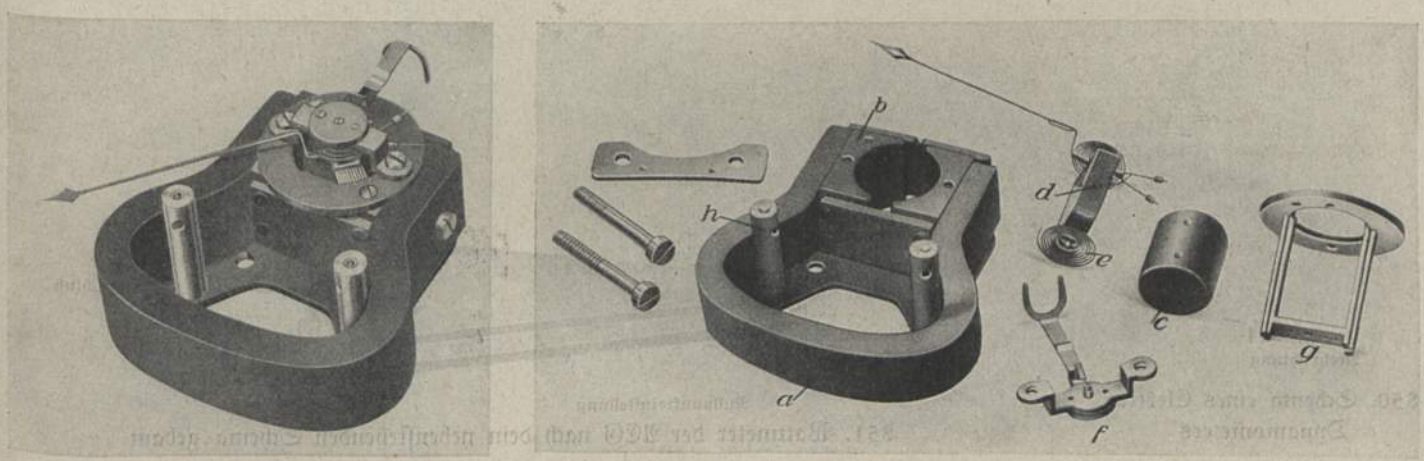
Zur Messung des elektrischen Stromes werden seine mannigfachen Wirkungen benutzt, und danach ergeben sich die verschiedenen Arten der Meßinstrumente. In der Hauptsache kann man vier Gruppen unterscheiden, nämlich elektrolytische, elektromagnetische, elektrodynamische und auf Wärmewirkungen beruhende Instrumente.

Die erste Gruppe der elektrolytischen Meßinstrumente kommt nur für Gleichstrom in Betracht und wird heut für praktische Zwecke nicht mehr verwendet. Bekanntlich ist die Menge eines Metalls, die ein Strom bei seinem Durchgange durch eine Metallsalzlösung




847. Schema eines Drehspulinstrumentes

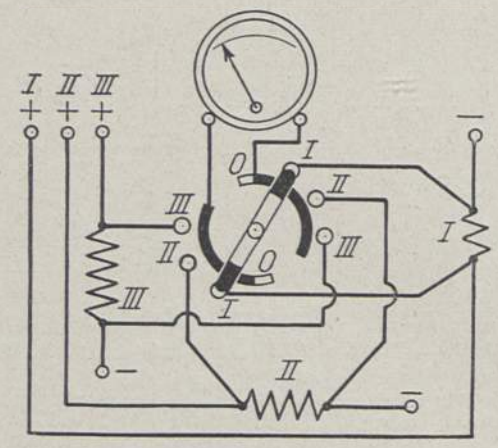
Die stromdurchflossene Spule ist in dem homogenen Kraftfeld eines permanenten Magneten drehbar gelagert




848. Tragbares Drehspulmeßwerk von Siemens & Halske und seine Einzelteile

a Dauermagnet, b Polschuhe aus Flußeisen, c innerer Eisenkern aus Flußeisen, d Drehspule mit Zeiger, e Federn für die Stromzuführung, f Lagerblock mit Steinschraube und Rücker, g Zentrierkörper, h Skalenträger

in der Zeiteinheit von der einen in dieser Lösung stehenden Elektrode gleichen Metalls auflöst und an der anderen niederschlägt, der Stärke des Stromes proportional. Diese Erscheinung benutzte Edison vor 45 Jahren, als es sich für ihn darum handelte, die unwirtschaftlichen Pauschaltarife seiner ersten New-Yorker Zentrale aufzugeben und sich die wirklich gelieferten Amperestunden bezahlen zu lassen. In der Hauptsache bestand sein Zähler aus einem Wagebalken, an dem voneinander isoliert zwei Metallplatten oder Metallzylinder befestigt waren, die in eine Salzlösung des gleichen Metalls eintauchten. Der Strom trat durch den einen Zylinder in die Lösung und durch den anderen wieder aus dieser heraus. Eine Feder war mit einer bestimmten Kraft bestrebt, den Wagebalken in seiner horizontalen Lage zu halten. Während nun aber der Strom floß, verlor der eine Zylinder an Gewicht, während der andere durch das auf ihn niedergeschlagene Metall immer schwerer wurde, und es kam schließlich der Augenblick, in dem der Wagebalken trotz der Gegenwirkung der Feder eine bestimmte Schräglage erreichte. In dieser Stellung bewirkte er dann eine Stromumschaltung, so daß der Strom jetzt das Metall des schwereren Zylinders auflöste und es auf dem leichteren niederschlug. So ging das Spiel weiter, während ein Zählwerk die Zahl der Balkenbewegungen registrierte. Da jedes einmalige Überkippen einer bestimmten Menge von Amperestunden entsprach, ließen sich nach den Angaben des Zählwerks die Stromrechnungen ausschreiben. So schön aber auch dieser erste Edisonzähler in der Theorie war, so wenig bewährte er sich in der Praxis. Das Metall schlug sich unregelmäßig nieder, fiel zum Teil mit dem Elektrodenschlamm zu Boden, und die Konstruktion wurde aufgegeben, sobald man etwas Besseres hatte. Immerhin ist sie doch mehrere Jahre in Gebrauch gewesen.

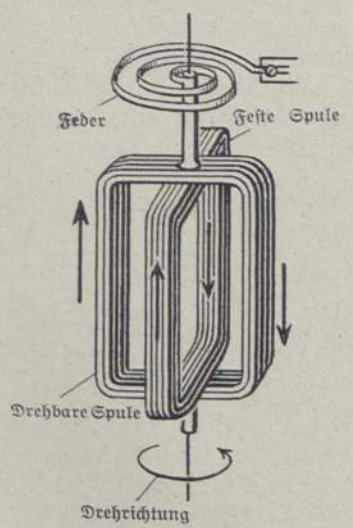



849. Schaltungsschema eines Amperemeters für drei Meßbereiche

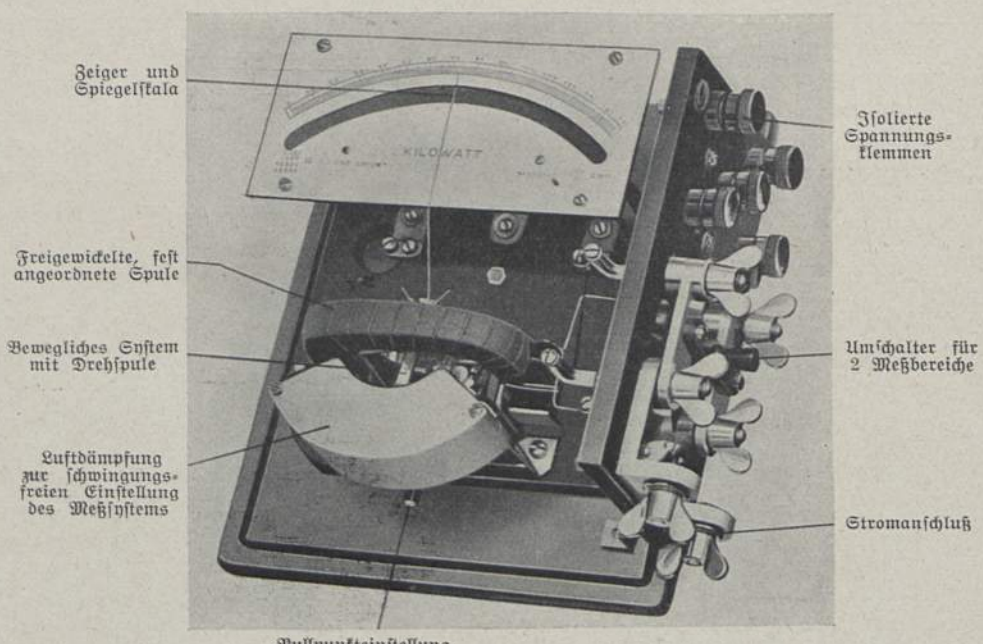
Durch die Betätigung eines Drehschalters können der Reihe nach die Nebenschlußwiderstände I, II und III parallel zu dem Instrument geschaltet werden und ergeben drei verschiedene Meßbereiche

Die zweite Gruppe der elektromagnetischen Meßinstrumente läßt sich wiederum in drei Gruppen unterteilen. Die erstere benutzt die Anziehungskraft zwischen einer stromdurchflossenen Spule und einem Weicheisenkern, die zweite die ablenkende Wirkung einer feststehenden stromdurchflossenen Spule auf einen beweglichen Stahlmagneten und die dritte die gleiche Wirkung eines feststehenden magnetischen Feldes auf eine stromdurchflossene Spule. Die beiden letztgenannten Gruppen sind nur für Gleichstrom verwendbar, die erstere für alle Stromarten.

In der im Bild 839 gegebenen Darstellung bedeutet F eine Spiralfeder, an welcher der aus Weicheisenblech gefertigte Zylinder E aufgehängt ist. S ist eine feststehende, von dem zu messenden Strom durchflossene Spule. Unter der Stromwirkung wird der Eisenzylinder in die Spule hineingezogen, egal, in welcher Richtung der Strom sie durchfließt. Die Verschiebung, welche der Zylinder dabei erfährt, läßt sich an der rechts angedeuteten Skala ablesen, über welche ein an dem Zylinder befestigter Zeiger Z hinstreicht. Noch vor 35 Jahren wurden Meßinstrumente genau nach dieser Anordnung ausgeführt und stellten sich äußerlich als in senkrechter Richtung an der Schalttafel montierte Metallzylinder dar, die an der Vorderseite hinter einem länglichen Glasfenster eine Skala und einen darüber spielenden Zeiger hatten. Gegenwärtig gibt man auch diesen Instrumenten die allgemein gebräuchliche Dosenform mit einem runden Skalenblatt. Dabei ist an Stelle des Weicheisen-




850. Schema eines Elektro-Dynamometers

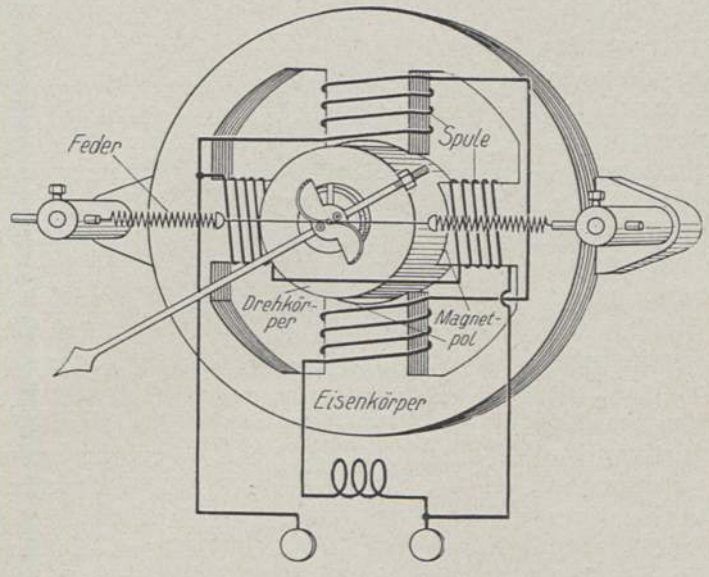



851. Wattmeter der AEG nach dem nebenstehenden Schema gebaut

Die innere Spule ist fest, die äußere drehbar angeordnet. Läßt man beide Spulen hintereinander von dem Hauptstrom durchfließen, ergibt sich ein Amperemeter. Schaltet man sie hintereinander an die Spannung, ergibt sich ein Voltmeter. Legt man die eine Spule in den Hauptstrom, die andere an die Netzspannung, bekommt man ein Wattmeter. Das Instrument ist in gleicher Weise für Wechselstrom und Gleichstrom verwendbar. Es berücksichtigt automatisch die Phasenverschiebung

zylinders eine um einen Punkt am Umfang drehbar gelagerte Weicheisenscheibe (b in Bild 840 rechts) getreten, die in eine seitlich angeordnete Spule eintaucht.

In neuerer Zeit hat man diese Art von Meßinstrumenten weiter vervollkommnet, indem man nicht die anziehende Wirkung zwischen Spule und Eisenkern, sondern die abstoßende Kraft zweier im Inneren der Spule befindlichen Weicheisenkörper benutzt, von denen der eine feststeht und der andere beweglich ist (Bild 841 und 842).



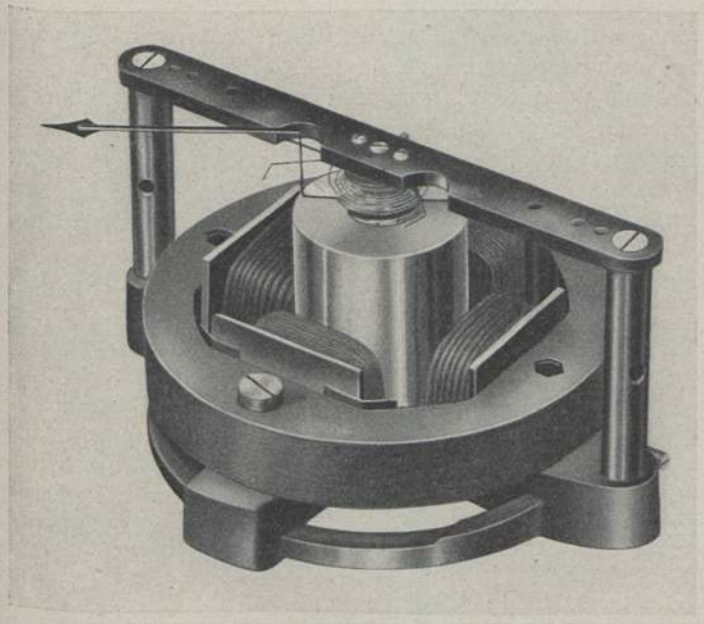

852. Schema eines Drehfeld-Meßinstrumentes

Ferraris-Instrument für Wechselstromspannung. Der Strom durchfließt zwei gegenüberstehende Spulen unmittelbar, die beiden dazu rechtwinkligen Spulen, nachdem er durch einen induktiven Vorschaltwiderstand eine Phasenverschiebung bekommen hat. So entsteht ein elektromagnetisches Drehfeld. Vgl. Bild 676

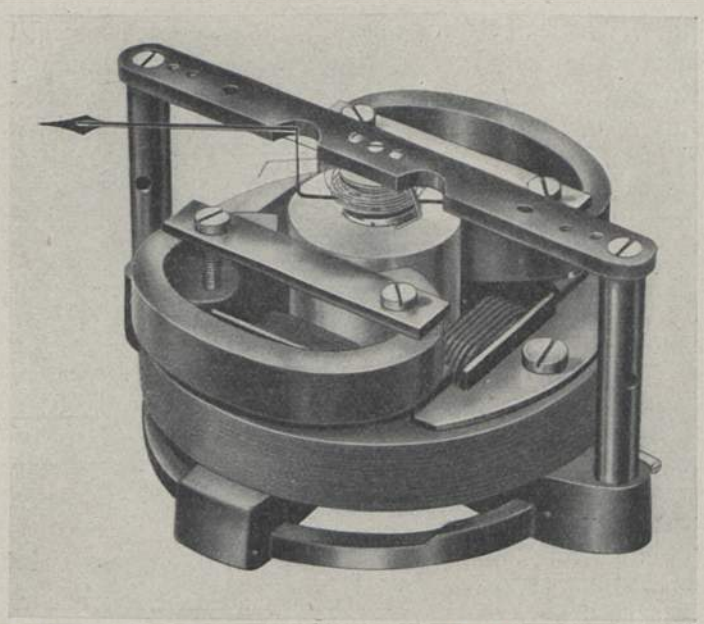
Die in diesen Weicheiseninstrumenten auftretenden Wirkungen sind ebenso wie bei den im folgenden zu beschreibenden Instrumenten unmittelbare Wirkungen der Stromstärke. Alle diese Apparate sind daher ihrem Wesen nach Strommesser. Nun kann aber jeder Strommesser auch ohne weiteres als Spannungsmesser dienen, sofern man nur genau den elektrischen Widerstand seiner stromdurchflossenen Wicklung kennt. Gesetzt der Fall, das Instrument habe einen eigenen Widerstand von R Ohm (siehe Seite 472) und wird mit seinen beiden Klemmen an zwei Leitungen geschaltet, zwischen denen eine elektrische Spannungsdifferenz von E Volt herrscht, dann muß ja nach dem Ohmschen Gesetz ein Strom J durch das Instrument fließen, der gleich E dividiert durch R ist. Der Widerstand des Instrumentes ist unveränderlich, und so werden verschiedenen Spannungen proportionale Stromstärken entsprechen.

Nach dem bisher Gesagten ergeben sich die in Bild 843 und 844 dargestellten Schaltungen. Der Strommesser, das Amperemeter, liegt im Hauptstromkreise in einer der beiden Zuleitungen. Es ist mit den gesamten Stromverbrauchern in Reihe geschaltet. Der Spannungsmesser, das Voltmeter, liegt dagegen im Nebenschluß zu diesen. Seine beiden Klemmen sind mit den beiden Leitungen verbunden. Den inneren Widerstand des Strommessers wird man stets so gering wie möglich machen. Er beträgt nur Bruchteile eines Ohms. Im Gegensatz dazu muß der Widerstand des Spannungsmessers möglichst hoch sein. Er bewegt sich bei den Apparaten für die gewöhnliche Lichtspannung in Werten von 1000 bis 10 000 Ohm. Begreiflicherweise ist es kaum möglich, diesen ganzen Widerstand in die Spule des Meßinstrumentes selbst zu verlegen, wenn man diese auch schon im Interesse einer hohen Empfindlichkeit aus möglichst vielen dünndrähtigen Windungen aufbaut. Aber es bleibt ja die Möglichkeit, einen Vorschaltwiderstand (V in Bild 844) von beliebiger Größe zu verwenden, denn die in diesem Nebenschluß fließende Stromstärke hängt lediglich von dem gesamten Widerstand des Nebenschlusses ab.

Die ablenkende Kraft einer feststehenden stromdurchflossenen Spule auf eine drehbare Magnetnadel findet heut, abgesehen von Laboratoriumsinstrumenten, in der Praxis nur noch in den einfachen Galvanoskopen der Monteure und Installateure Verwendung. Diese Apparate dienen aber nicht der eigentlichen Strommessung, sondern sollen nur anzeigen, ob überhaupt Strom da ist oder nicht. Um so wichtiger ist die umgekehrte Anordnung, bei der sich eine drehbare Spule in dem starken Felde eines Stahlmagneten befindet. Nach dieser Anordnung werden alle diese Instrumente als Drehspulinstrumente bezeichnet. Bild 847 gibt das Schema eines Drehspulinstrumentes. N und S sind die kreisförmig ausgebohrten Pole eines kräftigen Hufeisenmagneten.



853. Drehfeld eines Drehfeld-Meßwerkes von Siemens & Halske

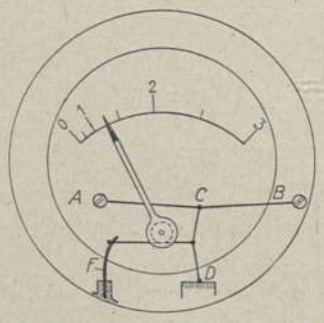


854. Komplettes Drehfeld-Meßwerk mit Zeiger und Dämpfungsmagneten

Zwischen ihnen befindet sich ein Weicheisenzylinder so eingebaut, daß ein durchgehender feiner, ringförmiger Spalt zwischen den Polen und dem Zylinder bleibt. Die Drehspule, gewöhnlich auf ein leichtes Kupferrähmchen aufgewickelt, ist nach Art eines Uhrrades oben und unten mit zwei feinen Stahlzäpfchen in zwei gebohrten Rubinen gelagert. Sie ist also äußerst leicht beweglich. Weiter sind oben und unten an der Spulenachse zwei feine Spiralfedern nach Art der Unruhefedern der Taschenuhren befestigt, deren freie Enden mit dem feststehenden Teil des Instrumentes verbunden sind. Diese Federn dienen einmal der Strom-Zu- und -Ableitung. Ferner leisten sie einem Ausschlag der Spule mit einer der Verdrehung proportionalen Kraft Widerstand und halten sie in stromlosem Zustande in einer Nullstellung fest (Bild 848).

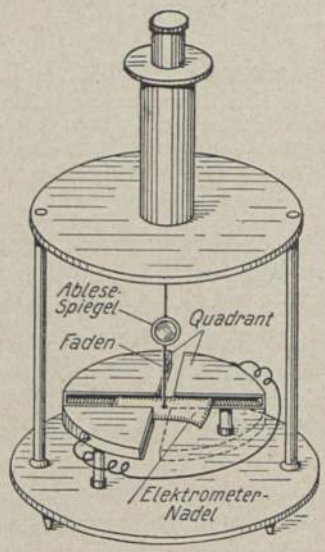
Wie aus der Beschreibung hervorgeht, sind die Drehspulinstrumente recht zarte Gebilde, deren einzelne Teile vielfach direkt aus der Uhrmacherei übernommen wurden. Auch ihre Stromempfindlichkeit ist sehr bedeutend. Man hat für Laboratoriumszwecke Drehspulinstrumente, die schon bei einem Strom von einem millionstel Ampere den Zeiger über die ganze Skala spielen lassen. Trotzdem aber ist es möglich, mit diesen scheinbar so zarten Apparaten auch die großen Ströme und Spannungen der Starkstromtechnik zu messen, und in der Praxis wird in weitestem Maße Gebrauch davon gemacht. Die Mittel, mit denen es erreicht wird, gehen aus den in Bild 845 und 846 gegebenen Schaltskizzen hervor.

Das Instrument selbst mag beispielsweise einen Widerstand von 10 Ohm besitzen und über die ganze 150teilige Skala bei einer Stromstärke von einem hundertstel Ampere ausschlagen. Will man es nun als Spannungsmesser für Spannungen bis zu 220 Volt verwenden, so muß ihm ein Widerstand (Bild 849) von solcher Größe vorgeschaltet werden, daß diese Spannung höchstens einen Strom von einem hundertstel Ampere durch die Spule hindurchtreiben kann. Eine einfache Rechnung auf Grund des Ohmschen Gesetzes ergibt die Größe dieses Vorschaltwiderstandes zu 21 990 Ohm. Von Wichtigkeit ist es, daß dieser Widerstand unbedingt konstant ist und sich auch bei verschiedenen Temperaturen nicht ändert. Er muß daher aus einer der heut in der Elektrotechnik gebräuchlichen Legierungen hergestellt werden, die ihren spezifischen Widerstand innerhalb beträchtlicher Temperaturgrenzen unverändert bewahren. Soll das gleiche Instrument zur Messung größerer Stromstärken dienen, so wird ihm ein Widerstand (Bild 849) parallel geschaltet. Es tritt dann das von Lenz entdeckte Gesetz der Stromverzweigung in Kraft, demzufolge die in den einzelnen Zweigen fließenden Ströme sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweige verhalten. Dabei wählt man die dem Strommesser parallel zu schaltenden Widerstände gewöhnlich so, daß der Meßbereich des Instrumentes dadurch verzehnfacht, verhundertfacht usw. nach Potenzen von 10 vergrößert wird. Schaltet man beispielsweise das Instrument, das selbst einen Widerstand von 10 Ohm besitzt, einem Widerstand von $^{10}/_{9}$ Ohm parallel, so wird sein Meßbereich verzehnfacht. Jeder Skalenteil bedeutet jetzt das Zehnfache der bisherigen Stromstärke.




855. Schema eines Hitzdrahtinstrumentes

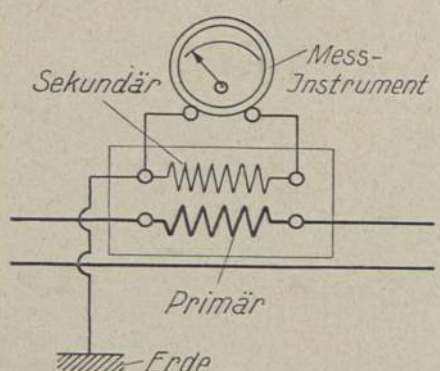
Der von dem Strom durchflossene Hitzdraht AB erfährt eine dem Quadrat der Stromstärke proportionale Erwärmung und Verlängerung



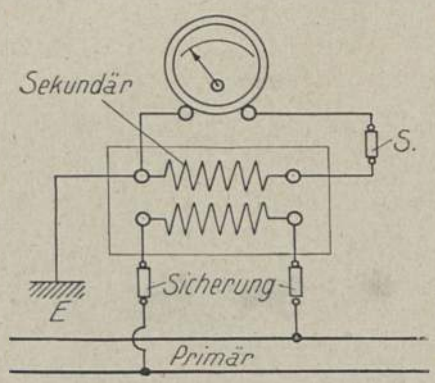

856. Schema eines Quadrantelektrometers

Die nächste Gruppe der Meßinstrumente benutzt die elektrodynamischen Wirkungen, welche zwei von dem gleichen Strom durchflossene Spulen aufeinander ausüben. Ordnet man (Bild 850) die eine Spule fest an und versieht die andere drehbare wieder mit einer Spiralfeder, wie es schon bei den Drehspulinstrumenten geschah, so gibt die Verdrehung der beweglichen Spule jetzt ein Maß für den sie durchfließenden Strom (Bild 851). Eine Umkehrung der Stromrichtung betrifft dabei beide Spulen gleichmäßig, so daß die Drehung nach wie vor in dem gleichen Sinne erfolgt. Die Elektro-Dynamometer sind daher in gleicher Weise für alle Stromarten geeignet. Insbesondere sind sie die zuverlässigsten und genauesten Instrumente für Wechselstrommessungen und werden für diesen Zweck sowohl als Laboratoriums- wie als Schalttafelinstrumente ausgeführt.

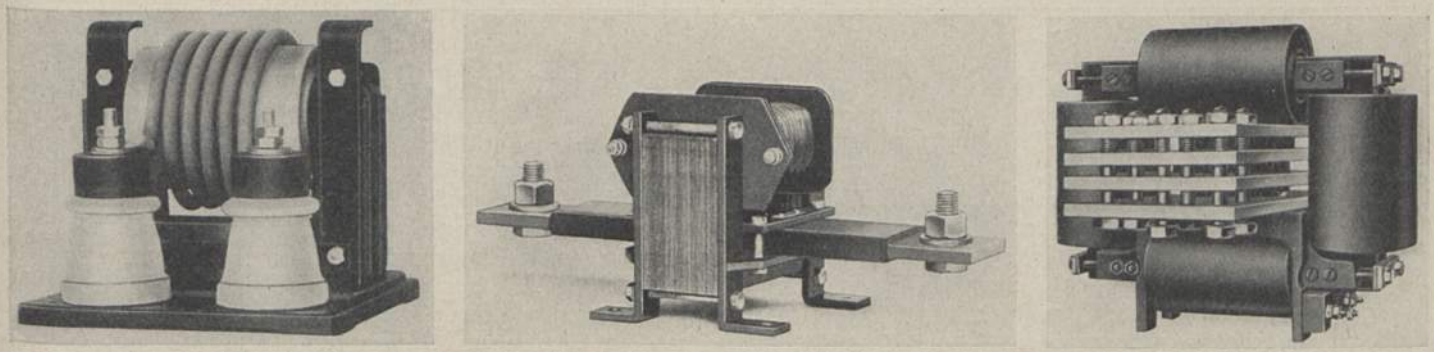
Bei der Besprechung des Drehstrommotors (Seite 394 f.) wurde bereits gezeigt, wie man mit Hilfe von in der Stromphase gegeneinander versetzten Wechselströmen ein magnetisches Drehfeld erzeugen kann. Nach dem gleichen Prinzip arbeitet eine andere Gruppe von Meßinstrumenten, die man dem italienischen Physiker Ferraris zu Ehren gewöhnlich als Ferraris-Instrumente bezeichnet. Auf Seite 390 f. wurde gezeigt, daß man die Stromphase eines Wechselstromes gegen seine Spannung verschieben kann, wenn man eine Drosselspule in den Stromkreis einschaltet. Verzweigt man nun die Leitung eines einfachen einphasigen Wechselstromes und legt in den einen Zweig einen einfachen Ohmschen Widerstand, in den anderen Zweig einen induktiven Widerstand (Drosselspule), so werden die in den beiden Zweigen fließenden Ströme in der Phase gegeneinander verschoben sein, und wenn man sie in der im Bild 852 gezeigten Weise um die Polstücke eines lamellierten Eisenkörpers herumführt, wird zwischen den Polen ein




857. Verbindung eines Amperemeters mit einer Hochstromleitung unter Zwischenschaltung eines geerdeten Stromwandlers



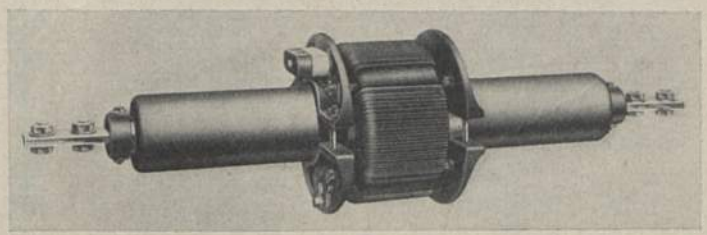

858. Verbindung eines Voltmeters mit einer Hochspannungsleitung unter Zwischenschaltung eines geerdeten Spannungswandlers



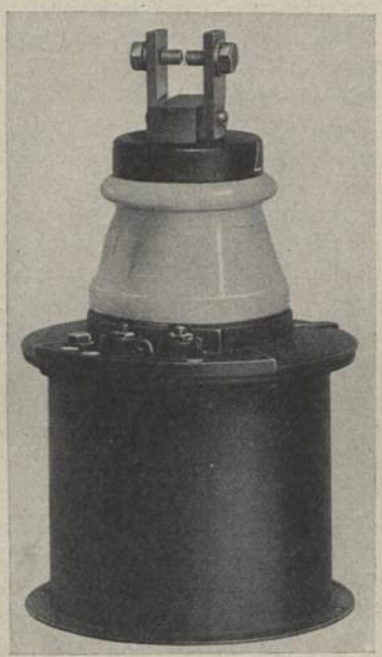
859. Stromwandler der AEG für Ströme bis zu 750 (links), 3000 (Mitte) und 15 000 Ampere (rechts)
Links: Die Hochstromleitung ist in fünf Windungen um das Transformatoreisen herumgeführt. Mitte: Die Hochstromschiene geht geradlinig durch den Stromwandler hindurch. Der Apparat stellt also einen Transformator dar, dessen Primärwicklung nur aus einer halben Windung besteht. Rechts: Vierspulenstromwandler

magnetisches Drehfeld entstehen. Ein in diesem Felde frei drehbar untergebrachter Eisenkörper würde sich ständig drehen, wobei die Geschwindigkeit der Drehung von der Stärke der durch die Spulen fließenden Ströme abhängig ist. Läßt man die Zahl der Drehungen durch ein Zählwerk registrieren, so würden dessen Angaben also einen Maßstab für die im Laufe der Zeit durch die Spulen des Instrumentes geflossene Energie abgeben, und in der Tat beruht eine große Gruppe der Elektrizitätszähler auf diesem Ferraris-Prinzip. Man kann aber die ständige Drehung des beweglichen Körpers verhindern, indem man ihn wieder durch eine Spiralfeder festhält. Er wird dann unter der Kraft des Drehfeldes nur so weit ausschlagen, bis die Gegenkraft der dabei gespannten Spiralfeder der Feldkraft das Gleichgewicht hält. Auf diese Weise entstehen die Ferraris-Strommesser und Spannungsmesser (Bild 853 und 854).

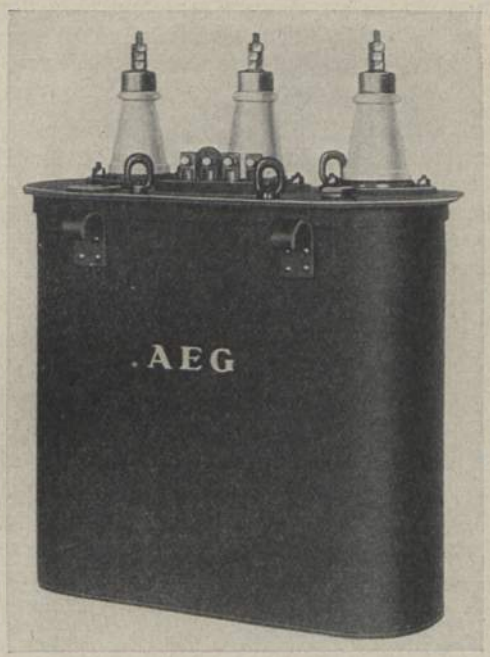
Die letzte große Gruppe der elektrischen Meßinstrumente endlich nutzt die Wärmewirkungen des Stromes aus. Jeder von einem Strom durchflossene Leiter erfährt ja eine Erwärmung, da derjenige Teil der elektrischen Energie, der dabei scheinbar verloren geht, als Wärme auftritt. Es wäre also eine Anordnung denkbar, bei der ein solcher stromdurchflossener Leiter etwa um die Quecksilberkugel eines Thermometers gewickelt und die Skala des Thermometers unmittelbar auf Volt oder Ampere geeicht wäre. Aber genau betrachtet wäre das ein Umweg. Man würde dabei die in dem Metall des Drahtes auftretende Stromwärme erst einem anderen Metall, nämlich dem Quecksilber des Thermometers, zuführen und dann aus der Ausdehnung, die das Quecksilber durch die Wärme erfährt, auf die Stromstärke schließen. Einfacher ist es, unmittelbar diejenige Verlängerung zum Maßstab zu nehmen, die der stromdurchflossene Draht selbst infolge der Erwärmung erfährt, und das geschieht denn auch in Hitzdrahtinstrumenten. Freilich ist die Erwärmung nicht allzu beträchtlich und dementsprechend auch die Längenänderung nur sehr gering. Man bedient sich daher der im Bild 855 dargestellten Anordnung, durch welche die Veränderungen der Drahtlänge in einem sehr stark vergrößerten Maßstabe auf den Zeiger des Instruments übertragen werden. Dabei ist AB der vom Strom durchflossene Hitzdraht. In dessen Mitte geht bei C ein anderer sehr feiner Draht ab, der bei D befestigt ist. Von der Mitte dieses Drahtes zweigt wiederum ein dritter Draht ab, der einmal um die Welle des Zeigers geschlungen und dann zu der Feder F geführt ist. Es leuchtet wohl ein, daß bereits eine ganz geringe Verlängerung des Hitzdrahtes eine sehr viel



860. Kurzschlußsicherer Einleiter-Ring-Stromwandler der AEG
Die Hochstromleitung ist geradlinig durch den Eisenkörper hindurchgeführt. Sie wirkt als primäre Transformatorwicklung mit einer halben Windung



861. Stromwandler mit Eisenkasten
Betriebsmäßig werden die Strommeßwandler gekapselt und vielfach mit Isoliermasse vergossen




862. Spannungswandler für eine zu messende Primärspannung bis zu 80 000 Volt
Die ganze Apparatur muß zur sicheren Beherrschung der Hochspannung wie jeder andere Hochspannungstransformator in einen Ölkessel gebettet werden

# Die praktischen elektrischen Maßeinheiten

A **Das Ampere.** Die Maßeinheit der elektrischen Stromstärke hat zu Ehren des französischen Physikers Ampère die Bezeichnung Ampere erhalten. Die Stromstärke eines Ampere wird nach der elektrochemischen Wirkung definiert als die Stärke eines gleichbleibenden Stromes, der in jeder Sekunde 1,118 Milligramm Silber oder in jeder Minute 67,08 Milligramm Silber aus einer Silbersalzlösung niederschlägt. Durch diese gesetzlich festgelegte Definition ist man in der Lage, mit Hilfe eines Voltameters jederzeit die genaue Einheit der Stromstärke zu rekonstruieren. Die vorstehend beschriebene „praktische" Maßeinheit der Stromstärke ist gleich dem zehnten Teil der sogenannten „absoluten" elektromagnetischen Einheit der Stromstärke, die auf Grund elektromagnetischer Wirkungen definiert wird.

Ω **Das Ohm.** Die Maßeinheit des elektrischen Widerstandes wird zu Ehren des deutschen Physikers Ohm das Ohm genannt. Die physikalische Definition des Ohms lautet: Ein Ohm ist jener elektrische Widerstand, der, wenn er von der Einheit der Stromstärke (ein Ampere) durchflossen wird, in jeder Sekunde Stromwärme im Betrage eines Joule entwickelt (ein Joule, die praktische Einheit der Energie, ist gleich 0,102 Meterkilogramm). Die gesetzliche Definition der Widerstandseinheit lautet: Ein Ohm wird dargestellt durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von der Temperatur des schmelzenden Eises, deren Länge 106,3 Zentimeter bei durchweg gleichem Querschnitt von einem Quadratmillimeter, und deren Masse 14,4521 Gramm beträgt.

V **Das Volt.** Die Einheit der elektrischen Spannung oder, besser gesagt, des elektrischen Spannungsunterschiedes zwischen zwei Punkten trägt zu Ehren des italienischen Physikers Volta die Bezeichnung Volt. Das Volt wird definiert als jene Spannung, die durch einen elektrischen Leiter vom Widerstande eines Ohm eine Stromstärke von einem Ampere hindurchtreibt. Für die laboratoriumsmäßige Darstellung der Spannungseinheit werden bestimmte galvanische „Normalelemente" von großer Konstanz benutzt.

**Das Ohmsche Gesetz.** Die drei bisher angeführten elektrischen Größen sind nach dem Ohmschen Gesetz durch die Beziehung verbunden $J = \frac{E}{W}$, das heißt, die Stromstärke in irgendeinem Stromkreis, gemessen in Ampere, ist gleich der auf diesen Kreis wirkenden Spannungsdifferenz oder elektromotorischen Kraft, gemessen in Volt, dividiert durch den elektrischen Widerstand des Stromkreises, gemessen in Ohm.

C **Das Coulomb.** Die Einheit der Elektrizitätsmenge trägt dem französischen Physiker Coulomb zu Ehren den Namen Coulomb. Das Coulomb ist jene Elektrizitätsmenge, die in einer Sekunde durch den Querschnitt eines Stromleiters geht, in dem ein Strom von der Stärke von einem Ampere fließt. Aus dieser Definition in Verbindung mit derjenigen des Ampere folgt unmittelbar die andere: Ein Coulomb ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche beim Durchgang durch eine Silbersalzlösung in jeder Sekunde 1,118 Milligramm Silber niederschlägt.

W **Das Watt.** Die Einheit der Leistung heißt zu Ehren des Erfinders der Dampfmaschine das Watt. Ein Watt wird definiert als die Leistung eines Stromes von einem Volt Spannung und einem Ampere Stromstärke. Bei der Definition der Widerstandseinheit wurde mitgeteilt, daß ein solcher Strom, wenn seine Leistung restlos in Wärme umgesetzt wird, in jeder Sekunde ein Joule oder 0,102 Meterkilogramm leistet. Daraus folgt, daß 9,81 Watt einer Leistung von einem Meterkilogramm pro Sekunde entsprechen. Das Fünfundsiebzigfache dieser Leistung, die Pferdestärke, berechnet sich weiter zu 736 Watt. In der Praxis ist das Tausendfache des Watt, das Kilowatt, gebräuchlich, bisweilen auch Großpferd bezeichnet.

kWh **Die Kilowattstunde.** Die Einheit der elektrischen Arbeit ergibt sich, wenn man die Einheit der elektrischen Leistung mit der Zeiteinheit multipliziert. Für Watt und Sekunde kommt man zur Wattsekunde. Das wäre die Arbeit von einem Joule oder 0,102 Meterkilogramm, eine für die Praxis viel zu kleine Maßeinheit. Man nimmt daher als Leistungsgröße das Kilowatt und als Zeitgröße die Stunde und bekommt als praktische elektrische Arbeitseinheit die Kilowattstunde. Sie entspricht einer mechanischen Arbeit von 367 000 Meterkilogramm. In Kilowattstunden wird die von Elektrizitätswerken gelieferte elektrische Arbeit gezählt, verrechnet und bezahlt

H **Das Henry.** Die Einheit der Induktivität heißt dem englischen Physiker Henry zu Ehren das Henry. Ein Henry ist die Induktivität eines Leiters, in dem durch gleichmäßige Aenderung der ihn durchfließenden Stromstärke um ein Ampere in der Sekunde eine elektromotorische Kraft von einem Volt induziert wird.

F **Das Farad.** Die Einheit der elektrischen Kapazität trägt nach dem Namen des englischen Physikers die Bezeichnung Farad. Ein Farad wird definiert als die Kapazität eines Kondensators, der durch die Elektrizitätsmenge von einem Coulomb auf die Spannung von einem Volt geladen wird.

**Das Hertz.** Die Einheit der Periodenzahl eines Wechselstromes pro Sekunde heißt dem deutschen Physiker zu Ehren das Hertz. Der Wechselstrom unserer Lichtzentralen hat 50 Hertz. In Radioanlagen sind Frequenzen von einer Million bis 500 Millionen Hertz gebräuchlich. Für die transatlantische Telegraphie werden 100 000 Hertz, für die Mittelfrequenzkreise von Radioapparaten 1000 bis 2000 Hertz benutzt.

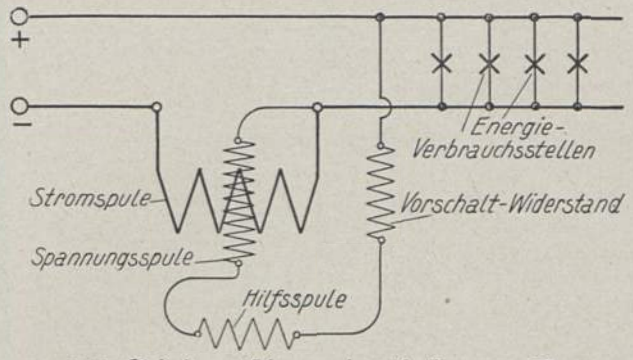
Aus den vorstehend gegebenen elektrischen Maßeinheiten werden für die Zwecke der Praxis durch die Vorsetzung griechischer oder lateinischer Silben größere oder kleinere Einheiten gebildet. Dabei bedeutet:

Kilo (k) das Tausendfache, z. B. 1 Kilowatt (kW) gleich 1000 Watt,
Mega (M) das Millionenfache, z. B. 1 Megohm (MΩ) gleich 1 Million Ohm,
Milli (m) den tausendsten Teil, z. B. 1 Milliampere (mA) gleich 1/1000 Ampere,
Mikro ($\mu$) den millionsten Teil, z. B. 1 Mikrofarad ($\mu$F) gleich 1/Millionstel Farad.

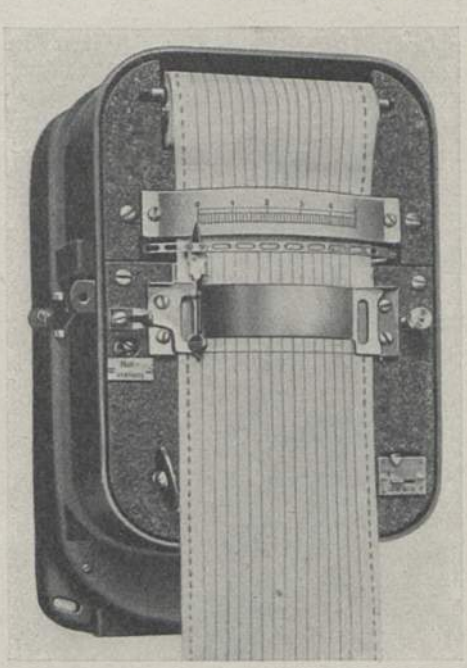
größere Durchbiegung des Drahtes CD zur Folge hat, und die dadurch hervorgerufene Bewegung des nach F gehenden dritten Drahtes kommt schließlich noch einmal etwa hundertfach vergrößert als Zeigerbewegung auf der Skala zum Ausdruck.

Auch die Hitzdrahtinstrumente sind gleich gut für Gleichstrom und Wechselstrom verwendbar und haben eine sehr starke Verbreitung gewonnen. Neben großen und zweifellosen Vorzügen besitzen sie jedoch zwei Nachteile. Die Zeigereinstellung erfolgt nicht wie bei den vorher besprochenen Instrumenten momentan, sondern mit einer gewissen Verzögerung. Man sagt, der Zeiger kriecht. Außerdem wird der Hitzdraht auch durch die unvermeidlichen Temperaturschwankungen seiner Umgebung beeinflußt, und man muß sich vor Beginn einer Messung überzeugen, ob der Zeiger des stromlosen Instrumentes über dem Nullpunkt der Skala steht, und ihn nötigenfalls mittels einer Stellschraube einstellen.

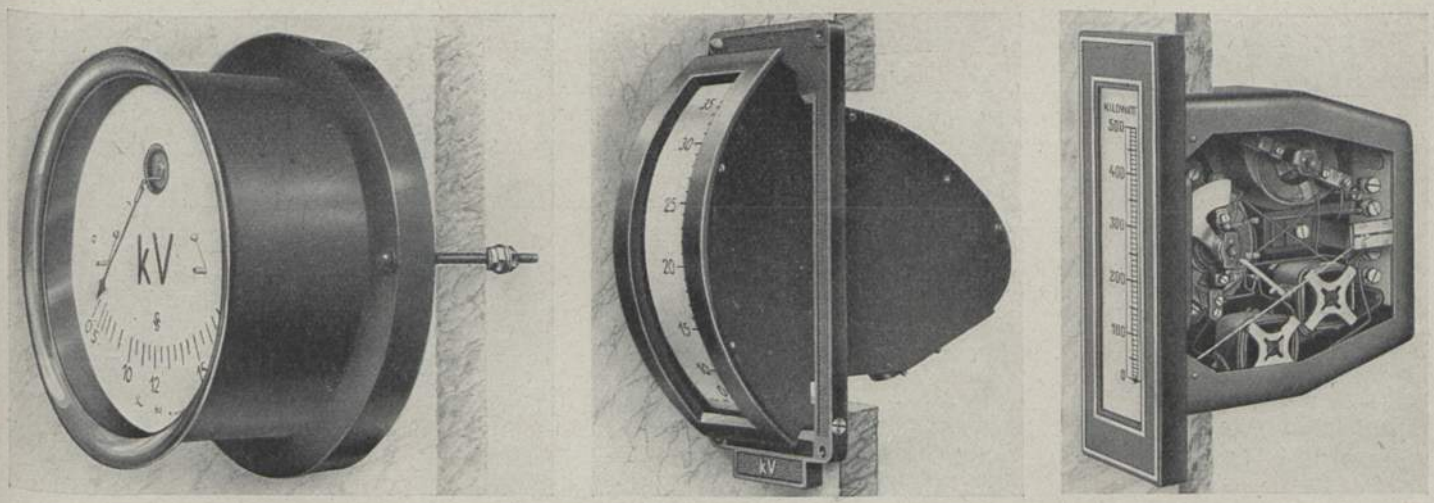
Die bisher besprochenen Instrumente beruhten auf Wirkungen der strömenden Elektrizität. Sie waren tatsächlich nur stromempfindlich, wenn sie auch bei geeigneter Schaltung für die Spannungsmessung benutzt werden konnten. Eine Sonderstellung nehmen dagegen die elektrostatischen Voltmeter ein, die auf der gegenseitigen Abstoßung gleichnamiger und der Anziehung ungleichnamiger Elektrizitätsmengen beruhen. Die nach diesem Prinzip arbeitenden und heute in der Praxis gebräuchlichen sogenannten Multizellular-Voltmeter haben sich aus dem als Laboratoriumsinstrument seit langem bekannten Quadrantelektrometer entwickelt, dessen Schema Bild 856 zeigt. Eine hohle Metalldose ist in vier gleiche Teile, die Quadranten, zerschnitten, und diese sind isoliert voneinander, wie die Abbildung zeigt, aufgebaut. In ihnen schwebt die Elektrometernadel, ein leichtes Aluminiumblech, das an einem versilberten Quarzfaden aufgehängt ist. Je zwei gegenüberliegende Quadranten sind leitend miteinander verbunden und ein Quadrantenpaar außerdem noch mit der Nadel. Im Ruhezustande hängt die Nadel gerade unter einem Schlitz. Legt man nun die beiden Pole einer Hochspannungsquelle an die beiden Quadrantenpaare, so wird die Nadel von dem Paar, mit dem sie die gleiche Ladung besitzt, abgestoßen, von dem anderen Paar angezogen. Die Kraft, mit der das geschieht, ist direkt proportional den auf der Nadel und den Quadranten befindlichen Elektrizitätsmengen und diese wiederum der an das Instrument gelegten Spannung. Eine Vertauschung der Pole ändert die Drehrichtung nicht, da die Nadel ja immer von dem leitend mit ihr verbundenen Quadrantenpaar abgestoßen und von dem anderen angezogen wird. Das elektrostatische Voltmeter ist also für alle Stromarten verwendbar und kommt in den modernen Hochspannungsanlagen bisweilen zur Verwendung. Während die sämtlichen vorher besprochenen Instrumente, solange sie eingeschaltet sind, einen bestimmten Strom und dementsprechend eine gewisse Energiemenge verbrauchen, beansprucht das elektrostatische Voltmeter praktisch keine Energie, eine Eigenschaft,




863. Schaltungsschema eines Leistungsmessers
Es sind zwei Spulen vorhanden. Die eine liegt im Nebenschluß, die andere im Hauptschluß. Die Anordnung berücksichtigt selbständig die Phasenverschiebung und mißt die wirkliche Leistung, d. i. den Wert: J . E . cos φ, in Watt



864. Registrierendes Meßinstrument der AEG
Der Instrumentenzeiger ist mit einer Schreibfeder versehen, die auf dem gleichmäßig laufenden Papierstreifen fortlaufend die gemessenen Werte notiert



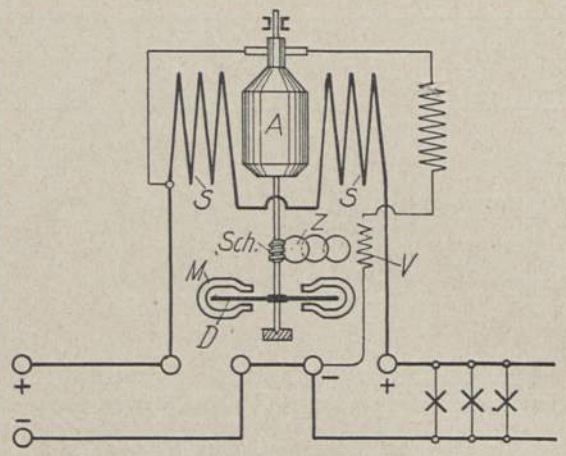

865. Die Entwicklung der Schalttafelinstrumente
Links: Älteste Form. Dosenförmiges Instrument auf der Schalttafelfläche montiert. Mitte: Neuere Form. Eine segmentförmige Skala tritt aus der Schalttafelfläche heraus. Der größte Teil des Instrumentes ist versenkt. Rechts: Neueste Form. Das ganze Instrument ist versenkt montiert, die geradlinige Skala liegt in der Schalttafelebene. Die drehende Bewegung des messenden Instrumententeils ist in eine geradlinige verwandelt

die bei manchen Messungen recht wertvoll ist.

Auf Seite 467 wurde gezeigt, wie man den Meßbereich der Strom- und Spannungsmesser durch geeignete Schaltungen erweitern kann. Theoretisch gibt es für dies Verfahren zwar keine Grenze, aber in den großen Wechselstromwerken unserer Zeit zieht man aus Gründen der Praxis eine andere Methode vor. Man bedient sich der sogenannten Meßwandler, um die zu messenden Ströme und Spannungen auf solche Größen hinunterzutransformieren, daß sie mit den gebräuchlichen Meßinstrumenten ohne Schwierigkeiten gemessen werden können. Die Meßwandler sind in der Tat Transformatoren mit einer primären und einer sekundären Wicklung auf einem gemeinschaftlichen Körper aus lamelliertem Eisen. Von den bisher besprochenen Transformatoren unterscheiden sie sich durch ihre äußerst geringe Leistung. Beträgt der Verbrauch des anzuschließenden Instrumentes doch nur etwa ein Watt, während sogar die Klingeltransformatoren ein Mehrfaches dieser Leistung hergeben müssen. Dafür wird andererseits ein genau gleichbleibendes Übersetzungsverhältnis zwischen den elektrischen Größen in der Primär- und Sekundärspule verlangt, da die Messung wenig Wert hätte, wenn ein unkontrollierbar schwankendes Übersetzungsverhältnis des Meßwandlers in das Meßergebnis hineinkäme.

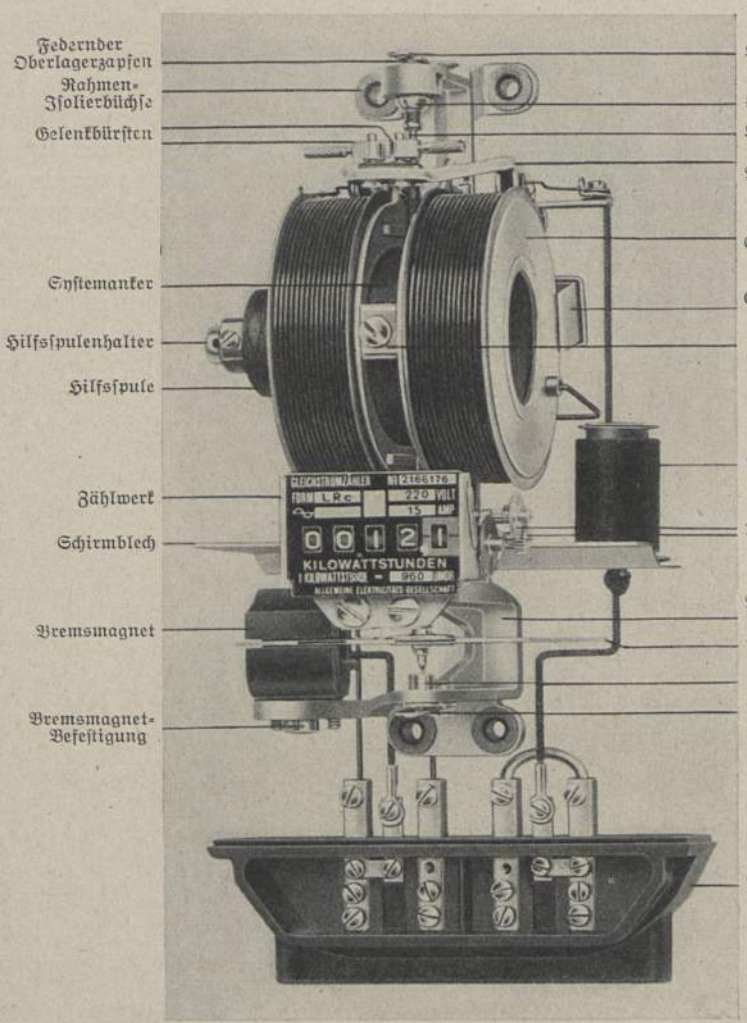
Man unterscheidet Stromwandler und Spannungswandler. Bei den Erstgenannten liegt die Primärspule in der Leitung, die den zu messenden Hochstrom führt, ist also nach Art eines Amperemeters in diese geschaltet. Die andere, die Sekundärspule, besitzt ein Vielfaches der Windungen der Primärspule. An ihren Enden ist das Meßinstrument nach Art eines Voltmeters angeschaltet. Bild 859 zeigt in der Mitte einen Stromwandler der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft für Primärstromstärken bis zu 3000 Ampere. Hier hat die Primärspule überhaupt nur eine halbe Windung, d. h. die starke, den Hochstrom führende Kupferschiene ist geradlinig durch den Eisenkörper hindurchgeführt. Der eine Schenkel dieses Körpers trägt die Sekundärspule mit zahlreichen Windungen. Rechts davon ist ein Vierspulen-Wandler dargestellt, bei dem das gleiche Prinzip auf vier Sekundärspulen ausgedehnt ist. Diese Stromwandler dienen der Messung von Hochströmen bis zu 15 000 Ampere. Bild 860 zeigt einen kurzschlußsicheren Einleiter-Ring-Stromwandler für Primärströme bis zur Stärke von 4000 Ampere. Hier umgibt der Eisenkörper die durch einen Isolator geführte Hochstromschiene in Gestalt eines kreisförmigen Ringes, der seinerseits die Windungen der Sekundärwicklung trägt. Für geringere Stromstärken auf der Primärseite wird auch die Primärleitung in einigen Windungen um den Eisenkörper gelegt. Bild 859 (links) zeigt einen derartigen Stromwandler für Primärstromstärken bis zu 750 Ampere. Für die Verwendung werden diese Stromwandler in Kästen eingebaut, die danach mit Füllmasse vergossen werden. Bild 861 zeigt einen Stromwandler im Kasten. Der zu messende Hochstrom wird an die beiden schweren Kupferschienen gelegt, die aus dem Isolator senkrecht nach oben treten. Das Meßinstrument wird an die beiden auf dem mittleren Rande sichtbaren Klemmen angeschlossen.

Bei den Stromwandlern wird die Hochstromleitung nur in geringem Maße in Anspruch



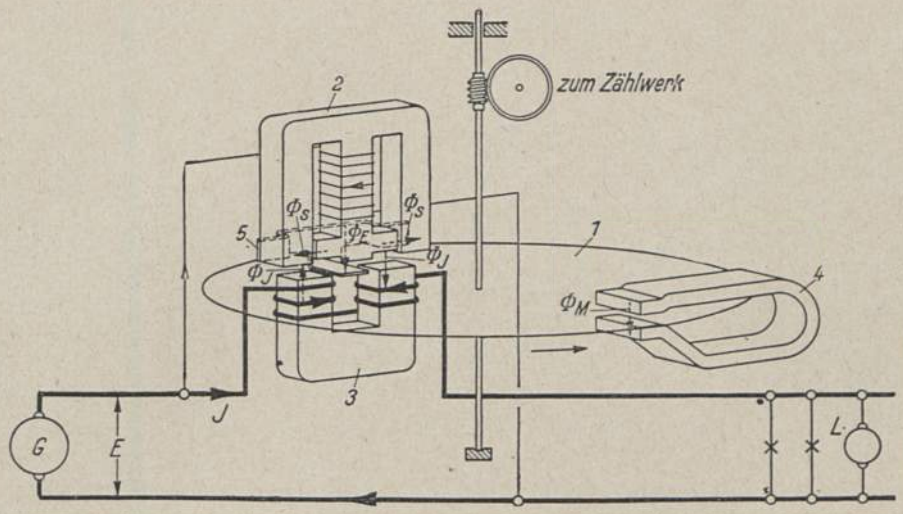

866. Schaltungsschema eines Motorzählers

Die Feldwicklungen S des Zählermotors liegen im Hauptstromkreis, die Ankerwicklungen A unter Verwendung eines Vorschaltwiderstandes V im Nebenschluß. Die Ankerwelle arbeitet mittels eines Schneckenrades Sch auf das Zählwerk Z. Die auf der Zählerwelle sitzende Kupferscheibe D läuft zwischen den Polen der Stahlmagnete M und bewirkt infolge der dabei in ihr auftretenden Wirbelströme eine solche Bremsung, daß der Motorzähler jederzeit die wirkliche Leistung zählt



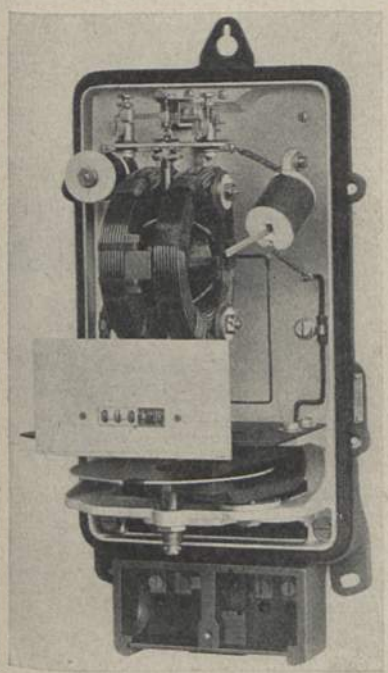

867. Gleichstrommotorzähler der AEG

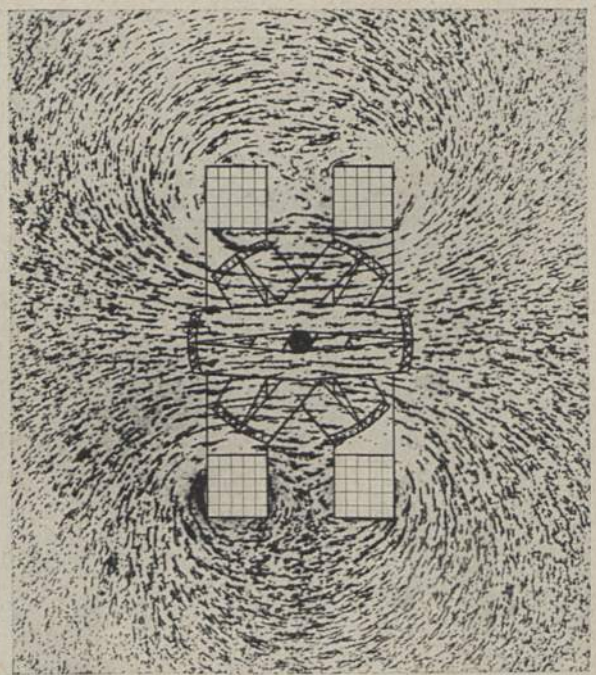
genommen, bei drei der gezeigten Typen sogar nur geradlinig durch den Apparat geführt. Anders ist es bei den Spannungswandlern. Hier muß die Primärspule notgedrungen die volle Spannung zwischen den zu messenden Hochspannungsleitungen aufnehmen. Wenn diese auch aus äußerst feinem Draht bestehen kann, so muß doch größte Sorgfalt auf beste Isolierung der einzelnen Windungen gelegt werden. Werden doch diese Spannungswandler für Spannungen bis zu 110000 Volt ausgeführt. Es darf daher nicht wundernehmen, wenn sie im Gegensatz zu den Stromwandlern recht umfangreich ausfallen, um so mehr, als hier der ganze Apparat in der bekannten Weise in einen Ölkessel eingebaut werden muß. Bild 862 zeigt einen Spannungswandler für Spannungen bis zu 80000 Volt, der sich äußerlich kaum von den Seite 426 ff. besprochenen Gebrauchstransformatoren unterscheidet. Durch diese Meßwandler erreicht man vor allem, daß die gewaltigen Spannungen und Stromstärken der Großkraftwerke mit den gewöhnlichen Schalttafelinstrumenten (Bild 865) gemessen werden können. Außerdem aber braucht man nun die gefährlich hohen Spannungen gar nicht mehr an die Schalttafel zu führen und braucht auch mit den schweren Kupferschienen der Hochstromleitungen keine kostspieligen Umwege dorthin zu machen.

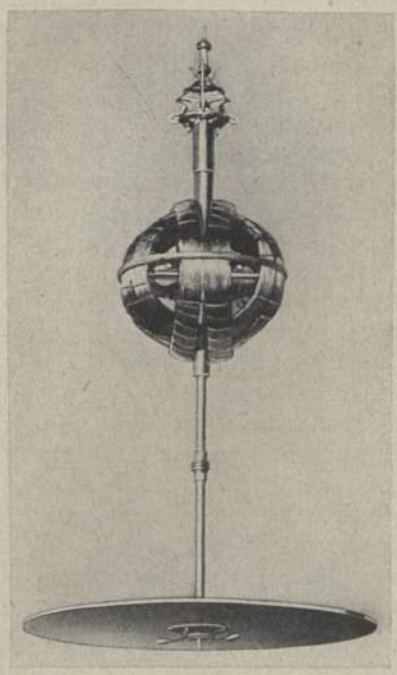



868. Schema eines Einphasen-Wechselstromzählers der Siemens-Schuckertwerke
Der Zähler ist im Prinzip ein kleiner, durch eine Wirbelstrombremse belasteter Induktionsmotor mit scheibenförmigem Kurzschlußanker, auf den die induktiven Wechselflüsse eines Nebenschlußelektromagneten 2 und eines Hauptstrommagneten 3 treibend, der Stahlmagnet 4 bremsend wirken

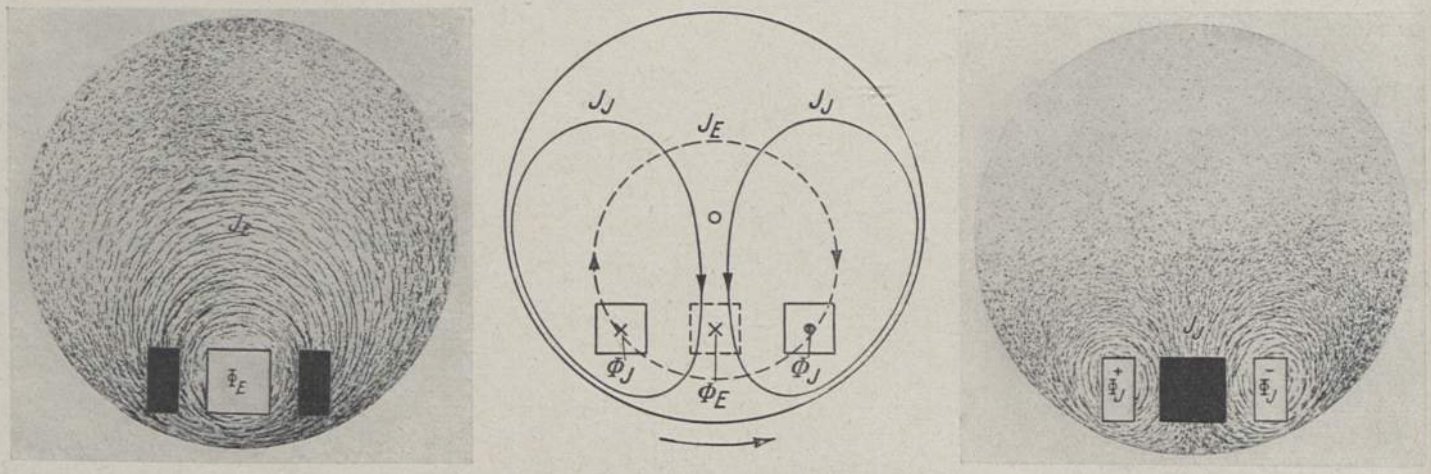
Die Leistung eines elektrischen Stromes in Watt ist gleich seiner Spannung in Volt multipliziert mit seiner Stromstärke in Ampere. Für Wechselstrom kommt, wie auf Seite 392 ausgeführt, noch ein dritter Faktor, der Kosinus der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke, hinzu. Für den Fall, daß der Kosinus $\varphi$ gleich 1 ist, könnte man also die Leistung aus den Angaben eines Strommessers und eines Spannungsmessers ermitteln, indem man die von beiden Instrumenten im gleichen Zeitpunkt angezeigten Werte miteinander multipliziert. Es ist aber auch möglich, mit recht einfachen Mitteln Meßinstrumente herzustellen, welche die Leistung unmittelbar angeben. Grundsätzlich sind alle diejenigen vorstehend besprochenen Meßinstrumente dafür geeignet, bei denen zwei stromdurchflossene Spulen oder zwei durch solche Spulen hervorgerufene Magnetfelder wirken. Die Kraft, mit der beispielsweise die beiden Spulen des Elektro-Dynamometers sich gegenseitig anziehen, ist gleich dem Produkt der in ihnen fließenden Ströme multipliziert mit einer von den Abmessungen des Instrumentes abhängenden Konstante. Werden die beiden Spulen in Hintereinanderschaltung von dem gleichen Strom durchflossen, so ist der Ausschlag also proportional dem Quadrat der Strom-







869. Gleichstrommotorzähler (Wattstundenzähler) von Siemens-Schuckert
Links: Der Zähler. Das Bild läßt erkennen, daß alles Eisen sowohl im Feld wie im Anker vermieden ist. Mitte: Elektromagnetisches Kraftlinienbild. Es ist ein Horizontalschnitt durch die Spulenmitte gelegt. Gut erkennbar ist der fast homogene Kraftlinienfluß im Inneren der Spulen. Rechts: Motorachse mit Anker, Bremsscheibe und Spitzenlagern

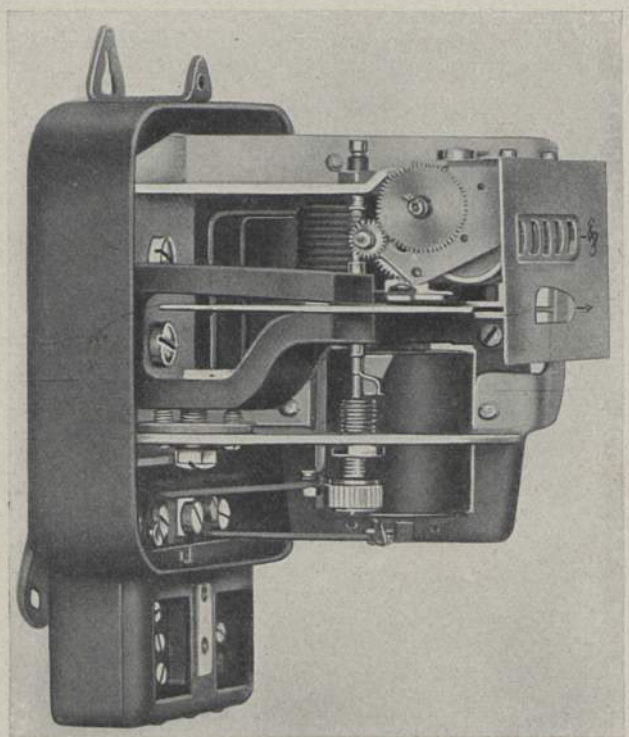



870. Die elektrischen Ströme und Kräfte in der Triebscheibe des Einphasen-Wechselstromzählers
Links und rechts: Verlauf der durch den Wechselstrommagneten 2 und den Elektromagneten 3 induzierten Scheibenströme. Vgl. Bild 868
Mitte: Schema der durch beide Magnete induzierten Ströme

stärke. Aber man kann auch eine andere Schaltung (Bild 863) wählen, bei der die eine Spule aus starkem Draht mit wenigen Windungen nach Art eines Strommessers im Hauptstromkreise liegt, während die andere mit vielen Windungen eines dünnen Drahtes wie ein Spannungsmesser im Nebenschluß liegt. Diese Spule wird dann von einem Strom durchflossen, der der jeweiligen Netzspannung proportional ist, und die Kraft, mit der die beiden Spulen jetzt aufeinander wirken, muß daher dem Produkt aus Stromstärke und Spannung, das heißt der Leistung proportional sein. Dabei berücksichtigt ein derartiger Leistungsmesser vollkommen automatisch eine etwa vorhandene Phasenverschiebung, denn diese bewirkt ja, daß der Strom anders verläuft als die Spannung, und dieser andere im allgemeinen die Leistung verringernde Verlauf macht sich auch als eine verringerte Kraft zwischen der Strom- und Spannungsspule des Wattmeters bemerkbar. Hat man jetzt einen Strommesser, einen Spannungsmesser und einen Wattmesser, so ist man in der Lage, auch den Kosinus $\varphi$ zu ermitteln. Die Multiplikation der gleichzeitigen Angaben des Strom- und Spannungsmessers ergibt das Produkt aus Spannung und Stromstärke. Der Leistungsmesser zeigt das Produkt aus Stromstärke, Spannung und Kosinus $\varphi$. Dividiert man also die Angabe des Leistungszeigers durch das zuerst gewonnene Produkt, so erhält man den Kosinus $\varphi$.

Alle bisher besprochenen Meßinstrumente lassen sich ohne große Schwierigkeiten zu registrierenden Meßinstrumenten ausbauen. Es genügt dazu, daß man an der Zeigerspitze eine feine, mit nicht trocknender Tinte oder Tusche gefüllte Feder ansetzt und ein Uhrwerk anordnet, das unter dieser Feder hindurch einen Papierstreifen mit konstanter Geschwindigkeit fortzieht. Im allgemeinen wird die Anordnung (Bild 864) so getroffen, daß das Papier von einer Rolle abläuft. Die mit Hilfe solcher registrierenden Instrumente erhaltenen Strom-, Spannungs- und Leistungskurven sind für die Betriebsleitungen der Elektrizitätswerke nicht unwichtig, und es dürfte heut kaum noch ein Werk geben, dessen Schalttafeln nicht auch mit registrierenden Instrumenten ausgerüstet sind.

Es bleibt nun noch die letzte und vielleicht wichtigste Gruppe der elektrischen Meßinstrumente, diejenige der Elektrizitätszähler zu besprechen. Grundsätzlich sind hier drei Möglichkeiten zu unterscheiden. Es kann sich um eine Anlage handeln, bei der, wenn überhaupt eingeschaltet wird, immer die gleiche Anzahl von Lampen oder dergleichen in Betrieb kommt, der Energieverbrauch also ein für allemal konstant ist. In diesem Falle genügt es, die Zeit festzustellen, während der eingeschaltet war. Man verwendet hier die sogenannten Zeitzähler, einfache Uhren mit einer elektrischen Sperrung. Sobald eingeschaltet wird, löst sich die Sperrung, und die Uhr geht. Die von ihr gezeigte Stundenzahl ist das unmittelbare Maß für die gelieferte elektrische Energie. Ferner kann man häufig annehmen, daß die Netzspannung vollkommen konstant bleibt. Unter dieser Voraussetzung genügt es aber, die Amperestunden zu zählen, die ja dann ohne weiteres den Wattstunden proportional sind. Diesem Bedürfnis entspricht der Amperestundenzähler. Er besitzt einen drehbaren Teil, dessen Drehgeschwindigkeit in jedem Augenblick der durch die Stromspule des Zählers fließenden Stromstärke proportional ist. Die Bewegung wird in üblicher Weise auf ein mehrstelliges Zählwerk übertragen. Drittens endlich, und das ist heut am häufigsten der Fall, will man wirklich die Leistung in Watt- oder Kilowattstunden zählen und gelangt damit zum Kilowattstundenzähler. Sein beweglicher Teil muß eine



871. Einphasen-Wechselstrommotorzähler der Siemens-Schuckertwerke
Der Motor ist nach dem in Bild 868 gegebenen Schema gebaut. Das Gehäuse ist abgenommen. Man sieht die laufende Scheibe. Vorn in der Mitte den Bremsmagneten, unter der Scheibe den Spannungsmagneten, über ihr den Strommagneten

Geschwindigkeit besitzen, die in jedem Augenblick dem Produkt aus Spannung und Stromstärke unter Berücksichtigung einer etwaigen Phasenverschiebung proportional ist. Während der Amperestundenzähler mit einer Stromspule auskommt, wird der Kilowattstundenzähler stets Strom- und Spannungsspule nebeneinander besitzen müssen.

Aus der großen Anzahl der mannigfachen in Gebrauch befindlichen Zählerkonstruktionen können hier nur einige wenige herausgegriffen werden. Für die Messung von Gleichstromleistungen benutzt man vorwiegend den Motorzähler, dessen Schema Bild 866 darstellt. Der Zähler ist in der Tat ein Gleichstrommotor, dessen Feldwicklungen S im Hauptstromkreis liegen, also je nach der jeweiligen Verbrauchsstromstärke ein mehr oder minder starkes Magnetfeld erzeugen. Der Anker des Zählers liegt im Nebenschluß an der Netzspannung. Aus Konstruktionsgründen wird ihm ein Vorschaltwiderstand V vorgeschaltet. Der Motor hat ein Drehmoment, das in jedem Augenblick dem Produkt aus Spannung und Stromstärke multipliziert mit einer Apparatkonstante gleich ist. Ein sehr wichtiger Teil dieses Zählers ist die Wirbelstrombremse, eine auf der Zählerachse sitzende Kupferscheibe D, die zwischen den Polen permanenter Stahlmagnete hindurchläuft. Erst durch diese von Thomson in die Zählertechnik eingeführte Einrichtung wird die Bewegung des Zählers derart abgebremst, daß seine Geschwindigkeit wirklich in jedem Augenblick der Leistung gleich ist, und daß er nun auf dem Zählwerk Z, das von der Schnecke Sch angetrieben wird, die Wattstunden zählt.

Bild 869 zeigt links einen nach diesem Prinzip arbeitenden Gleichstromzähler der Siemens-Schuckertwerke mit abgenommenem Gehäuse. In der Mitte ist das Bild des von den Hauptstromspulen erzeugten magnetischen Feldes zu sehen, unter dessen Einfluß der Anker rotiert. Rechts wird die Zählerachse mit dem Anker, der Schnecke für den Antrieb des Zählwerkes und der Bremsscheibe gezeigt. Besonders zu betonen ist, daß bei diesen Zählern sowohl für das Feld wie für den Anker keinerlei Eisen verwendet wird. Man erreicht dadurch eine Dynamometerwirkung, deren Größe unabhängig von allen Eigenschaften des Eisens wirklich genau dem Produkt aus Spannung und Stromstärke entspricht. Bild 867 stellt einen Gleichstrommotorzähler der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft dar, der in der Hauptsache nach gleichen Grundsätzen konstruiert ist.

Für die Messung von Wechselstromleistungen werden die Zähler, wie bereits bei der Besprechung der Ferraris-Meßinstrumente auf Seite 470 f. angedeutet, unter Benutzung eines elektromagnetischen Drehfeldes konstruiert. Bei mehrphasigem Wechselstrom ergibt sich ein solches Drehfeld ohne weiteres (vgl. Seite 394). Bei einphasigem Wechselstrom muß man einen Kunstgriff anwenden und durch Verwendung von Drosselspulen oder ähnlichen die Phasen verschiebenden Mitteln eine Phasenverschiebung von 90 Grad zwischen dem Strom der Hauptschlußspule und demjenigen der Nebenschlußspule erzeugen. Wie das erreicht wird, geht aus der in Bild 868 gegebenen schematischen Darstellung eines Wechselstromzählers der Siemens-Schuckertwerke hervor. In dieser Abbildung ist die sich unter dem Einfluß des Ferraris-Feldes drehende Aluminiumscheibe 1 durchsichtig dargestellt, um alle Teile zeigen zu können. Die Windungen des aus dünnstem Dynamoblech aufgebauten Elektromagneten 2 liegen an der Spannung E des Generators G, die Windungen des Elektromagneten 3 im Hauptstromkreis. Die Triebflüsse, welche diese beiden Magnetsysteme auf die Aluminiumscheibe ausüben, sind in Bild 870 (Mitte) schematisch gezeigt. Aus ihnen resultiert auf die Scheibe ein Drehmoment, das in jedem Augenblick proportional der durch den Zähler gehenden Wechselstromleistung ist. Der permanente Stahlmagnet 4 (Bild 868) wirkt hier ebenso wie bei dem vorstehend besprochenen Gleichstromzähler. Er bewirkt, daß die Geschwindigkeit der Scheibe in jedem Augenblick der Leistung proportional ist. In Bild 870 ist links und rechts der Verlauf der unter dem Einfluß der beiden magnetischen Wechselfelder der beiden Elektromagnetsysteme in der Aluminiumscheibe auftretenden elektrischen Strömungen zu sehen. Es handelt sich hier nicht wie in Bild 869 (Mitte) um magnetische Kraftlinien, sondern um elektrische Stromlinien. Bild 871 zeigt einen Ferraris-Zähler der Siemens-Schuckertwerke mit abgenommenem Gehäuse.

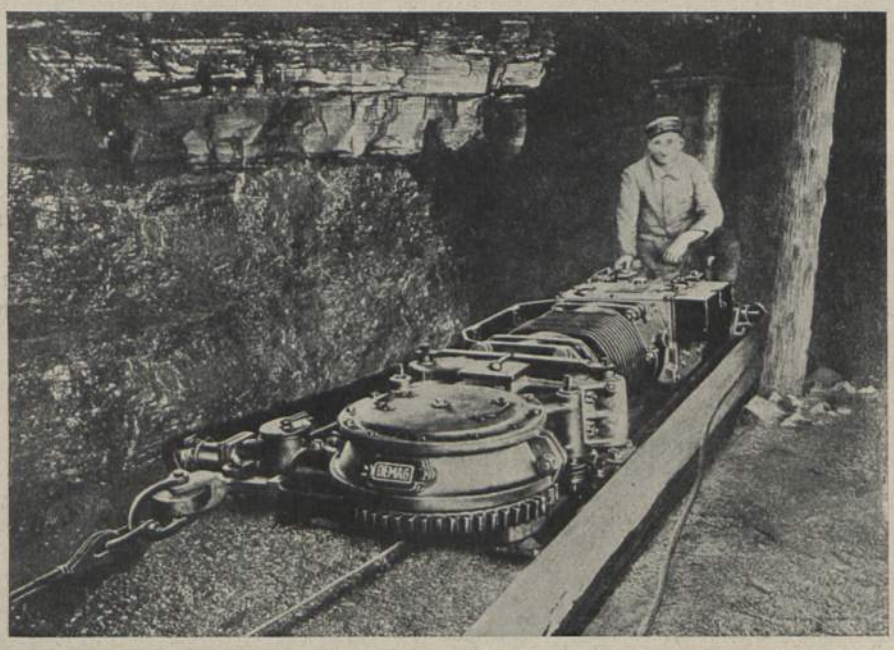
Eine weitere Ausbildung der Elektrizitätszähler erfolgte nach der Richtung, um sie den verschiedenen Tarifen anzupassen. So hat man Doppelzähler, welche die elektrische Leistung zu bestimmten Stunden des Tages, d. h. während der sogenannten Sperrstunden oder teueren Stunden, anders zählen als während der übrigen. Ein Kapitel für sich bilden weiter die Elektrizitätsselbstverkäufer, die für die Elektrizität das gleiche bezwecken wie die Münzgasmesser für das Gas. Nach Einwurf eines Geldstückes in einen Schlitz lassen sie eine bestimmte Wattstundenzahl hindurch und sperren den weiteren Stromfluß, wenn diese Menge verbraucht und nicht frisches Geld nachgeworfen wird.

Die hier kurz besprochenen Messer und Zähler bilden heut einen unentbehrlichen Bestandteil der Elektrotechnik, und viel hängt von ihrem richtigen Funktionieren ab. Jede Technik kann ja nur rationell arbeiten und wirtschaften, wenn sie jederzeit in der Lage ist, sich über die Größe der von ihr beherrschten physikalischen Werte ein genaues Bild zu machen. In klarer Erkenntnis dieser Tatsache stellte auch Werner Siemens schon in den achtziger Jahren dem Deutschen Reich die Mittel zur Errichtung der Physikalisch-technischen Reichsanstalt zur Verfügung, zu deren wichtigsten Arbeitsgebieten auch heut noch die Prüfung elektrischer Meßgeräte gehört.

# 33. Die Anwendungsgebiete des Starkstroms

Vor etwa 40 Jahren zog die Starkstromtechnik in das Bergwerk ein. Vorsichtig zunächst und bescheiden. Elektrisches Licht in der Hauptsache. Bogenlampen strahlten durch die Nacht und beleuchteten die ausgedehnten Zechenhöfe, deren Beleuchtung vordem so ziemlich alles zu wünschen ließ. Die ersten Elektromotoren kamen zur Aufstellung. Über Tage zunächst einmal und dem Antriebe kleinerer und nebensächlicher Arbeitsmaschinen dienend. Vier Jahrzehnte sind seitdem verstrichen, und von Grund auf hat sich das Bild geändert. Verschwunden sind die zahllosen, mit direktem Auspuff ins Freie arbeitenden Dampfmaschinen, die früher das Leben auf dem Zechenhof mehr romantisch als angenehm gestalteten. Eine einzige große Zentrale nur noch, in der mit den besten und modernsten Mitteln, wie Dampfturbinen oder Großgasmaschinen, die Energie erzeugt wird. Im übrigen Elektrizität an allen Stellen über Tage sowohl wie unter Tage, wo Energie gebraucht wird.

Der Bergmann teilt die Arbeiten in der Grube in drei Hauptgruppen ein: die Gewinnung, die Förderung und diejenigen Arbeiten, die der Instandhaltung der Grube dienen. Beginnen wir mit der Gewinnung vor Ort. Die Gewinnung erfolgt in der Hauptsache durch Schießen oder durch Schrämen. Beim Schießen handelt es sich zunächst darum, Bohrlöcher von etwa ein bis zwei Zoll Weite und ein bis zwei Meter Tiefe in das zu gewinnende Gut (Kohle, Erz, Salz) vorzutreiben. In vergangenen Jahrzehnten eine mühevolle Handarbeit. Zwei Mann an einem Stahlbohrer, abwechselnd ihn drehend und mit den Schlägen eines schweren Hammers seinen Kopf treffend. Heut hat die elektrische Gesteinsbohrmaschine den Menschen diese Arbeit abgenommen. Da stehen vor der Wand, die der Bergmann das Ort nennt, die stählernen schweren Stempel fest eingespannt und tragen die elektrischen Bohrmaschinen, denen ein abgerolltes Kabel die elektrische Energie zuführt. Einfache Drehbohrmaschinen für weicheres Gut, wie Kohle und Salz. Stoßbohrmaschinen für das harte Erz, die ihren Bohrmeißel fünfmal in der Sekunde mit dröhnender Gewalt gegen den harten Stein schleudern und nach jedem Schlage ein wenig drehen. Bild 873 zeigt eine Säulendrehbohrmaschine der Siemens-Schuckertwerke in einer Kaligrube. Bei sehr weichem Material ist es nicht einmal notwendig, die Bohrmaschine an einer Spannsäule zu befestigen. Es genügt, sie als einfache Handbohrmaschine auszubilden. In jedem Falle nimmt hier die elektrische Energie dem Bergmann die grobe körperliche Arbeit ab. Er braucht die Maschine lediglich zu steuern, bei den fest eingespannten Maschinen durch die Drehung einer Schraubenspindel dafür zu sorgen, daß der Dreh- oder Stoßbohrer das Gewinnungsgut stets mit einem gewissen Druck bearbeitet.




872. Stangen-Schrämmaschine
Die Maschine wird durch einen Drehstrommotor von 20 Pferdestärken getrieben und schrämt in der Stunde einen Spalt von etwa 30 Quadratmeter Fläche. Demag, Duisburg

Die andere Gewinnungsart durch Schrämen geht in der Weise vor sich, daß man in das Gut, beispielsweise ein Kohlenflöz, einen langen und tiefen, aber schmalen Spalt (den Schram) hineinarbeitet. Dadurch wird dem darüberliegenden Gut die Unterlage entzogen, und häufig genügt schon der vorhandene Gebirgsdruck, um die ganze darüberliegende Kohle zu Bruche gehen zu lassen. Bisweilen ist es noch notwendig, oberhalb des Schlitzes einige schwache Schüsse zu geben. In jedem Falle gewährt die Gewinnung durch Schrämen den Vorteil, daß

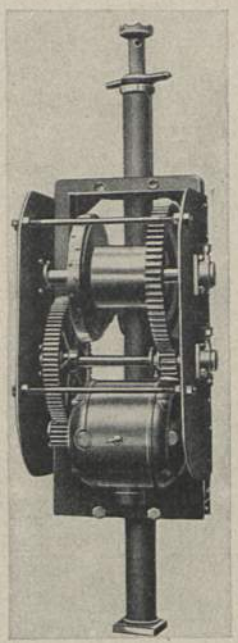
das Gut großstückig gewonnen wird, während es beim Schießen einer starken Zertrümmerung unterliegt. In vergangenen Zeiten war das Ausarbeiten der Schrämspalte von Hand eine äußerst mühevolle Verrichtung, bei welcher der Bergmann in den unbequemsten Stellungen und unter Aufbietung aller körperlichen Kräfte mit Schlägel und Schrämeisen arbeiten mußte. Wie ihm heut die elektrisch betriebene Stangenschrämmaschine das Leben erleichtert, zeigt Bild 872. Er braucht die Maschine nur zu steuern, die, von einem zwanzigpferdigen Drehstrom-Induktionsmotor angetrieben, mit erheblicher Geschwindigkeit eine Schrämspalte von 1,5 Meter Tiefe ausarbeitet und in der Arbeitsstunde etwa 15 bis 20 Kubikmeter Kohle zu Bruche bringt. Unentbehrlich ist die Schrämarbeit auch in Steinbrüchen, wenn es sich darum handelt, das Gut in großen ganzen Blöcken zu gewinnen. Hier arbeitet die elektrische Kurbelstoßbohrmaschine als Schlitz- und Schrämmaschine, indem sie die zu gewinnenden Blöcke aus dem Bergmassiv herausarbeitet.

Es folgt das Laden der Bohrlöcher mit einem der mannigfachen heut im Bergbetriebe gebräuchlichen Sprengstoffe und danach das „Wegtun" der Schüsse, wie der Bergmann die Explosion nennt. Auch die Zündung der Sprengpatronen erfolgt heut meistenteils durch Elektrizität. Die elektrische Zündung, bei der die Sprengkapsel der Ladung zur Explosion gebracht wird und danach weiter die ganze Ladung explodieren läßt, erfolgt entweder durch den elektrischen Funken oder durch einen elektrischen Glühdraht und bietet der älteren Zündung durch Sprengschnur gegenüber den Vorteil größerer Sicherheit. Der Erfolg der Sprengung ist das gewonnene oder geschossene Gut, das nun in Form eines ziemlich regellosen Trümmerhaufens vor Ort liegt. Damit ist die Gewinnung vollendet, und es beginnt die Förderung.

873. Säulendrehbohrmaschine in einer Kaligrube
Ein Drehstrom-Induktionsmotor dreht den Bohrer und besorgt gleichzeitig den Vorschub der Rohrspindel. Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

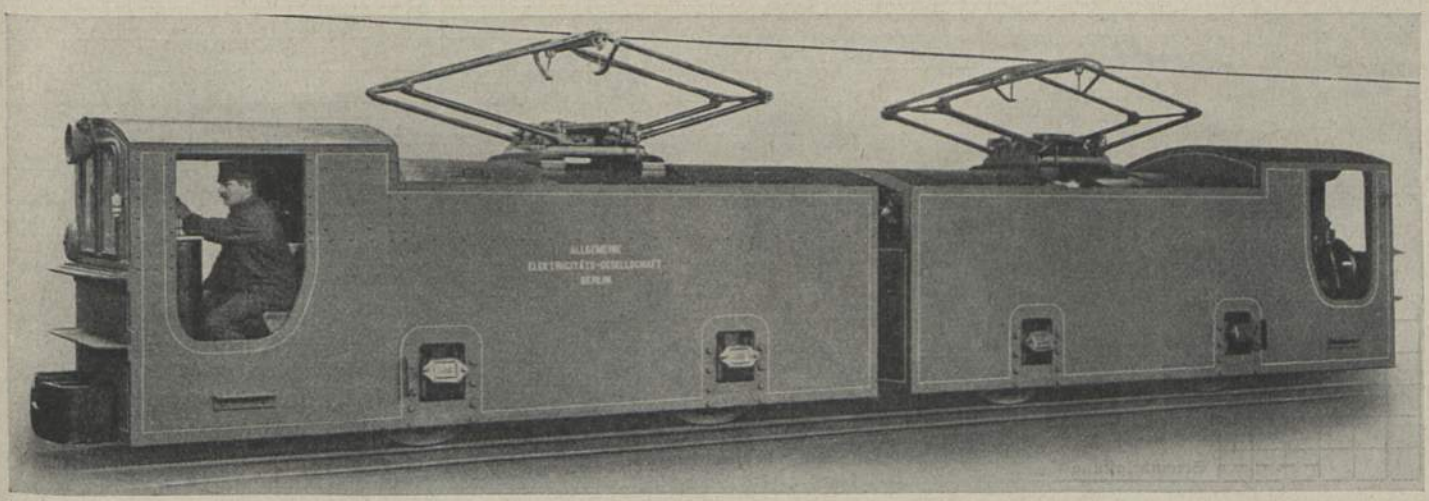
Die Förderung reicht vom Gewinnungsort unter Tag bis über Tag, und zwar bis zum Eisenbahnwagen oder bis zu einer der verschiedenen Verarbeitungsstätten auf der Zeche, wo das gewonnene Gut weiter behandelt wird.

Eine der häufig angewandten Fördereinrichtungen unter Tage ist die Schüttelrutsche, die sofort nach dem Schießen so weit bis an den Gewinnungsort vorgestreckt wird, daß die Bergleute dort die Brocken des gewonnenen Gutes unmittelbar auf die Rutsche werfen können. Bild 13, Seite 7, zeigt eine Rutsche mit ihrem elektromotorischen Antrieb. Das Prinzip der Schüttelrutsche ist bereits auf Seite 10 ausführlich beschrieben. Die Schüttelrutschen sind in Längen bis zu 100 Metern in Betrieb. Sie fördern bei horizontal angeordneten Rutschen bis zu 50 Tonnen in der Stunde über ihre ganze Länge. Ist es möglich, die Rutschen in der Förderrichtung mit einem gewissen Gefälle anzulegen, so steigt die Fördermenge beträchtlich. Der Kraftverbrauch bewegt sich dabei zwischen 10 bis 30 Kilowatt. Durch die Rutschen wird das Fördergut aus der noch wenig ausgebauten Gegend des Gewinnungsortes schnell und in großen Mengen in die ausgebauten Strecken gebracht, wo es in die Grubenwagen verladen und durch Grubenlokomotiven weiter bis zum Hauptförderschacht transportiert werden kann.



874. Förderhaspel mit Spannsäule
Mit Hilfe der Säule kann der elektrisch betriebene Haspel an jeder beliebigen Stelle gespannt werden. Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

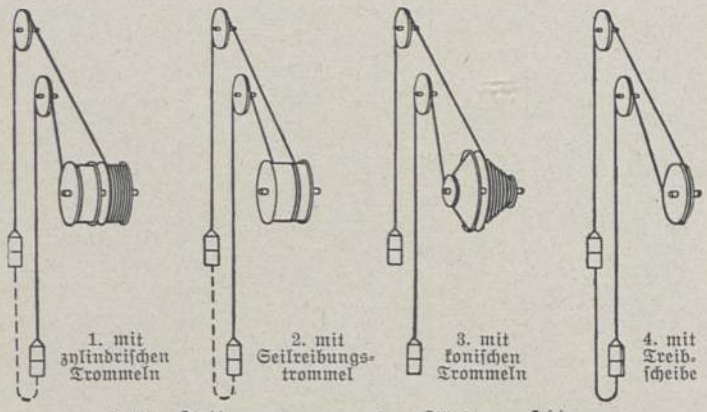
Häufig sind freilich die Gefällsverhältnisse zwischen dem Gewinnungsort und der nächsten horizontal verlaufenden Strecke so ungünstig, daß



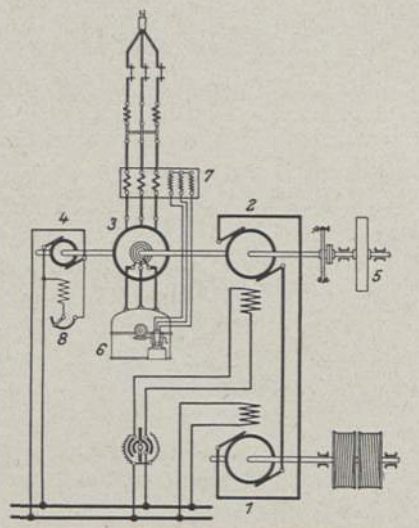
875. Grubendoppellokomotive mit Stromzuführung durch Oberleitung
Normale Motorleistung 280 Pferdestärken. AEG, Berlin

man die Rutsche nicht anwenden und auch mit Grubenlokomotiven nicht bis unmittelbar an die Gewinnungsstelle gelangen kann. In diese Lücke springt erfolgreich der elektrische Förderhaspel ein. Es bleibt dann nichts übrig, als das Grubengeleise bis unmittelbar an den Gewinnungsort vorzustrecken und die einzelnen Grubenwagen mittels Förderhaspels über die Steigung hinaufzuziehen. Bild 874 zeigt einen derartigen Förderhaspel der Siemens-Schuckertwerke, der in der Hauptsache nichts anderes ist als eine an einer Spannsäule befestigte elektrische Winde, die an einer geeigneten Stelle der Förderstrecke eingespannt wird und nun die Wagen entweder zu sich hinaufzieht oder von sich fort ablaufen läßt.

Den Rest der Förderung in den horizontalen und ausgebauten Strecken besorgt dann die Grubenlokomotive, die heut in der Mehrzahl aller Fälle ebenfalls elektrisch ist. Man hat entweder Akkumulatorenlokomotiven oder aber einfache Lokomotiven mit Oberleitung. Der geringe Querschnitt der Strecken zwingt dazu, der elektrischen Grubenlokomotive eine besonders gedrungene Form zu geben. Durch die in den Gruben meist herrschenden ungünstigen Verhältnisse, wie Schmutz, Schlamm und Staub, ist es notwendig, alle Teile bestens zu schützen und zu kapseln. Dabei erreichen diese auf gedrängtem Raum und unter so ungünstigen Verhältnissen arbeitenden Maschinen aber recht achtungswerte Leistungen. Bild 875 zeigt beispielsweise eine Grubenlokomotive der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft mit einer Leistung von 280 Pferdestärken. Abgesehen von den durch die Grubenverhältnisse bedingten baulichen Abweichungen gelten für die Grubenlokomotiven aber dieselben Grundsätze wie für elektrische Lokomotiven überhaupt, und es sei diesbezüglich auf das im II. Band dieses Werkes (Abschnitt 13 und 14) bei den Stadtschnellbahnen und Straßenbahnen Gesagte verwiesen. Die elektrische Grubenlokomotive bringt das Fördergut in langen Zügen und über Wege, die oft viele Kilometer betragen, bis zum Hauptförderschacht, und hier setzt nun die Vertikalförderung ein, die das Gut zutage schaffen soll.



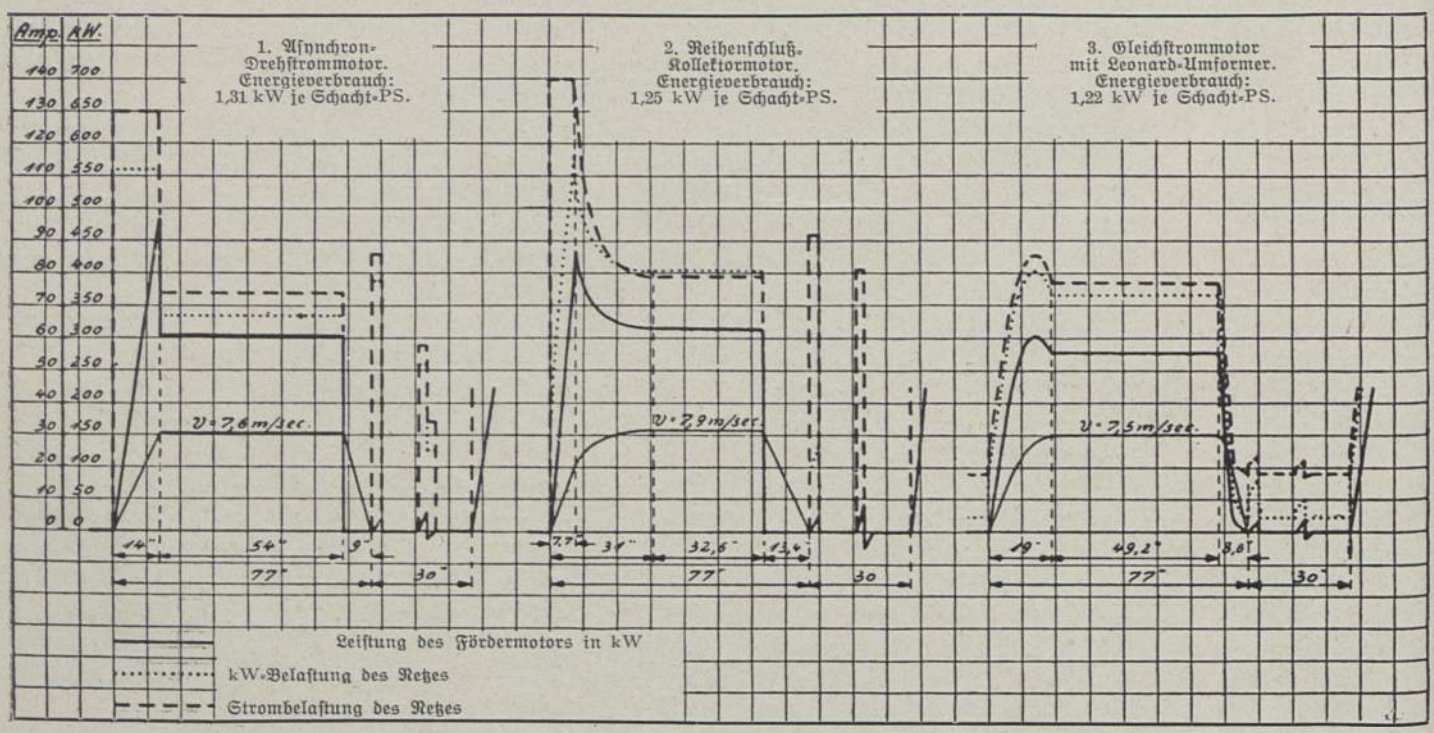

876. Seilanordnungen der Fördermaschinen




877. Leonard-Ilgner-Schaltung

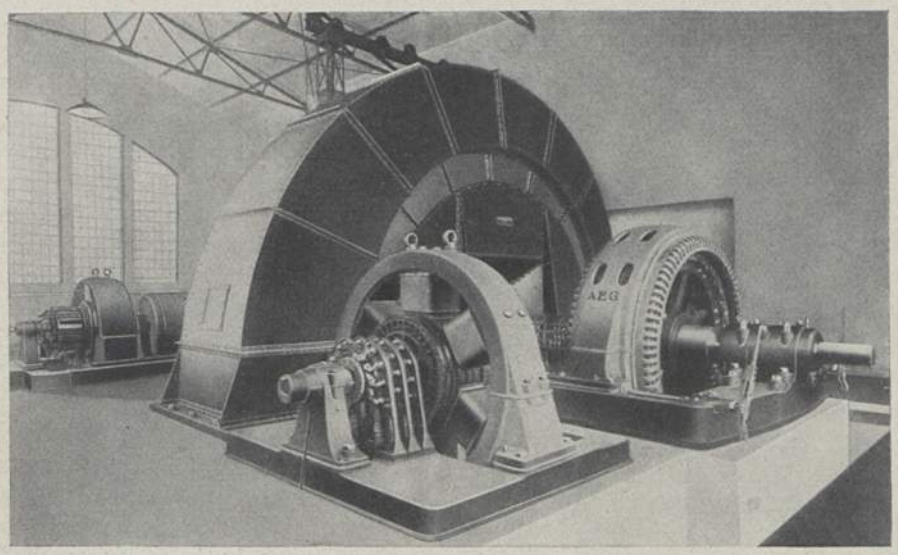
1 Fördermotor mit den Seiltrommeln gekuppelt, 2 Steuerdynamo, 3 Umformermotor, 4 Erregerdynamo, 5 Schwungrad, 6 selbsttätiger Schlupfregler, 7 Stromtransformator, 8 selbsttätiger Nebenschlußregler

Die Verbindung des unter Tage liegenden Abbaugebietes mit der Erdoberfläche erfolgt durch senkrechte Schächte. Aus technischen Gründen muß eine Grube wenigstens zwei Schächte besitzen, nämlich den Hauptschacht, in dem sich die Förderung abspielt, und durch den außerdem frische Luft, die guten Wetter des Bergmannes, in die Grube einzieht, und den Wetterschacht von meist geringerem Querschnitt, durch den ein zurzeit auch meist elektrisch betriebener



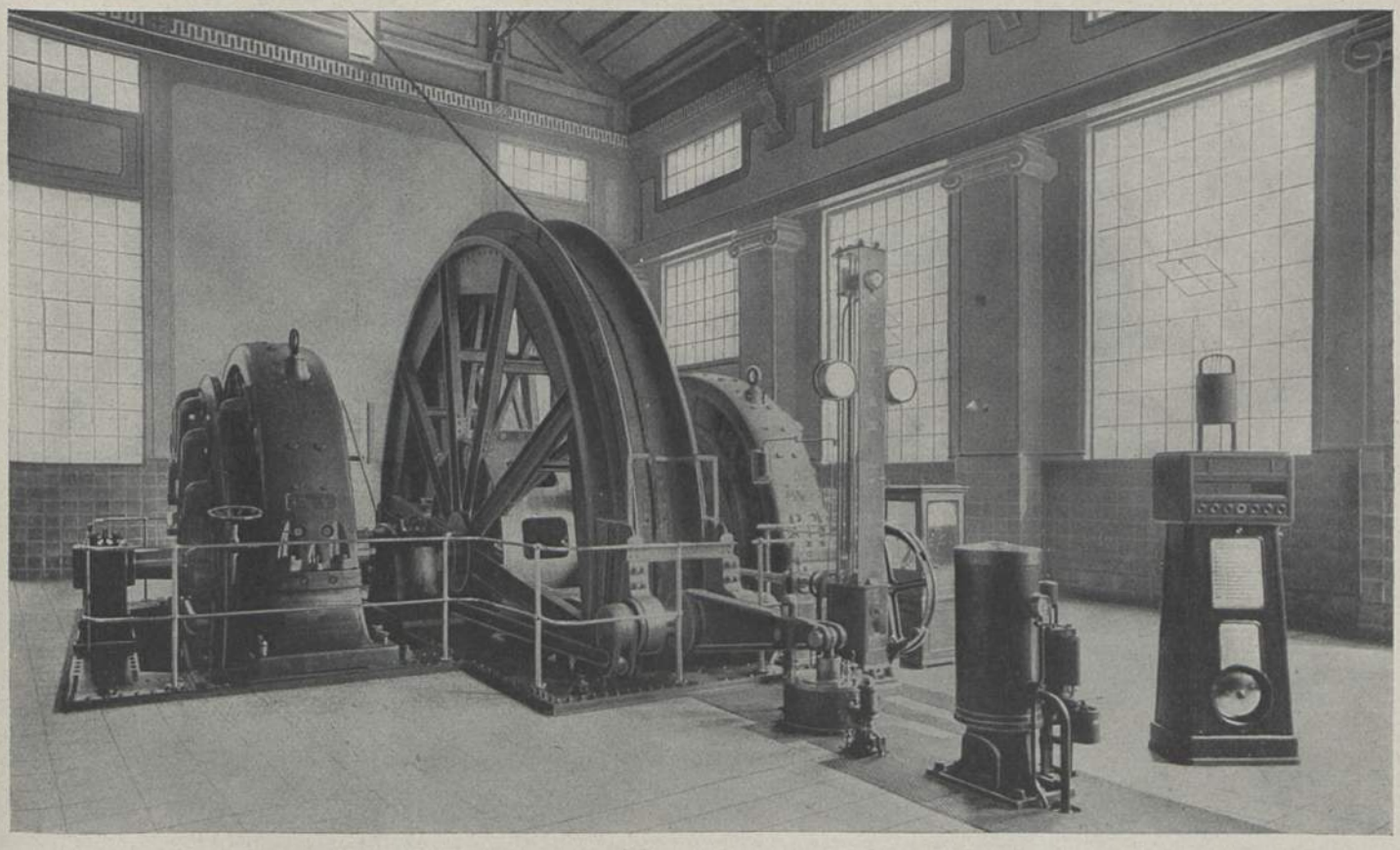

878. Fördermotor- und Netzbelastungsdiagramme einer Treibscheibenfördermaschine für 3200 Kilogramm Nutzlast und 500 Meter Teufe bei drei verschiedenen Antriebmotoren

Ventilator die schlechten Wetter aus der Grube absaugt. Der Wetterschacht kommt für eine Förderung nicht in Betracht. Es bleibt daher nur der Hauptförderschacht, dessen Querschnitt im allgemeinen eine Anlage von zwei Förderseilen mit daran hängenden Förderkörben gestattet. Die Produktion wird bei älteren Gruben im allgemeinen als ungefähr gleichbleibend angenommen werden können. Dagegen zeigt die Schachtteufe, d. h. die Entfernung der untersten in Abbau befindlichen Sohle von der Erdoberfläche noch auf viele Jahre hinaus eine Neigung zum Wachsen. Im westfälischen Steinkohlenrevier haben viele Gruben bereits eine Teufe von tausend Metern erreicht, und man würde gern noch weiter gehen, wenn sich die Förderung nur noch durch einen Hauptförderschacht bewältigen läßt. Denn es ist begreiflicherweise ein schwerer Entschluß, einen neuen Schacht, dessen Herstellungskosten in die Millionen Goldmark gehen, in das alte Grubengebiet hinein abzuteufen. Unter diesen Umständen muß man versuchen, für den einen Schacht eine Förderanlage größtmöglicher Leistungsfähigkeit zu schaffen, und das Mittel dazu bietet die Elektrizität.

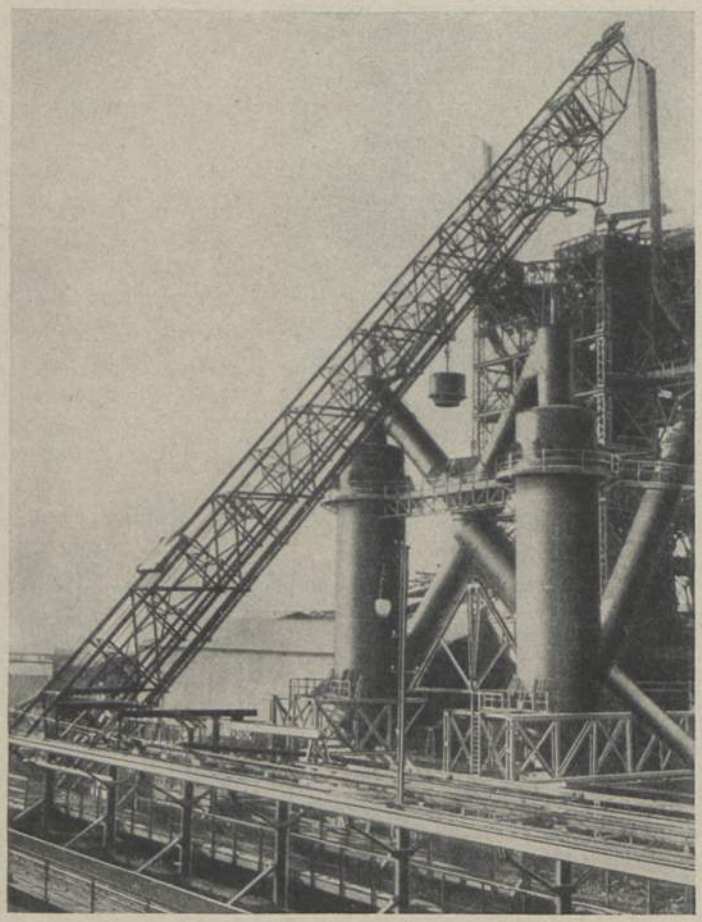



879. Einseitig saugender Rateau-Grubenventilator
für 15 000 Kubikmeter minutlich bei 360 Millimeter Quecksilbersäule-Unterdruck auf der Saugseite, angetrieben durch einen 1500pferdigen Drehstrom-Induktionsmotor der AEG. Normale Umdrehungszahl: 225 in der Minute; wirtschaftlich bis zur Drehzahl 155

Daß die zu fördernden Lasten nicht gering sind, mögen die folgenden Zahlen belegen. Die größten Förderschalen sind dreistöckig gebaut und können in jeder Etage vier beladene Grubenwagen mit einer Ladung von je einer Tonne aufnehmen, so daß sich eine reine Nutzlast von 12 Tonnen für den Zug einer Förderschale ergibt. Für die Nutzlast muß die Fördermaschine die Hebungsarbeit über die ganze Schachtlänge leisten. Für die tote Last, bestehend aus dem Gewicht der Förderschale, der Grubenwagen und des Förderseiles, kann man annehmen, daß sie durch eine gleich große tote Last des gleichzeitig niedergehenden anderen Förderkorbes ungefähr ausgeglichen ist, so daß hier keine Hebungsarbeit in Betracht kommt. Wohl aber die keineswegs geringe Beschleunigungsarbeit, durch welche die Massen aller bewegten Teile in möglichst kurzer Zeit vom Stillstand auf volle Fahrgeschwindigkeit



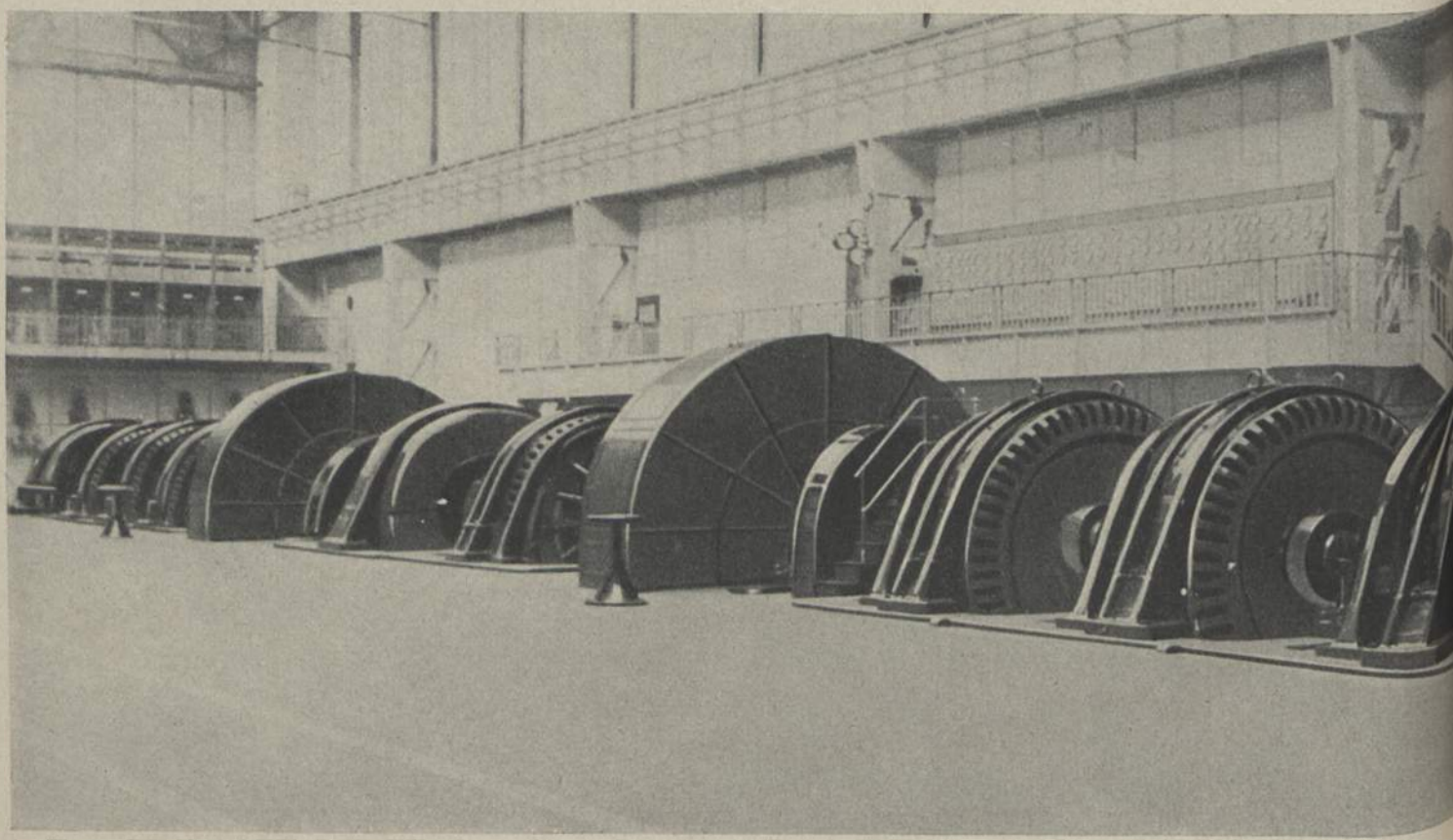
880. Koepe-Fördermaschine der Zeche Bonifacius der Gelsenkirchener Bergwerks A.-G. Kray bei Gelsenkirchen
Nutzlast: 5200 Kilogramm, größte Teufe: 600 Meter, Fördergeschwindigkeit: 16 Meter in der Sekunde.
Ausführung der Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin



881. Hochofen-Schrägaufzug mit Hängekübel
Bauart Demag — AEG

gebracht werden müssen. Diese Leistungen zusammen erreichen ganz bedeutende Werte und führen dazu, daß mehrtausendpferdige Fördermaschinen heute keine Seltenheit mehr sind.

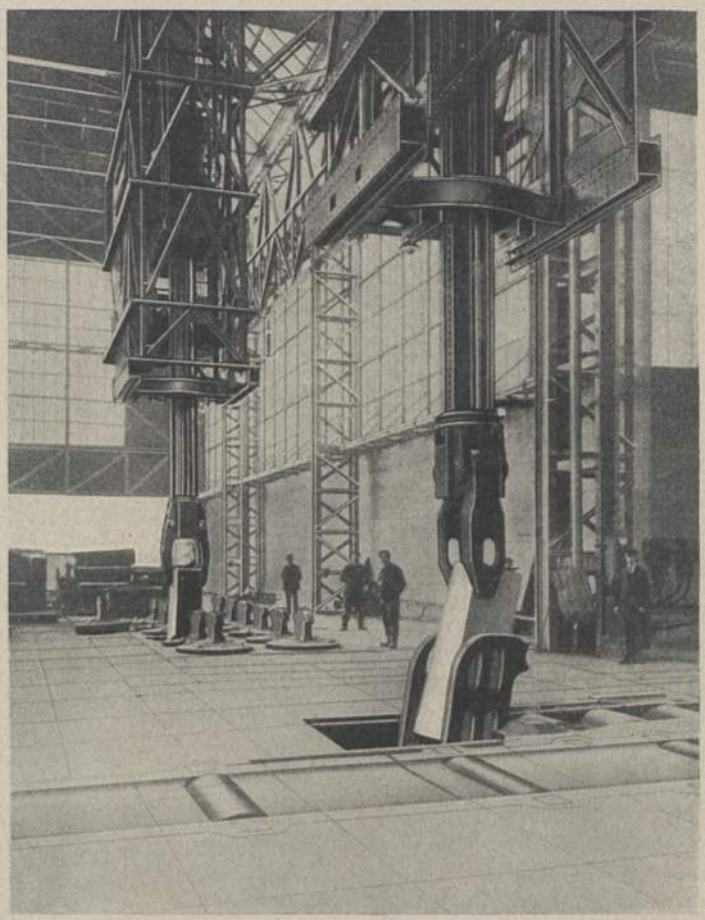
Für die Anlage einer zweitrümigen Fördermaschine kommen die in Bild 876 dargestellten Trommel- und Seilanordnungen zur Anwendung. Bild 876, 1 zeigt zwei zylindrische Trommeln. An jeder Trommel ist ein Seil von der vollen Schachtlänge befestigt. Das eine Seil rollt sich auf, während das andere abrollt. Es leuchtet ein, daß das längere Seil, dessen Förderschale sich also gerade in größerer Tiefe befindet, stärker an der Trommel ziehen muß als das kürzere. Man bringt deshalb gern ein Ausgleichseil zwischen den Böden der beiden Förderschalen an, das in Bild 876, 1 und 2 punktiert angedeutet ist, da es hier nicht unbedingt erforderlich ist. Bild 876, 2 zeigt die Förderung mittels Seilreibungstrommel. Beide Förderschalen hängen an den beiden Enden eines Seiles, das im ganzen nur die Länge der Schachttiefe hat und in einigen Windungen um die Seiltrommel herumgeschlungen ist. Bild 876, 3 entspricht in der Hauptsache Bild 876, 1, nur sind die beiden Trommeln nicht zylindrisch, sondern konisch. Man bekommt deshalb für das Aufwickeln des langen Seiles kein so starkes Drehmoment, und die Verwendung eines Unterseiles erübrigt sich. Bild 876, 4 zeigt schließlich den heut besonders bevorzugten Koepe-Trieb. Er kann als eine Weiterentwicklung der Seilreibungstrommel angesprochen werden, die hier zu einer schmalen Treibscheibe geworden ist, die das gemeinsame Seil beider Körbe in einem Winkel von 180 Grad umfaßt. Hier ist ein Unterseil zum besseren Massenausgleich unentbehrlich, da man sonst ein Gleiten des Förderseiles auf der Treibscheibe zu fürchten hätte. In der Praxis macht man das Unterseil gern etwas schwerer als das Oberseil und erzielt dadurch einen Lastenausgleich, der ein leichteres Anfahren mit der gefüllten Förderschale aus der



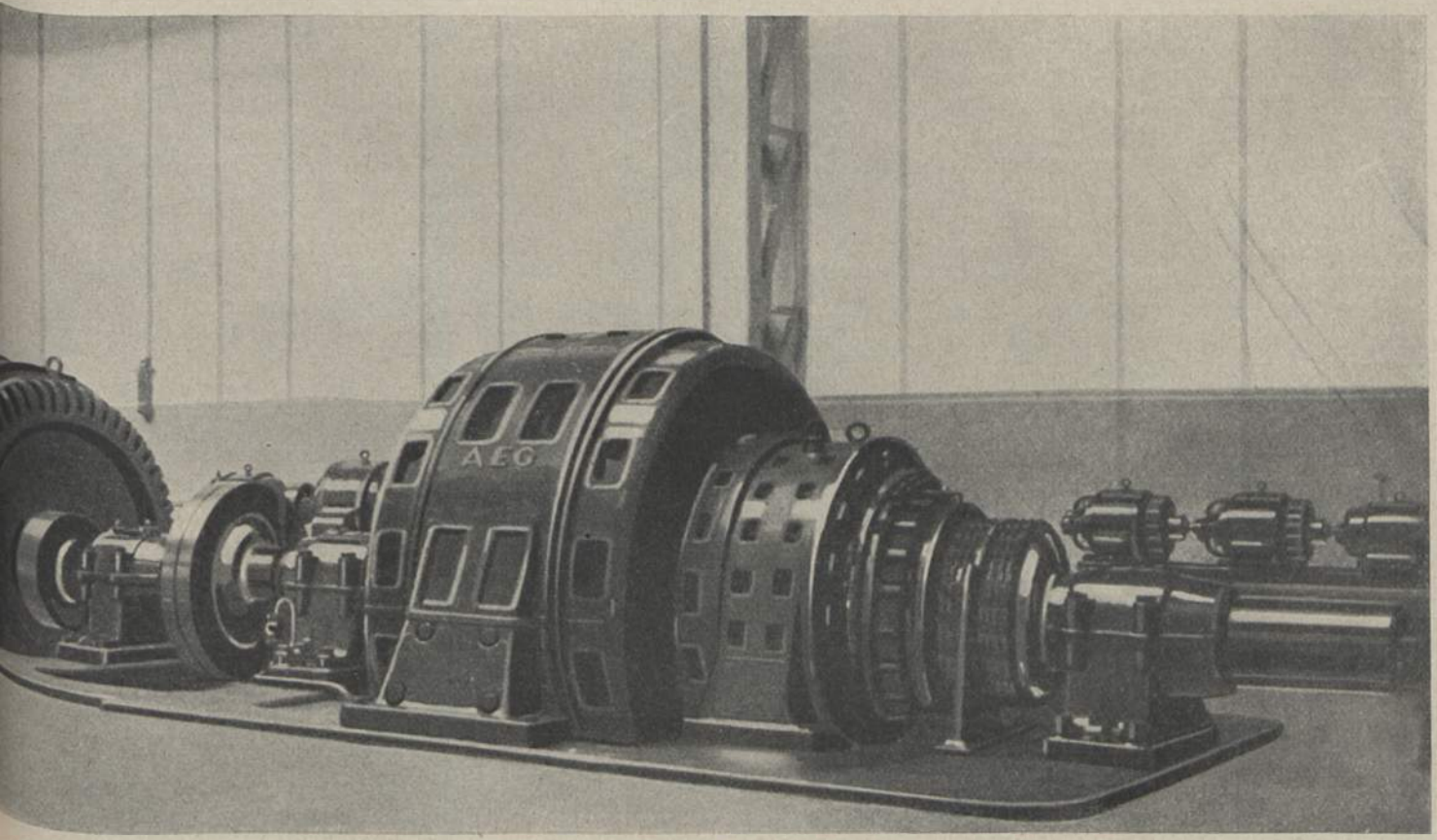
882. Gemeinsamer Ilgner-Umformer für den Antrieb
Drei Drehstrommotoren von je 8000 Kilowatt, sieben Anlaßmaschinen von je 1820 bis

Schachtteufe nach oben gestattet. Mit derartigen Seilanlagen soll nun in Schächten bis zu etwa 1000 Metern Teufe gefördert werden. Der Bergmann unterscheidet dabei Seilfahrt und Förderfahrt. Die erstere bezeichnet das Ein- und Ausfahren der Belegschaft. Hier muß auf Menschen Rücksicht genommen werden, die Beschleunigungen und Fahrgeschwindigkeiten dürfen gewisse Grenzen nicht überschreiten. So ist für die Seilfahrt in deutschen Schächten nur eine Höchstgeschwindigkeit von 10 Metern pro Sekunde zulässig. Für die Förderfahrt dagegen geht man so weit, wie es die technischen Verhältnisse nur irgend gestatten. Die normale Fahrgeschwindigkeit beträgt hier 20 Meter pro Sekunde. Man könnte mit ihr eine Schachtteufe von einem Kilometer in 50 Sekunden durchfahren, wenn nicht die Zeitverluste während der Beschleunigungsperiode beim Anfahren und der Verzögerungsperiode beim Stillsetzen wären. Man muß daher mit möglichst großer Beschleunigung von drei bis vier Metern in der Sekunde bei der Förderfahrt anfahren und mit entsprechender Verzögerung die Schalen wieder stillsetzen. Das gibt aber begreiflicherweise für kurze Zeiten, beispielsweise für die Sekunden der Anfahrperiode Leistungen, die ein Vielfaches der normalen Leistung betragen können. So stand die Starkstromtechnik vor der Aufgabe, einen elektromotorischen Antrieb zu schaffen, der diesen so stark wechselnden Belastungen nachkommt, ohne das Stromnetz durch allzu starke Stromstöße zu beanspruchen.

Nach dem, was auf Seite 460 über die Elektromotoren gesagt wurde, liegt es auf der Hand, daß der Gleichstrom-Hauptschlußmotor für derartige stark wechselnde Belastungen und Drehzahlen das geeignetste ist. Dabei bleibt es gleich, ob man ihn direkt mit der Seiltrommel der Fördermaschine kuppelt oder durch einen zwischengeschalteten Zahntrieb auf die Trommelwelle arbeiten läßt. Ist die Gesamtkraftanlage hinreichend groß, und sie ist auf den meisten modernen Zechen sehr groß, so wird man

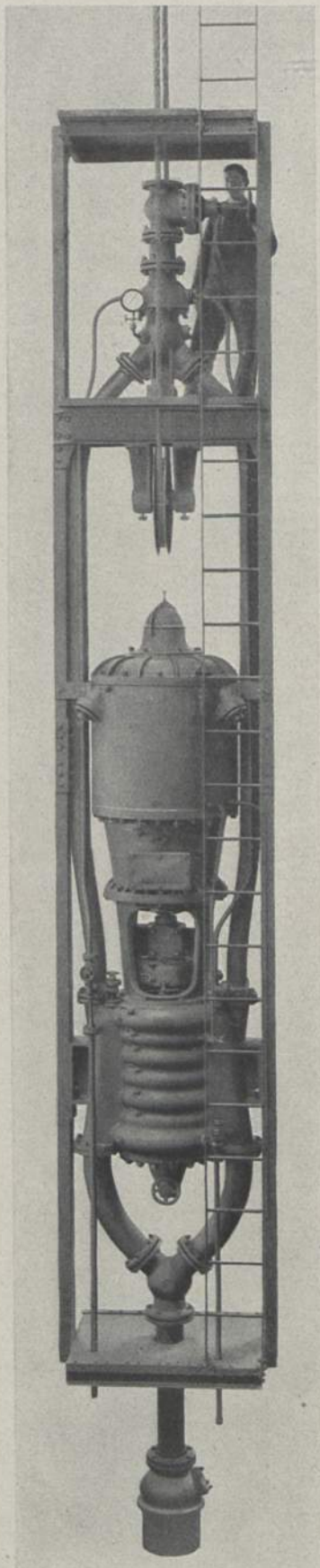


883. Tiefofenkran mit elektrischem Antrieb
Bauart der Demag — AEG




einer Umkehr-Blockstraße und einer Trio-Knüppelstraße
5500 Kilowatt, zwei Schwungradgruppen zu je 60 Tonnen. Ausführung der AEG, Berlin

dem Netz die Stromstöße zumuten dürfen, die der Fördermaschinenmotor während der Höchstbelastungsperioden verursacht. Im anderen Falle ist eine Pufferbatterie das gegebene Mittel, um diese Stöße abzufangen und unschädlich zu machen. Aber es liegt in der bereits mehrfach erwähnten Entwicklung der Starkstromtechnik, daß die allermeisten Bergwerke heut keine Gleichstrom-, sondern Drehstromzentralen haben, und viel wichtiger war daher die Lösung des Problems mittels Drehstroms. Sie gelang mittels der Leonard-Ilgner-Schaltung, die man heut fast als Normalschaltung für elektrisch betriebene Fördermaschinen bezeichnen kann. Bild 877 gibt ein einfaches Schema dieser Schaltung. Rechts unten ist die doppelte Seiltrommel sichtbar, die direkt mit einem Gleichstrommotor 1 mit besonderer Felderregung gekuppelt ist. An das Drehstromnetz ist ein Drehstrom-Induktionsmotor 3 angeschlossen, der während der ganzen Förderzeit mit einer nach Möglichkeit gleichbleibenden Belastung läuft. Direkt gekuppelt mit dem Drehstrommotor sind eine Gleichstrom-Nebenschlußdynamo 4, eine Gleichstromdynamo mit gesonderter Felderregung 2 und ein sehr schweres stählernes Schwungrad 5. Die Spannung und damit auch die gelieferte Stromstärke der Nebenschlußdynamomaschine, der sogenannten Erregerdynamo, wird durch den Regulierwiderstand 8 geregelt. Sie gibt ihren Strom auf die links unten bezeichneten Sammelschienen, von denen die Feldwicklungen des Fördermotors 1 abzweigen und außerdem die Feldwicklungen der Dynamo 2, der sogenannten Steuerdynamo. In der Zuleitung dieser letzteren Feldwicklung liegt noch ein Regulierwiderstand. Nehmen wir nun an, der Drehstrommotor laufe bei stillstehender Fördermaschine mit einer mittleren Tourenzahl und treibe einerseits die Erregerdynamo, andererseits das Schwungrad 5. Die Erregerdynamo liefert Strom von normaler Spannung, der die Feldwindungen des Fördermotors 1 in voller Stärke durchfließt, von den Feldwindungen der Steuerdynamo 2 aber durch den in deren Zuleitung liegenden Regulierwiderstand und Ausschalter abgeschnitten ist. Die Steuerdynamo läuft zwar, aber ihr Anker befindet sich in keinem magnetischen Feld und kann infolgedessen keine Spannung und keinen Strom erzeugen. Der Anker des Fördermotors 1 liegt zwar in einem recht starken Feld, aber da er von der Dynamo 2 keinen Strom erhält, hat er keine Veranlassung, sich in Bewegung zu setzen. Nun soll die Fördermaschine anfahren. Zu diesem Zweck bewegt der Maschinist den Regulierwiderstand der Steuerdynamo, deren Feld wird dadurch erregt, sie liefert Strom in den Anker des Fördermotors 1, und die Fördermaschine setzt sich in Bewegung. Die Kosten für das alles trägt zunächst der



884. Abteufpumpengruppe mit Senkrahmen

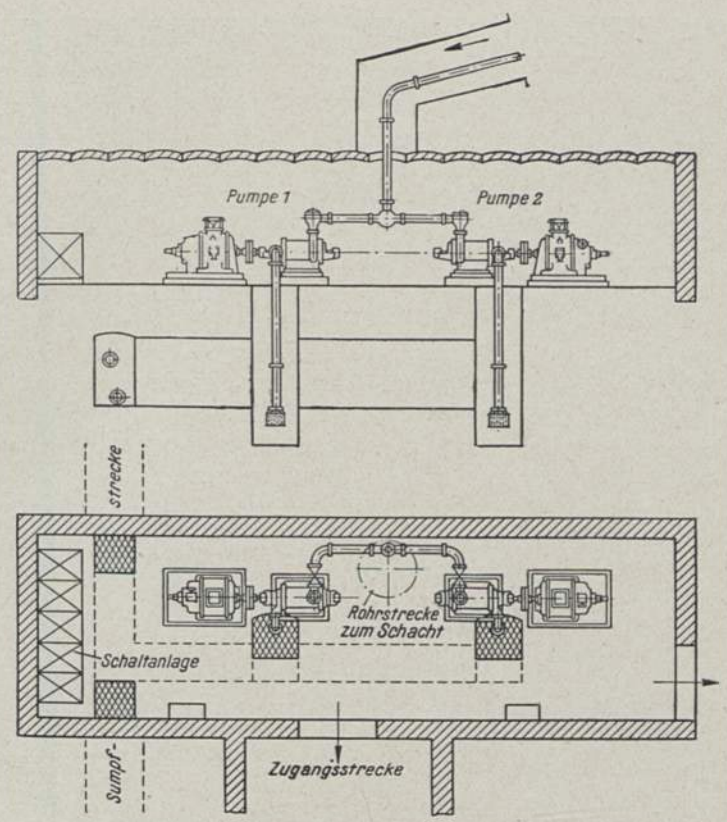
Drehzahl des Motors: 1500 in der Minute. Die ganze Anordnung hängt am Kran und wird, dem fallenden Wasserstand folgend, in den Schacht eingehängt. Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

Drehstrommotor, der ja jetzt nicht nur die kleine Erregerdynamo, sondern auch die sehr viel stärkere Steuerdynamo unter voller Last treiben muß. Ließe der Drehstrommotor in dieser kritischen Periode in seiner Tourenzahl nach, so würde das Schwungrad, das starr mit ihm gekuppelt ist, notwendigerweise ebenfalls an seiner Drehzahl verlieren und dabei einen Teil seiner lebendigen Kraft für den Antrieb des Drehstrommotors 3 hergeben. Im allgemeinen wird eine solche Unterstützung des Drehstrommotors durch das Ilgner-Rad erwünscht sein, sobald die Energieentnahme durch den Drehstrommotor aus dem Netz über eine gewisse Grenze hinausgeht. Zur Erreichung dieses Zustandes dient der Stromtransformator 7 in Verbindung mit dem selbsttätigen Regulierapparat 6. Der Regulierapparat betätigt einen Regelwiderstand des Motorläufers. Sobald der Induktionsmotor zu hohe Stromstärken aus dem Netz entnimmt, schaltet er über die drei Schleifringe des Läufers Widerstand in die Läuferwicklungen. Das Anzugsmoment des Läufers und auch die Stromentnahme aus dem Netz werden dadurch geringer, der Läuferschlupf wird größer, und das Ilgner-Rad muß helfen, die Dynamo 2 mitzuziehen. Der Vorgang, der sich über einen Teil der etwa 30 bis 60 Sekunden dauernden Förderfahrt erstreckt, endet naturgemäß mit einer merklich verringerten Drehzahl des ganzen mit dem Drehstrommotor gekuppelten Systems. Sobald der Energiebedarf der Fördermaschine 1 nachläßt, tritt nun aber die Regelvorrichtung 6 und 7 in umgekehrter Richtung in Tätigkeit. Sie nimmt Widerstand aus den Läuferwindungen heraus, verringert dadurch den Läuferschlupf und veranlaßt den Motor gleichzeitig, bei wieder steigender Drehzahl die normale Energie aus dem Drehstromnetz zu entnehmen und als lebendige Kraft in das Ilgner-Rad hineinzugeben. Das ganze System erholt sich also gewissermaßen während der sogenannten Sturzpausen der Fördermaschine, während deren die Förderschalen stillstehen und die Wagen gewechselt werden. So ist es mit merklich erhöhter Tourenzahl und einer beträchtlichen Energiereserve in dem Ilgner-Rad für die nächste Förderfahrt bereit. Bild 878 gibt vergleichsweise die Energieentnahmen aus dem Netz für drei verschiedene Arten des elektrischen Fördermaschinenantriebes. Aus der Darstellung geht deutlich hervor, wie sehr die Leonard-Schaltung in Verbindung mit einem Ilgner-Rad ausgleichend auf die Netzbeanspruchung wirkt. In der Tat hat sich diese Art der Schaltung bei allen Betrieben mit stoßartig auftretendem großen Energiebedarf außerordentlich wertvoll erwiesen. Wir begegnen ihr daher auch an zahlreichen anderen Orten der Schwerindustrie, beispielsweise bei den großen elektrisch betriebenen

Walzwerken, und sie wurde deshalb an dieser Stelle etwas ausführlicher besprochen. Bild 880 zeigt eine Koepe-Scheibenfördermaschine mit ihrem in Leonardschaltung arbeitenden Gleichstrommotor nach einer Ausführung der Siemens-Schuckertwerke.

Die nächsten beiden großen Anwendungsgebiete für die Elektrizität im Bergbau sind die Bewetterung und Wasserhaltung. Die Bewetterung erfolgt, wie bereits ausgeführt, über einem besonderen Wetterschacht, der sich fast stets in größerer Entfernung von der Zechenzentrale befindet, so daß schon deshalb der elektrische Antrieb geboten erscheint. Auch für die gewaltigen Ventilatoren, die bis zu 20 000 Kubikmeter Luft in der Minute aus der Grube absaugen müssen, kommen große Motoren mit Leistungen bis zu 1000 Kilowatt in Frage. Glücklicherweise ist aber dieser Betrieb ein durchaus konstanter. Tagein, tagaus und jahrein, jahraus laufen diese Motoren und Ventilatoren mit ziemlich gleichbleibender Tourenzahl und Belastung, so daß der einfache Antrieb durch einen Gleichstrom- oder Drehstrommotor im allgemeinen genügt. Bild 879 zeigt einen großen von der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft installierten Grubenventilator, der durch einen Drehstrommotor von 1500 Pferden angetrieben wird. Man hat hier eine Regulierung durch die Kaskadenschaltung erzielt, in der Weise, daß eine überschüssige in dem Läufer des Drehstrommotors auftretende Energie nicht nutzlos in Widerständen vernichtet, sondern einem rotierenden Drehstrom = Gleichstromumformer zugeführt und weiterhin als Gleichstrom nutzbar gemacht wird.

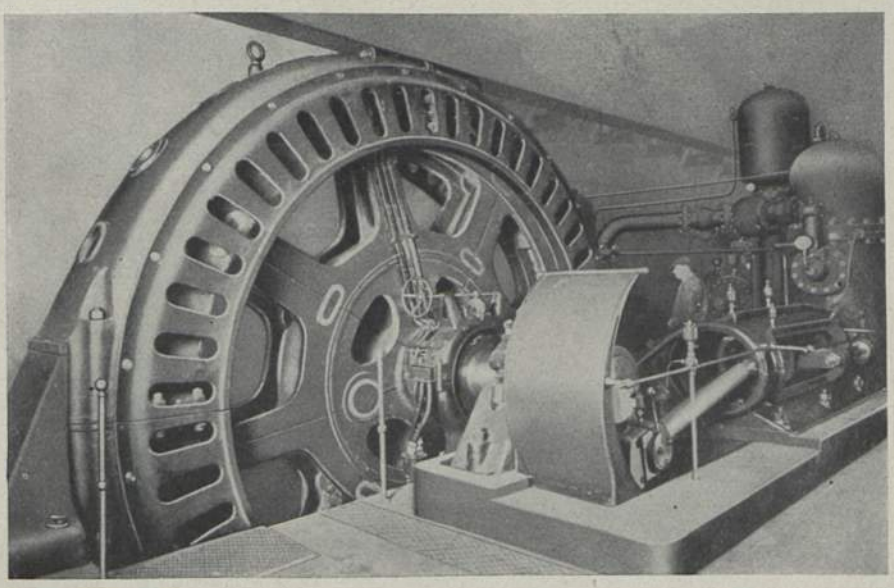
Bei der Wasserhaltung handelt es sich darum, die jeder Grube normalerweise durch den Berg zufließenden Wassermengen, die sich an einer tiefsten Stelle, dem Grubensumpf oder Pumpensumpf ansammeln, durch genügend kräftige maschinell betriebene Pumpen zu Tag zu fördern und unschädlich wegfließen zu lassen. Um welche Energiemenge es sich hier handelt, läßt sich leicht errechnen. Ein Kubikmeter Wasser wiegt tausend Kilogramm. Um ihn aus einem 750 Meter tiefen Schacht an die Oberfläche zu bringen, muß man, abgesehen von allen unvermeidlichen Energieverlusten, eine reine Hubarbeit von 750 000 Meterkilogramm aufwenden, was einer Arbeit von 10 000 Pferdekraftsekunden oder rund drei Pferdekraftstunden entspricht. Der Energiebedarf schwankt nach dem jeweiligen Wasserzufluß der Grube, bewegt sich aber meistens um etwa 1000 Pferdestärken herum. Auch hier handelt es sich also um Antriebe von recht beträchtlicher Größe.




885. Aufriß und Grundriß einer unterirdischen, elektrisch betriebenen Wasserhaltungsanlage

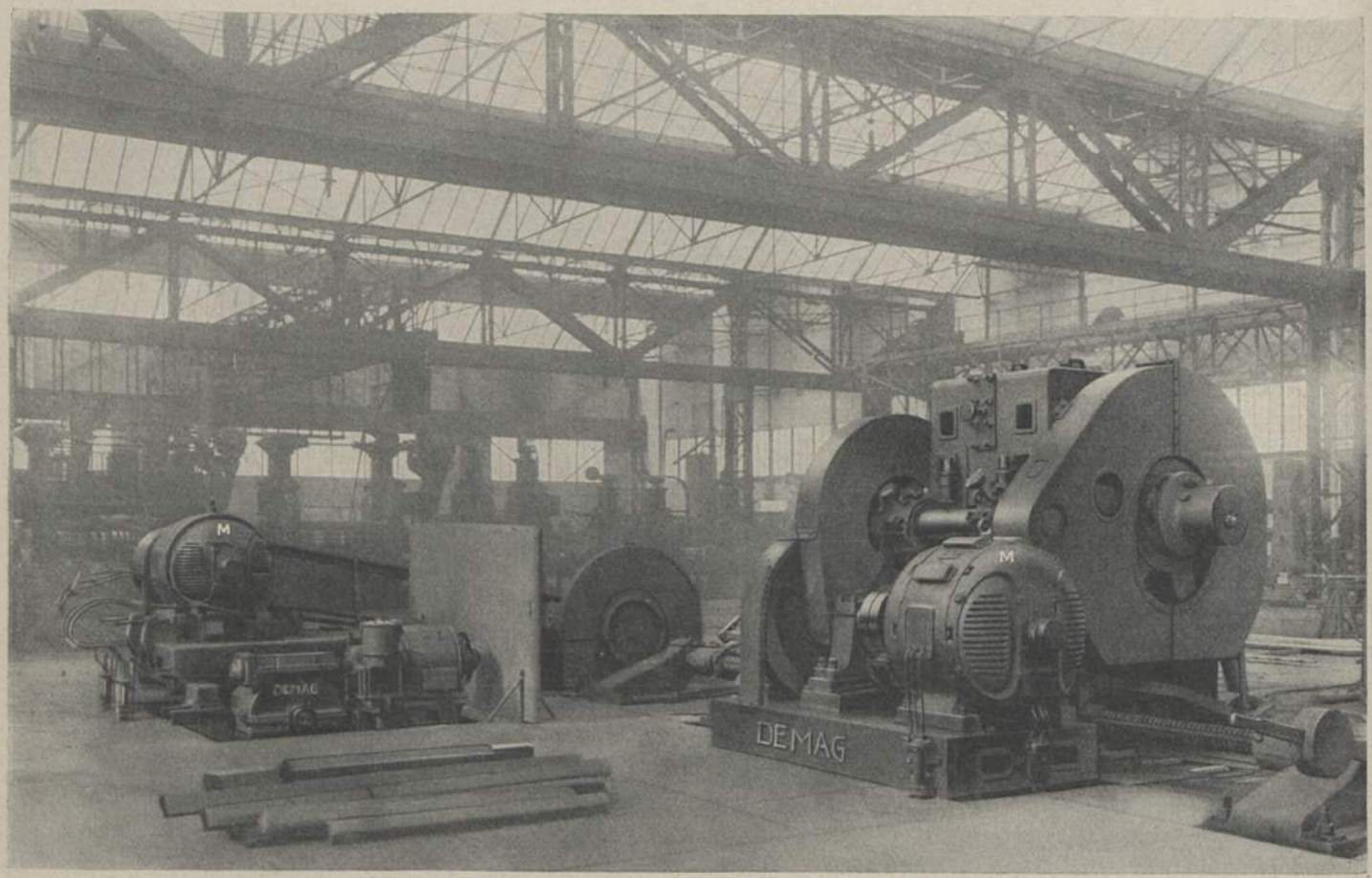
Die Pumpenkammer liegt in der Nähe des Schachtes. Die Pfeile deuten den Wetterstrom an. Die Schaltanlage befindet sich am Kopf der Pumpenkammer

Bekannt ist, daß eine Pumpe nur über eine Tiefe von 10 Metern (theoretisch) ansaugen kann, praktisch noch über beträchtlich weniger. Die Wasserhaltungspumpen müssen notgedrungen als Druckpumpen arbeiten. Sie müssen unter Tag dicht über dem Pumpensumpf aufgestellt werden und das Wasser nach oben drücken. Dementsprechend haben auch die mit den Pumpen direkt gekuppelten Elektromotoren ihren Platz unter Tag und ungefähr an der tiefsten Stelle der Grube. Man sprengt hier eine genügend große Maschinenkammer in den Berg und ordnet die Pumpen und Motoren etwa so an, wie es das Schema im Bild 885 zeigt. Durch die Unterteilung der Anlage in mehrere voneinander unabhängige Maschinensätze ist man in der Lage, den einzelnen Motor mit ungefähr gleichbleibendem Energiebedarf und wenig veränderlicher Drehzahl laufen zu lassen, so daß der einfache Antrieb der Kolben- oder Kreiselpumpen durch direkt gekuppelte Gleichstrom- oder Drehstrom-Induktionsmotoren für die Wasserhaltungen das Gegebene ist. Bild 886 zeigt eine von den Siemens-Schuckertwerken ausgeführte Wasserhaltung für das Steinkohlenbergwerk Johann Deimelsberg. Schon beim Abteufen eines Schachtes muß die Wasserhaltung

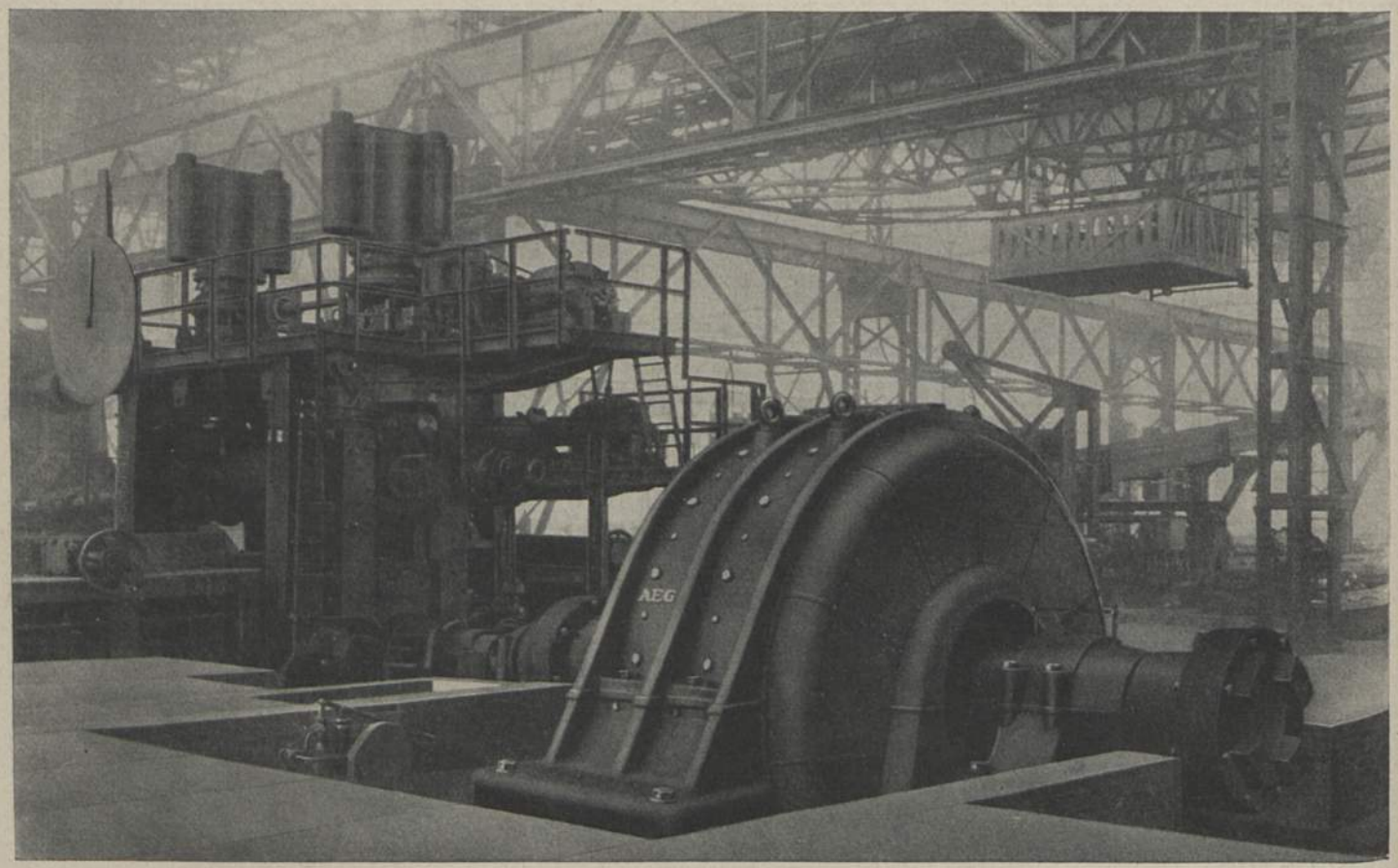


886. Elektrische Wasserhaltung

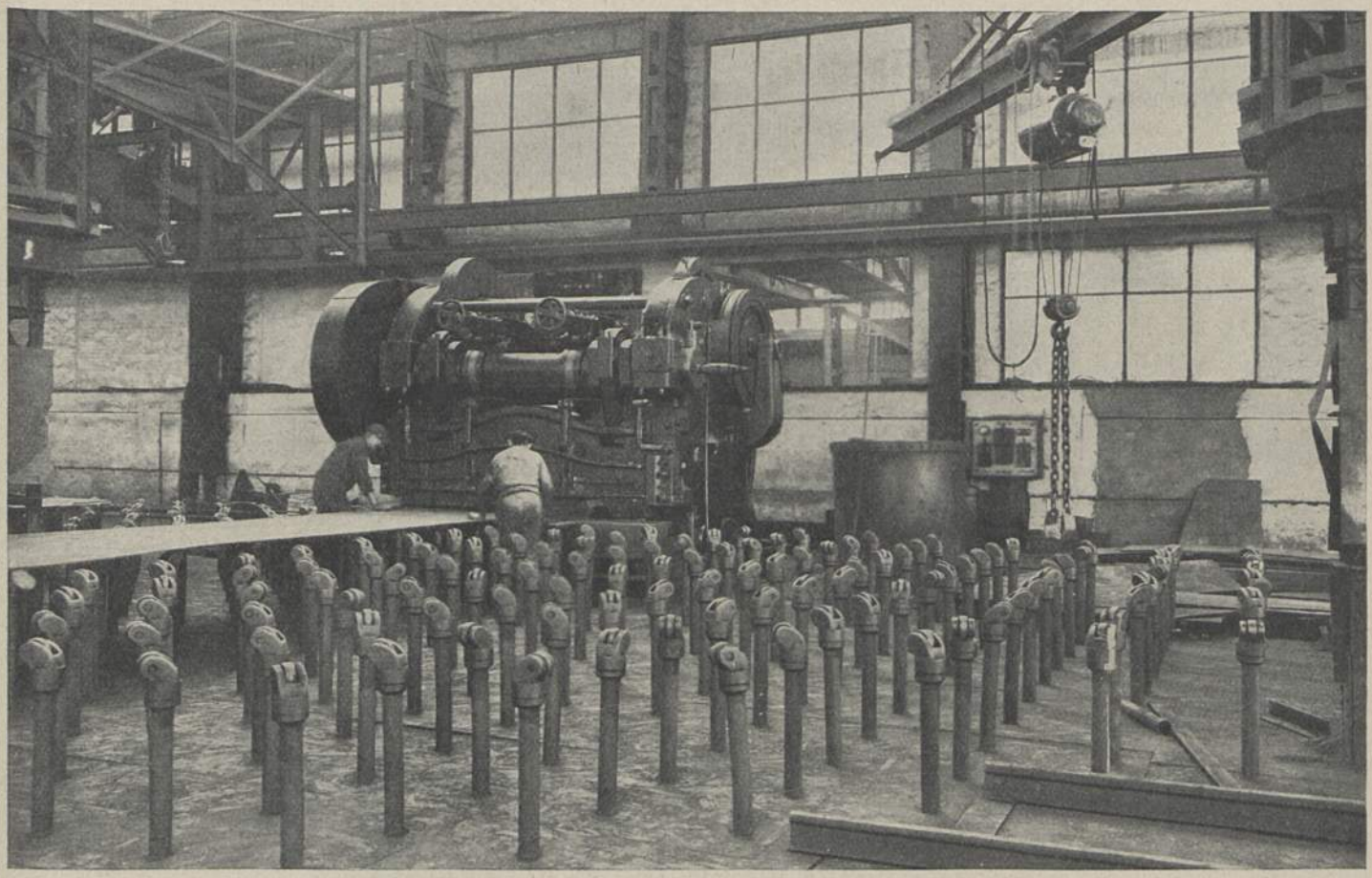
der Gewerkschaft des Steinkohlenbergwerkes Johann Deimelsberg. Ausführung der Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin



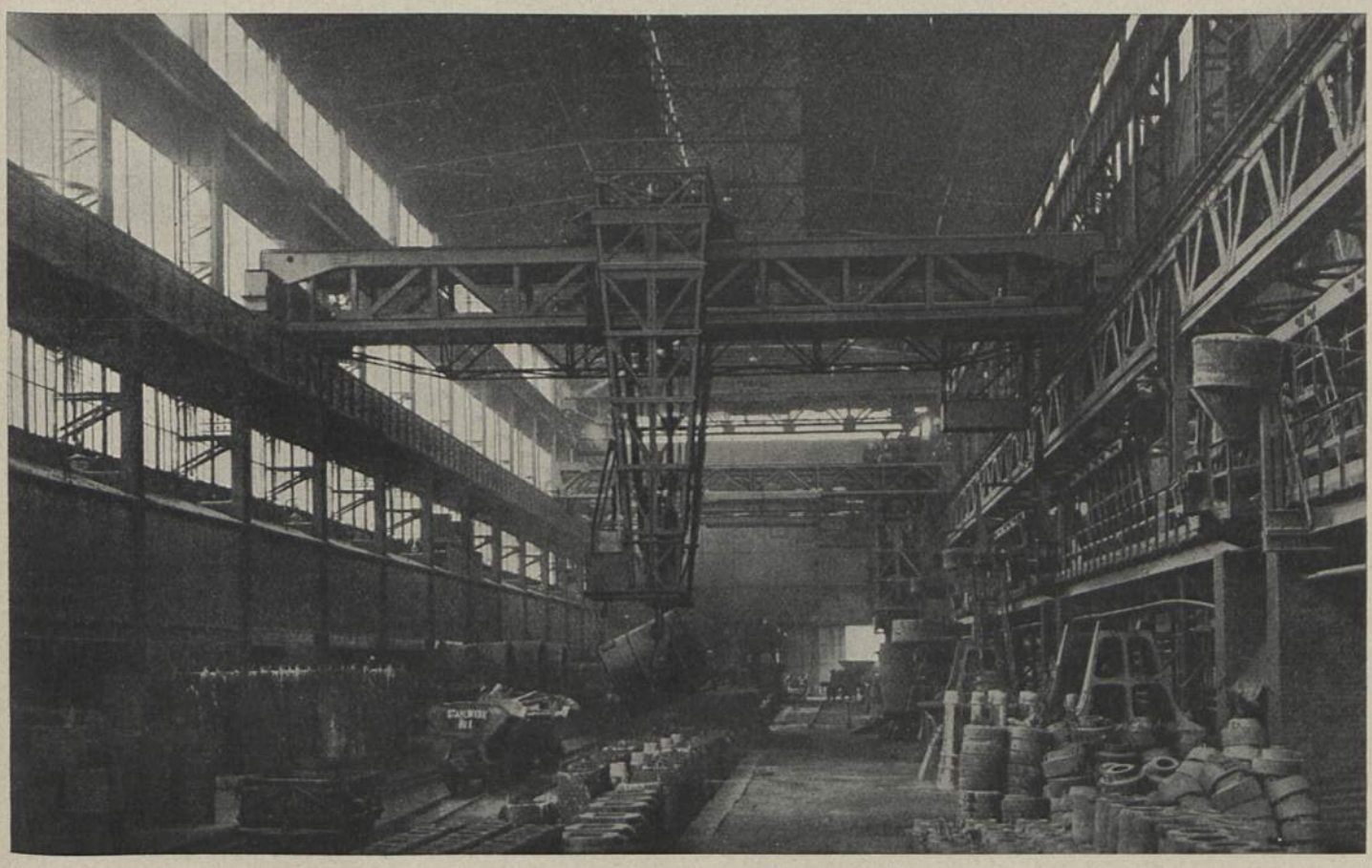

887. Elektrisch betriebene Heißeisensäge und Blockschere in einem Walzwerk
M Antriebsmotor. Bauart Demag — AEG




888. Antrieb eines Universalwalzwerks durch einen Reversier-Walzwerkmotor
Bauart Demag — AEG



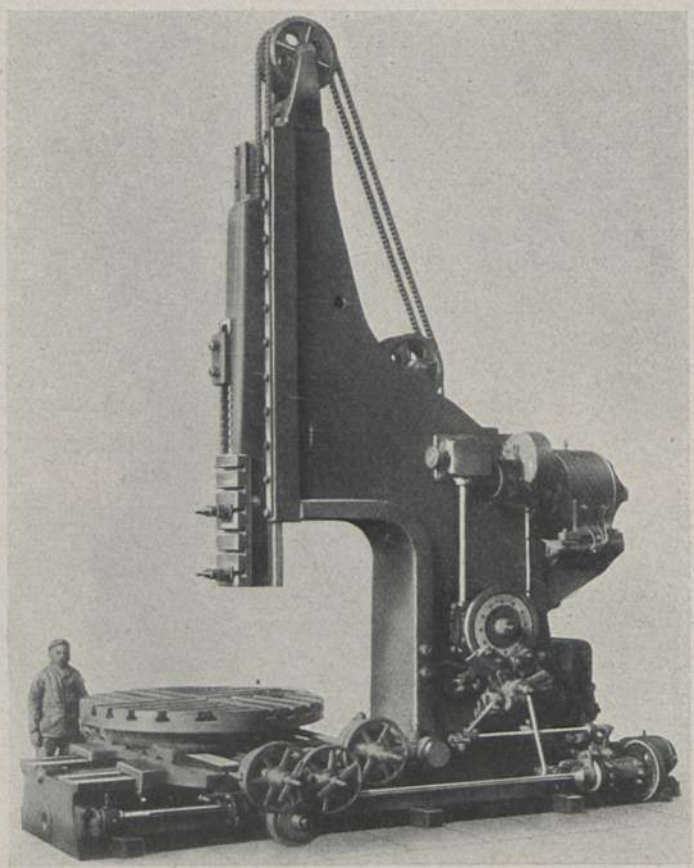
889. Schwere Tafelschere zum Schneiden von Trägerblechen mit elektrischem Antrieb
Maschinenfabrik Schieß A.-G., Düsseldorf



890. Elektrisch betriebener Gießkran (Tigler)
Der Kran bestreicht die ganze Gießhalle und füllt aus der Kranpfanne die einzelnen Koquillen. Bauart Demag — AEG

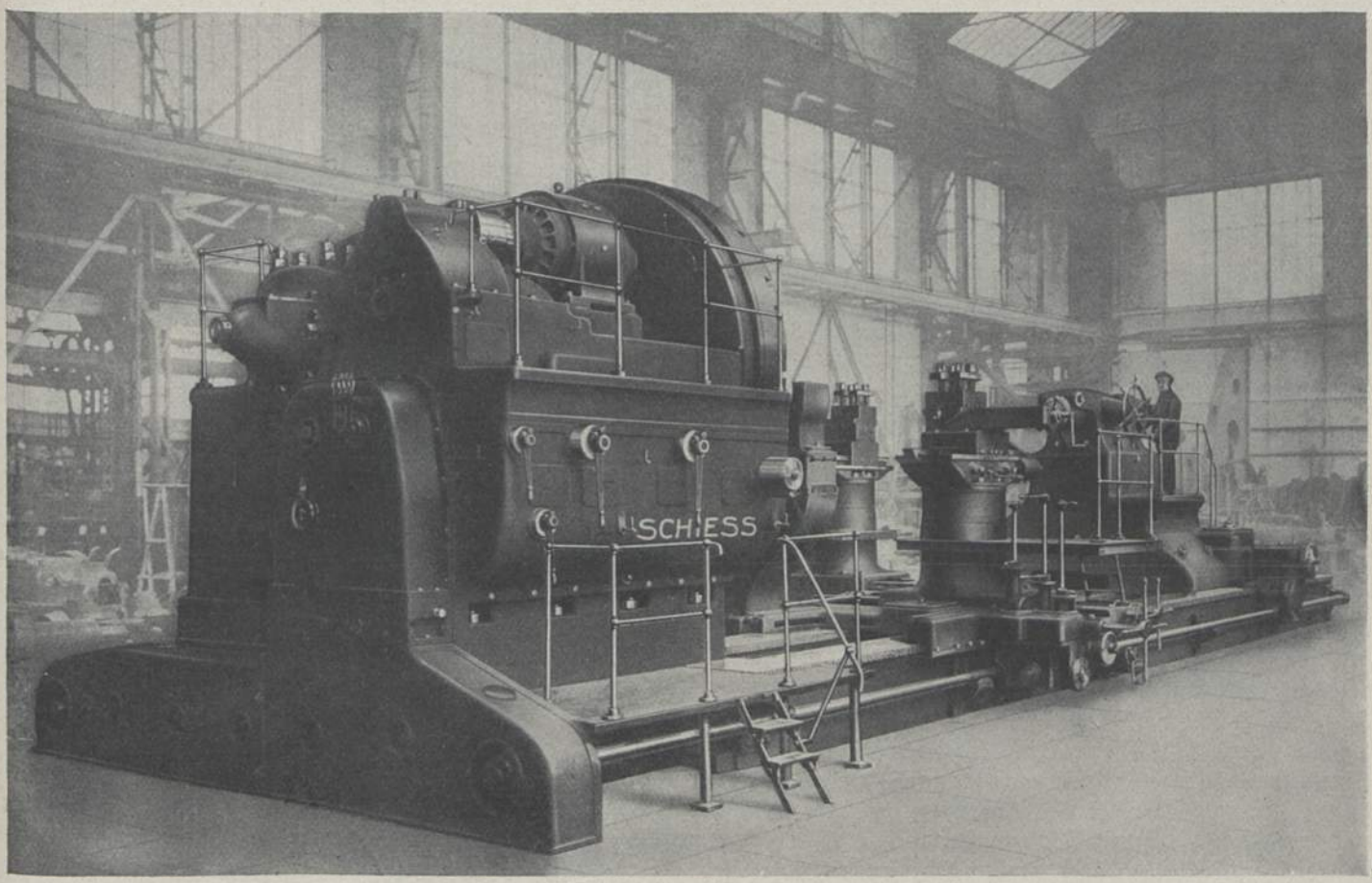
einsetzen, sobald man mit dem Senkschacht die ersten vollkommen durchtränkten Bodenschichten, das sogenannte schwimmende Gebirge, glücklich durchfahren hat und in einigermaßen trockenes Gestein gekommen ist. Es würde zu weit führen, an dieser Stelle näher auf die so ungemein interessante Technik der Schachtabteufung näher einzugehen. Steht der wasserdicht ausgemauerte Senkschacht im trockenen Gestein, so wird die Abteufpumpe (Bild 884) an einer schweren Winde hinabgelassen. Sie besteht aus einer Pumpe, die direkt mit einem Elektromotor gekuppelt ist. In dem Maße, in dem sie den Wasserspiegel, der zunächst bis zu Tage steht, absenkt, wird sie allmählich tiefer hinabgelassen, wobei einerseits das stromzuführende Kabel fortwährend folgen und andererseits die das Wasser zu Tage bringende Druckrohrleitung fortwährend nach oben verlängert werden muß.

So hilft die Elektrizität die Grube bauen. Sie begleitet das am Gewinnungsort gebrochene Gut bis über Tag und bringt es über Tag in elektrisch betriebenen Zügen fort. Sie bewirkt die Bewetterung und Wasserhaltung der Grube und ist jedem zeitgemäßen Bergwerksbetrieb vollkommen unentbehrlich. Aber sie folgt den gewonnenen Rohstoffen auch weiter in die Hüttenwerke, in denen aus Erz und Kohle Roheisen erschmolzen und schließlich Stahl erzeugt wird. Der Betrieb des Hüttenwerkes beginnt beim Hochofen. Bis zum Fuße der gewaltigen Öfen haben elektrisch betriebene Züge das Futter für diese Jahrzehnte hindurch brennenden Schlünde herangeschleppt. Das Erz der Eisengruben, die Kohle aus dem Kohlenbergwerk und die gewaltigen Gesteinsmengen, vorwiegend Kalkstein, die als Zusätze bei dem Schmelzprozeß dienen. Elektrisch betriebene Greifbagger fassen in diese Massen und füllen die einzelnen Gichtkübel damit, die nun in endloser Kette den Gichtaufzug hinauf zur Ofenmündung oder Ofengicht wandern, um ihren Inhalt in den feurigen Schlund zu gießen. Bild 881 zeigt einen Hochofen-Schrägaufzug und läßt einen der großen Gichtkübel erkennen. Würde diese fortwährende Materialzufuhr auch nur auf wenige Stunden einmal unterbrochen, so wären schwere Störungen der Vorgänge im Hochofen, des sogenannten Ofenganges, zu erwarten. Man arbeitet deshalb hier mit doppelter Sicherheit und ordnet für den Antrieb der Aufzüge im allgemeinen zwei Motoren an, von denen der eine allein die Arbeit übernimmt, während der andere in ständiger Betriebsbereitschaft steht und durch eine einfache Umschaltung sofort in Betrieb genommen werden kann, wenn dem ersten Motor etwas zustößt. Während der Hochofen von oben her unaufhörlich Kohle, Kalk und Erz schluckt, und während ihm von unten her starke Elektroventilatoren gewaltige Mengen bis auf tausend Grad erhitzter Luft, den Frischwind, einblasen, gibt er durch die Gicht ununterbrochen den Frischwindmengen entsprechende Gicht- oder Kraftgasmengen ab, die in der Zentrale des Hüttenwerkes der Energieerzeugung dienen. Nach unten aber entfließen ihm in kurzen Intervallen die Roheisenmengen, die zum größten Teil sofort in große Kranpfannen strömen und von elektrischen Kränen zu den Bessemer Birnen gefahren werden. Wieder treten hier Elektroventilatoren in Tätigkeit und jagen Preßluft mit gewaltigem Druck und in enormen Mengen durch das heiße Roheisenbad, um es in wenigen Minuten in flüssigen Stahl zu verwandeln. Elektromotoren kippen die Bessemer Birnen, und der flüssige Stahl ergießt sich von neuem in Kranpfannen, die ihn Hunderte von Metern weit schleppen und in Formen ausgießen. Bild 890 zeigt einen elektrisch betriebenen Gießkran, kurzweg Tigler genannt, bei der Arbeit. Der Kran, mit vier Bewegungen und dementsprechend auch vier Motoren, bestreicht die ganze große Gießhalle. Der Mann im Kranstand ist durch die Bedienung einfacher Steuergriffe, die zu Fahrschaltern gehören, wie sie bereits in Band II, Abschnitt 14 bei den elektrischen Straßenbahnen beschrieben wurden, in der Lage, die Tülle der großen Kranpfannen auf den Zentimeter genau an jeden Punkt der großen Halle hin zu dirigieren und die in der Erde stehenden Formen auszugießen, ohne daß ein Tropfen des glühenden Stahlbades verschüttet wird. Der bis auf Rotglut abgekühlte und erstarrte Inhalt dieser Formen, die vierkantige Stahlluppe, wird von einem gleichfalls elektrisch betätigten Zangenkran (Bild 883) ergriffen und zum Walzwerk geschafft, das ihn unter kurzem, aber gewaltigem Energieaufwand zu Formstahl, wie Eisenbahnschienen, T-Trägern und dergl. auswalzt. Das Walzwerk bedeutet im Hüttenbetriebe für den Elektrotechniker etwas Ähnliches wie die Fördermaschine im Bergwerksbetriebe. Nur ist der Energieverbrauch hier noch viel größer. Zurzeit sind Walzwerkmotoren mit Leistungen bis zu 15 000 Pferdestärken ausgeführt worden, womit freilich noch nicht der Energiebedarf der größten Walzwerke erreicht wird. Man zieht es aber in diesem Falle vor, zwei solcher Motoren in Parallelschaltung laufen zu lassen, um die notwendigen 30 000 Pferdestärken zu bekommen.

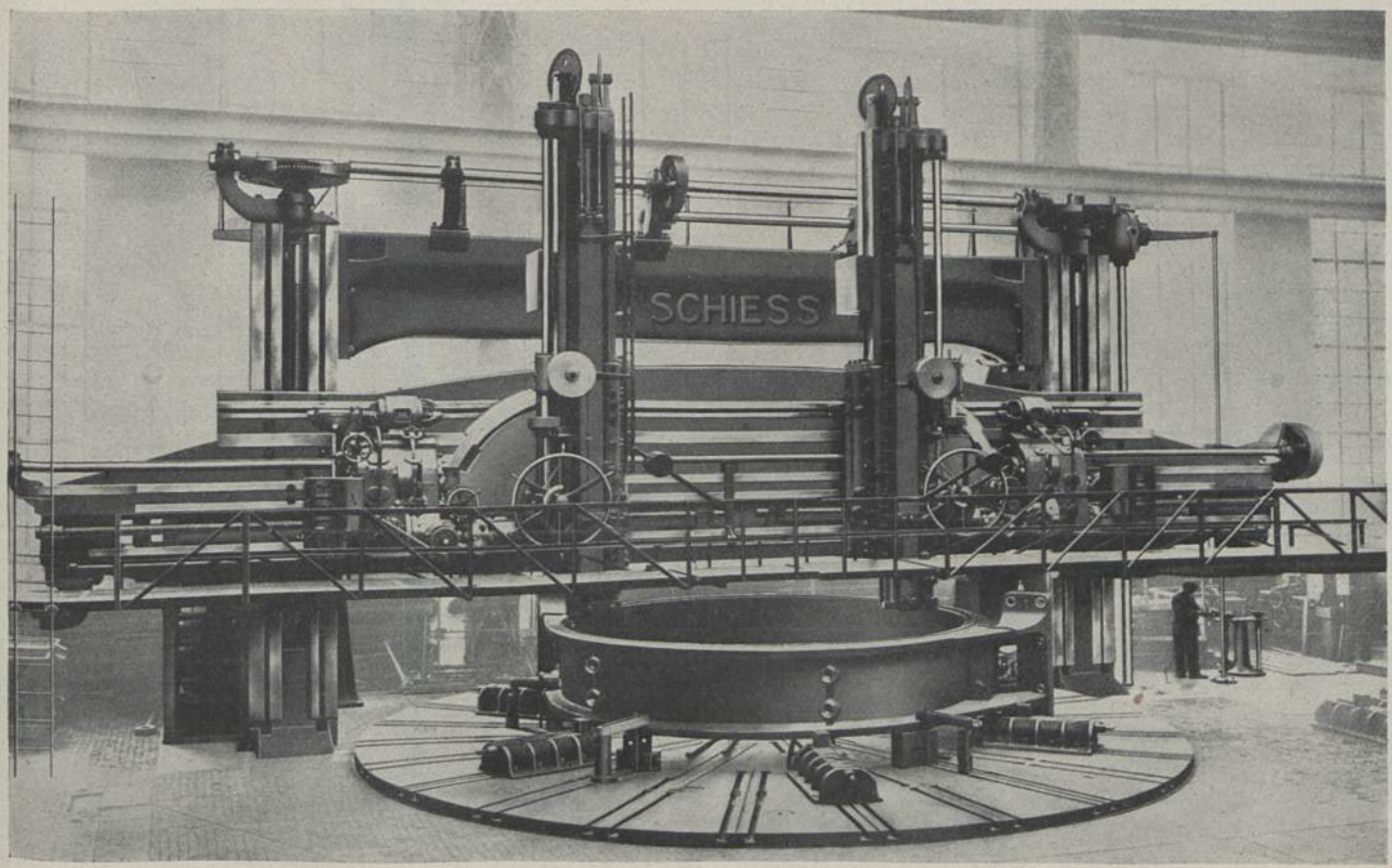


891. Stoßmaschine (Hobelmaschine) mit elektrischem Antrieb
Maschinenfabrik Schieß A.-G., Düsseldorf

Gerade die Hüttenzentralen pflegen im allgemeinen außerordentlich groß zu sein, da sie ja unter allen Umständen die riesigen aus den Hochofenbetrieben abfallenden Gichtgasmengen auf Energie verarbeiten müssen. Ein großes Hüttenwerk ist daher meistens in der Lage, über seinen eigenen Verbrauch hinaus die benachbarten Städte und Ortschaften mit außergewöhnlich billiger elektrischer Energie zu beliefern und kann dabei doch noch einen wirtschaftlichen Ertrag zu eigenen Gunsten

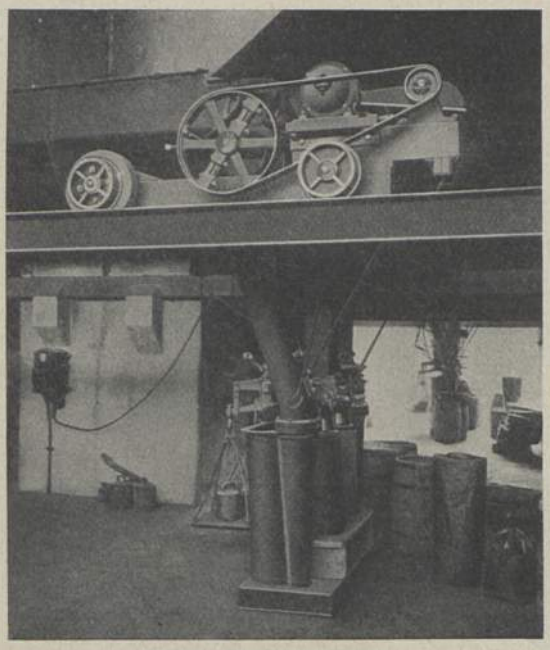



892. Große Drehbank mit vertikaler Planscheibe und elektrischem Antrieb
Ausführung der Maschinenfabrik Schieß A.-G., Düsseldorf




893. Große Drehbank mit horizontaler Planscheibe und elektrischem Antrieb
Maschinenfabrik Schieß A.-G., Düsseldorf

verbuchen. Nur diese Umstände erklären es, daß auf einigen deutschen Hüttenwerken Walzenstraßen laufen, die unmittelbar von 15 000pferdigen Drehstrommotoren ohne besondere Pufferungen und Ausgleichsvorrichtungen betrieben werden. Die Zentralanlage ist hier so groß, daß sie Belastungsstöße von 15 000 und noch mehr Pferdestärken ohne Störung für die anderen am Netz hängenden Verbraucher aufzunehmen vermag. Besonders groß werden die Beanspruchungen sowohl in elektrischer wie auch in mechanischer Beziehung für die Antriebsmotoren bei Reversierwalzenstraßen, bei denen dieselben Walzen nebst zugehörigen Motoren abwechselnd in umgekehrter Richtung laufen und den Walzblock bald von vorn nach hinten und von hinten nach vorn zwischen sich hindurchnehmen. In vielen Fällen muß man daher auch hier zu der Leonard-Ilgner-Schaltung (vgl. Seite 484) greifen. Dabei werden denn nicht nur alle Elektromaschinen, sondern auch die Ilgner-Räder viel gewaltiger, da es sich um die Speicherung viel größerer Energiemengen handelt, als bei den Fördermaschinen. Die Ilgner-Räder sind hier massive Stahlscheiben mit Durchmessern bis zu 4,5 Metern, die mit Umfangsgeschwindigkeiten von 100 bis 110 Metern in der Sekunde entsprechend etwa 500 Umdrehungen in der Minute laufen.



894. Automatische Sackpackmaschine
Ausführung von Amme, Giesecke & Konegen A.-G. und der AEG

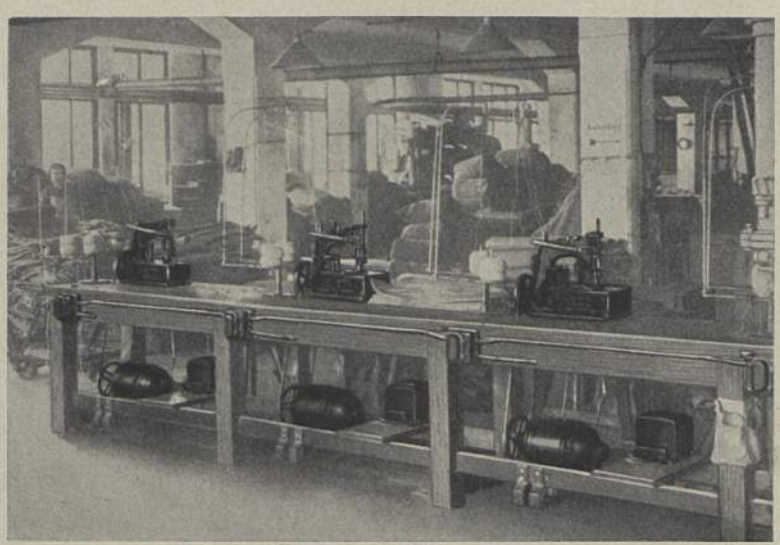
Bild 882 zeigt zwei große von der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft für ein Reversierwalzwerk aufgestellte Ilgner-Umformer. Auffallend ist dabei die vollkommene Kapselung der Schwungräder in Blechgehäusen. Sie ist nötig, um die Luftreibungsverluste, die bei diesen rotierenden Stahlscheiben sehr groß sind, auf ein erträgliches Maß hinabzudrücken. Man hat vorübergehend Ilgner-Scheiben auch mit 140 Meter Umfangsgeschwindigkeit laufen lassen, was das Radmaterial noch sehr gut aushält, kam dabei aber zu Energieverlusten durch die Luftreibung, welche die Wirtschaftlichkeit der ganzen Anlage in Frage stellten.

Bild 888 zeigt den direkten Antrieb eines Universalwalzwerks durch einen Reversier-Walzwerkmotor der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft. Beachtenswert sind an dem Walzwerk links die über dem Ständerrahmen befindlichen hydraulischen Pressen, durch welche die Walzen unter unwiderstehlichem Druck nach jedem Walzgang um ein Stück zusammengeholt werden. Es leuchtet wohl ein, daß der Energiebedarf einer solchen Walze in dem Augenblick, in dem die Walzen den glühenden Block zwischen sich zu packen bekommen, ruckartig in die Zehntausende von Pferdestärken springt und ein jäher Stoß das ganze Gestell erschüttert. Zwar sucht man alle diese Kräfte sicher zu beherrschen, aber man treibt die Vorsicht noch ein Stück weiter. Die Kupplungen zwischen der Welle des Walzwerkes und der oder den Wellen der Elektromotoren werden so bemessen, daß sie bereits zu Bruche gehen, bevor in den übrigen Teilen der Anlage Kräfte von zerstörender Größe auftreten können.

Mit dem Walzwerk ist die Reihe der elektrischen Betriebe eines Hüttenwerkes noch nicht beendigt. Es folgt das große Heer der Heiß- und Kaltsägen und Scheren, durch welche die Walzerzeugnisse auf die gewünschten Längen und Formate zugeschnitten werden. Es ist selbstverständlich, daß auch alle diese Maschinen elektromotorisch betrieben werden. So zeigt Bild 887 eine Heißeisensäge und eine Blockschere, die von der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft in Verbindung mit der Deutschen Maschinenfabrik A.-G., Duisburg, in einem Walzwerk installiert wurden. Bild 889 zeigt eine große Blechschere. Bemerkenswert sind hier die zahlreichen Rollstühle, über die hin die Blechtafeln zur Schere geschoben werden. Doch damit kommen wir bereits zu den elektromotorischen Antrieben von Werkzeugmaschinen, die im folgenden behandelt werden sollen.

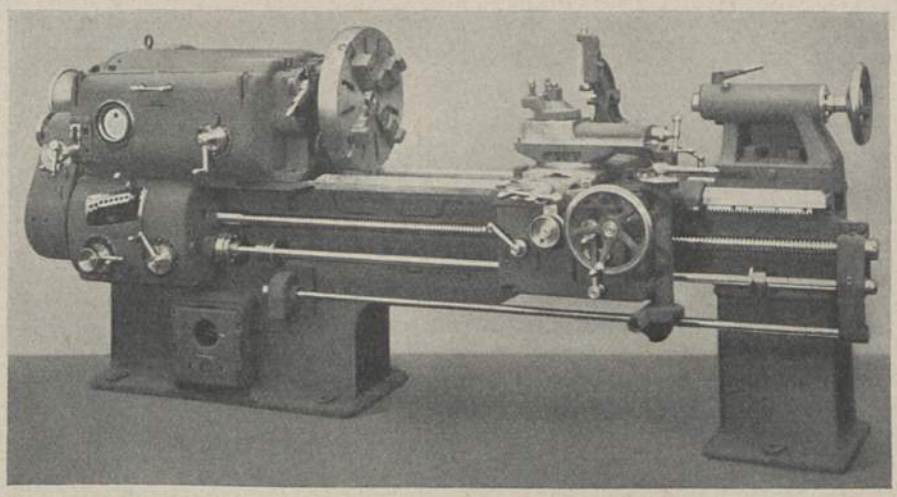
*

Der Übergang von der Manufaktur des 18. zur Fabrik des 19. Jahrhunderts ist durch die Einführung der Maschinenkraft in die Werkstätten gekennzeichnet. Durch Transmissionswellen und einen Wald von Riemen trieb eine Dampfmaschine die einzelnen, zunächst noch recht primitiven Werkzeugmaschinen an. Als die Starkstromtechnik ihren Einzug in die Fabriken hielt, übernahm sie zunächst noch einen beträchtlichen Teil dieser Treibriemen. In jedem Fabriksaal etwa wurde ein Elektromotor aufgestellt, der die darin befindlichen Maschinen unter Beibehaltung der vorhandenen Transmissionen antrieb. Fast ein Jahrzehnt dauerte es, bis man einen weiteren Schritt wagte und plötzlich das Kampfgeschrei: Hie Gruppenantrieb, hie Einzelantrieb! ertönte. Die Anhänger des Gruppenantriebes machten geltend, daß der Elektromotor, wenn er eine ganze Gruppe von Werkzeugmaschinen zu treiben habe, im Durchschnitt ziemlich gleichblei-



895. Sacknähmaschinen mit Einzelantrieb
durch Gleichstrommotoren der AEG, Berlin

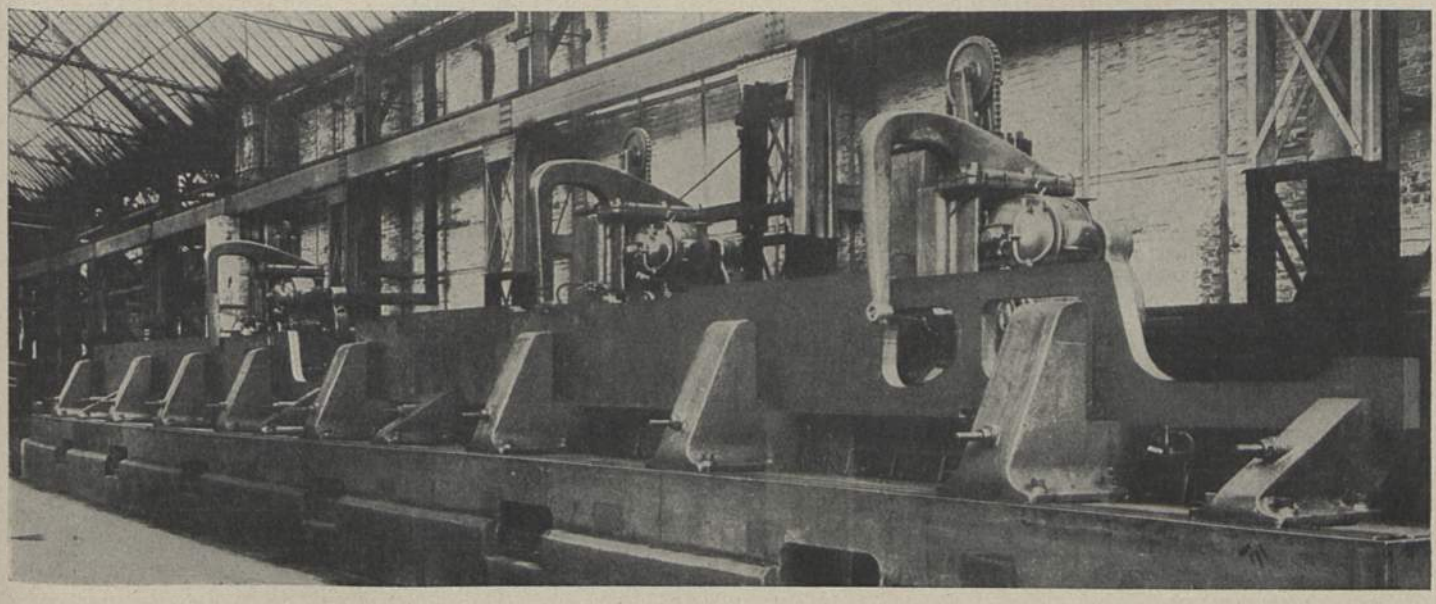
bend belastet werde, während eine einzelne Werkzeugmaschine eine sprunghafte und weniger günstige Ausnutzung des Motors bedinge. Heut ist der Gruppenantrieb nur noch für kleine Werkzeugmaschinen gebräuchlich. Für größere hat sich längst der Einzelantrieb erfolgreich durchgesetzt und für die ganz großen Werkzeugmaschinen benutzt man den Mehrmotorenantrieb derart, daß für jede Bewegung ein besonderer Motor vorgesehen ist, wie es in ganz ähnlicher Weise ja auch bei den elektrischen Kränen geschieht. Dabei sind die Motoren selbst so organisch mit dem Körper der Werkzeugmaschinen verbunden, daß es häufig recht guter Augen bedarf, um sie überhaupt zu entdecken.



896. Antrieb einer Revolverdrehbank durch einen regelbaren Gleichstrom-Spindelstockmotor
der Siemens-Schuckertwerke, Berlin

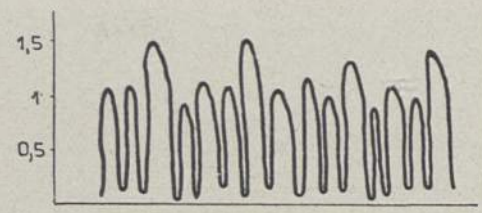
So zeigt Bild 892 eine große Vertikal-Plandrehbank der zum Demag-Konzern gehörenden Werkzeugmaschinenfabrik Schieß, Düsseldorf. Der Motor, welcher die Planscheibe treibt, befindet sich links von der Scheibe auf dem Maschinenkörper hinter dem oberen Gitter und ist auf den ersten Blick kaum zu finden. Bild 891 stellt eine Stoßmaschine der gleichen Firma dar. Zwei Elektromotoren sind rechts unten und in Mittelhöhe sichtbar, von denen der eine die Bewegung der Planscheibe, der andere die Bewegung des Drehstahls besorgt. In Bild 893 sehen wir eine große Plandrehbank der bereits genannten Firma. Zwei kleinere Motoren sind hier in der Mittelhöhe der Maschine sichtbar, der dritte größte, der die Drehung der Planscheibe besorgt, ist nicht zu sehen. Bild 897 zeigt eine Maschine zur Bearbeitung schwerer stählerner Lokomotivrahmen. Es sind drei Elektromotoren sichtbar, doch ist damit die Zahl der überhaupt vorhandenen Motoren noch nicht erschöpft. Bild 896 zeigt den Antrieb einer Revolverdrehbank durch einen regelbaren Gleichstrom-Spindelstockmotor der Siemens-Schuckertwerke. Hier handelt es sich um eine Werkzeugmaschine, die wesentlich kleiner ist als die in den bisher genannten Bildern gezeigten. Beachtenswert ist auch hier die organische Verschmelzung des Motorkörpers mit dem Werkzeugmaschinengestell, die den Motor schwer erkennen läßt. Die Leistung der Antriebsmotoren geht bei den kleinsten Werkzeugmaschinen bis zum zehnten Teil einer Pferdestärke hinunter. Gewiß ein starker Sprung von den 15 000pferdigen Walzwerkmotoren bis dahin.

Sehen wir uns weiter in der Industrie nach Elektromotoren um, so müssen wir sehr schnell die Feststellung machen, daß es heute überhaupt kein Gebiet mehr gibt, auf dem der Elektromotor nicht längst Bürgerrecht gewonnen hätte. Ganz allgemein kann man alle Betriebe in ortsfeste und ortsbewegliche einteilen. In einigen ortsbeweglichen Betrieben, nämlich im Verkehrswesen und für gewisse landwirtschaftliche Arbeiten, wie Pflügen, Säen und Ernten, macht der leichte Explosionsmotor dem Elektromotor erfolgreich Konkurrenz, da er nicht an eine Stromzuführung gebunden ist, sondern seinen Energievorrat in Gestalt einiger Liter Benzin mit sich zu führen vermag. So haben wir im Verkehrswesen die Benzinkraftwagen und Motorboote, in der Landwirtschaft die leichten Benzintraktoren. An allen anderen Stellen aber dominiert der Elektromotor. Ihn an allen seinen Verwendungsstellen zu verfolgen,



897. Spezialwerkzeugmaschine mit mehrmotorigem elektrischen Antrieb für die Bearbeitung schwerer Lokomotivrahmen
Maschinenfabrik Schieß A.-G., Düsseldorf

hieße die gesamte Industrie in allen ihren Einzelheiten und Betriebsanlagen zu besprechen und würde an dieser Stelle zu weit führen. Nur sprungweise kann hier dies große Gebiet durchquert werden. Dabei ist aber allen diesen unzähligen Anwendungsgebieten des Elektromotors das eine gemeinsam, daß der Motor der Eigenart der anzutreibenden Maschinen genau angepaßt wird, daß Motor und Maschine wirklich ein organisches Ganzes bilden. Das war in den Anfangstagen der Starkstromtechnik nicht immer der Fall. Damals kam für die neue technische Betätigung auch ein neues Wort auf. Man nannte das Einbauen irgendwelcher elektrischer Anlagen kurzweg Installieren und sprach von dem neuen Beruf der Installateure. In Wirklichkeit war dieses neue Wort aber ein sehr altes. Im mittelalterlichen Latein bedeutet stallus den Kirchenstuhl eines Domherrn. Die Einführung eines höheren Geistlichen in sein Amt, wobei er zum erstenmal in seinem Kirchenstuhl feierlich Platz nahm, hieß die Installation. Man wird zugeben müssen, daß keine besondere Ähnlichkeit zwischen diesem alten Kirchenbrauch und dem Einbau eines Elektromotors besteht, aber das Wort Installieren mit allen seinen Ableitungen hat sich in der Starkstromtechnik gehalten und heute auch hier einen ganz bestimmten Sinn und Inhalt bekommen. Es ist nicht mehr ein Zusammenbauen zweier herzlich schlecht zueinander passender Maschinen unter Zwischenschaltung eines Zahn- oder Riementriebes, sondern eine wirkliche technische Neuschöpfung unter weitestgehender Anpassung der treibenden an die getriebene Maschine.



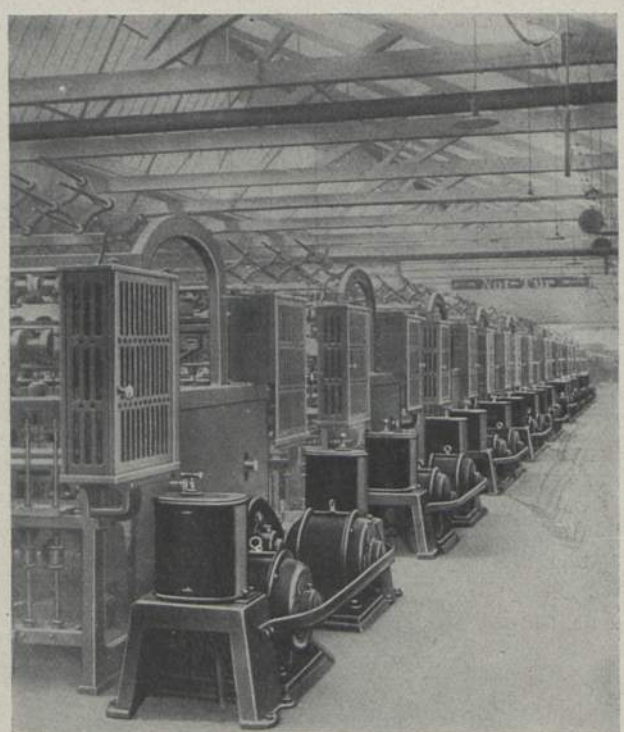

898. Energieverbrauchskurve eines Jutewebstuhls

Die Kurve schwankt zwischen 0,05 und 1,5 Pferdestärken. Jeder Spitze entspricht ein Durchschießen des Webschiffchens durch die Kette

Betrachten wir nun einige der vielen Anwendungsgebiete des Elektromotors. Da ist die Zementindustrie. Welche Rolle der Zement heut unter den Baustoffen spielt, geht vielleicht aus der Tatsache hervor, daß Deutschland schon vor dem Kriege jährlich neun Millionen Tonnen Zement erzeugte und dabei drei Millionen Tonnen Kohle verbrauchte, d. h. rund 10% mehr als die gesamte deutsche Schiffahrt. Der bei weitem größte Teil dieser Brennstoffmenge dient der elektrischen Energieerzeugung, denn vom Eintreffen der Rohstoffe in der Zementfabrik bis zu ihrem Verlassen in Form fertigen Zements besorgen die Elektromotoren alle Arbeit. Da gibt es Vorzerkleinerungs- und Schlämmaschinen, Rohrmühlen, Pumpen und Pressoren, rotierende Brennöfen, mechanische Kohlenaufbereitungen, Zementmühlen, Packereimaschinen und die mannigfachsten Transporteinrichtungen. Besondere Aufmerksamkeit ist gerade in diesem Betriebe der Entstaubung durch Elektroventilatoren und Elektrofilter zu widmen, und schließlich gehört zu jeder Zementfabrik eine eigene recht bedeutende Faßfabrikation mit zahlreichen elektromotorisch angetriebenen Holzbearbeitungsmaschinen.

Da ist vor allem ein Drehrostofen, in dem die Rohmaterialien gebrannt und durch einen elektromotorisch angetriebenen Drehrost kontinuierlich entleert werden. Ein elektrisch betriebenes Paternosterwerk holt die bereits fein vermahlenen, gemischten und angefeuchteten Rohstoffe auf die Ofengicht, wo sie von einer ebenfalls elektrisch betriebenen Presse brikettiert werden. Die fertigen Brikette gelangen automatisch in den Ofen und werden hier bis zum Sintern gebrannt. Das aus dem Ofen entleerte und gekühlte Material wird in starken Mühlen auf die bekannte staubförmige Beschaffenheit des Zements vermahlen und dann durch wiederum automatisch betriebene Füllmaschinen in Säcke oder Fässer gefüllt. Bild 894 zeigt eine Sackpackmaschine der Firma Amme, Giesecke & Konegen mit einem elektromotorischen Antrieb der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft.

Ein anderes großes Gebiet, auf dem der Elektromotor vollkommen unentbehrlich geworden ist, ist die Textilindustrie. Den Rohstoff bilden hier Fasern aller Art, die in der Spinnerei auf Garne und Seile verarbeitet, in der Weberei zu Zeugstoffen aller Art verwebt werden. Der Arbeitsprozeß beginnt in der Spinnerei mit den Öffnern und Schlagmaschinen, die das hydraulisch gepreßte Rohmaterial auflockern, und führt über die Karden und Streckmaschinen zu den Vorspinnmaschinen. Die weitere Verarbeitung des von diesen gelieferten Vorgarnes übernehmen die Feinspinnmaschinen, die man in Selfaktoren, Flügelfeinspinnmaschinen und Ringspinnmaschinen einteilt. Für alle diese Maschinen ist der elektrische Antrieb heut eine absolute Selbstverständlichkeit. Bild 899 gibt einen Blick in den Feinspinnsaal mit elektrisch angetriebenen Flügelfeinspinnmaschinen. Gerade diese Maschine braucht einen besonderen Antrieb. Ihr Ingangsetzen muß sehr langsam und ohne jeden Ruck erfolgen, da die Massen der Spulen durch den Fadenzug beschleunigt werden und jedes ruckweise Vorwärtseilen der Spindel den Faden zerreißen würde. Die Starkstromtechnik hat deshalb besondere Spinnmotoren mit sanftem Anlauf geschaffen. Es sind Drehstrommotoren mit verstärkter Kurzschlußwicklung, die das Anzugsmoment herabsetzt und an Ort und Stelle durch weiteres Abdrehen der Eigenart der Spinnmaschinen genau angepaßt werden kann.



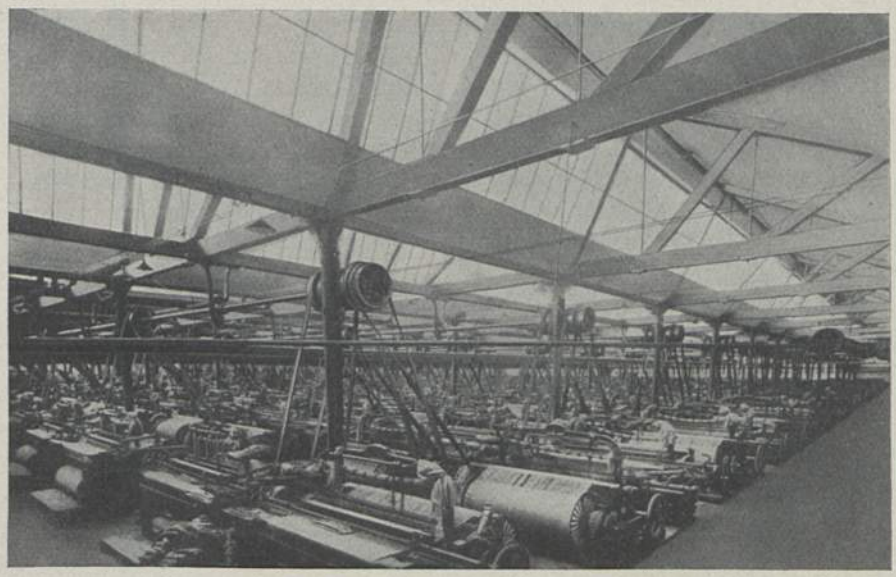
899. Flügelfeinspinnmaschinen

mit je zwei Spinnmotoren der AEG für je 5,5 Pferdestärken und 950 Umdrehungen in der Minute, mit Kontrollerschaltern mit eingebauten Sicherungen

Die fertigen Garne, Zwirne und dergleichen bilden das Ausgangsmaterial für die Weberei. Das Weben setzt sich aus zwei Hauptbewegungen zusammen, und zwar der Bewegung des

Kettenfadens und der des Schußfadens. Die Kette eines Gewebes wird von den in der Längsrichtung des entstehenden Gewebestreifens liegenden Fäden gebildet, die sich während des Webevorganges allmählich von dem Kettenbaum abwickeln, während sich an der anderen Seite des Webstuhles das entstehende Gewebe allmählich auf dem Warenbaum aufwickelt. Dabei werden bestimmte Fadengruppen der Kette, die sogenannten Fächer, abwechselnd gehoben, und es kommt nun darauf an, den zur Kette senkrecht verlaufenden Faden durch das geöffnete Fach hindurchzuschleudern oder hindurchzuschießen. Bei der Kettenbewegung kommen Störungen und damit Fadenbrüche selten vor. Weit schwieriger ist die mechanische Erzeugung der Schußfadenbewegung. Bild 900 zeigt einen Webereisaal mit veralteten Transmissionsantrieben. Hier sieht man noch den alten Riemenwald vergangener Zeiten, der nicht nur den Arbeitssaal verdunkelt, sondern auch eine ernste Gefahr für die Arbeiter bedeutet. Bild 901 zeigt den gleichen Webereisaal nach Einführung des elektrischen Zahnradeinzelantriebs. Jeder einzelne der vielen hundert Webstühle hat jetzt seinen eigenen Webstuhlmotor mit einer Durchschnittsleistung von einer Pferdestärke erhalten, und der ganze Raum ist licht und übersichtlich geworden. Während bei der Spinnerei meistens eine vollkommen gleichbleibende Belastung des Antriebsmotors stattfindet, ist die Belastung des Webstuhlmotors geradezu typisch für eine stoßweise Beanspruchung. Bild 898 zeigt die Leistung eines solchen Motors, die in schmalen, scharf ausgesprochenen Spitzen zwischen Leerlauf und einer Leistung von 1 bis 1,5 Pferdestärken schwankt. Diese Kurve wurde am Motor eines Jutewebstuhles von 140 Zentimetern Stoffbreite aufgenommen. Jede Spitze entspricht dem Durchschießen des Schußfadens durch die Kette. Die Leistung wird für die dabei notwendige Beschleunigungsarbeit verbraucht.

Begreiflicherweise haben auch die elektrischen Schalter in diesem Betriebe eine besondere Ausbildung erfahren. Sie sind so mit einem hebelartigen Handgriff gekuppelt, daß der Weber von seinem Stand aus den Stuhl mit einem Handgriff stillsetzen oder ausschalten kann.

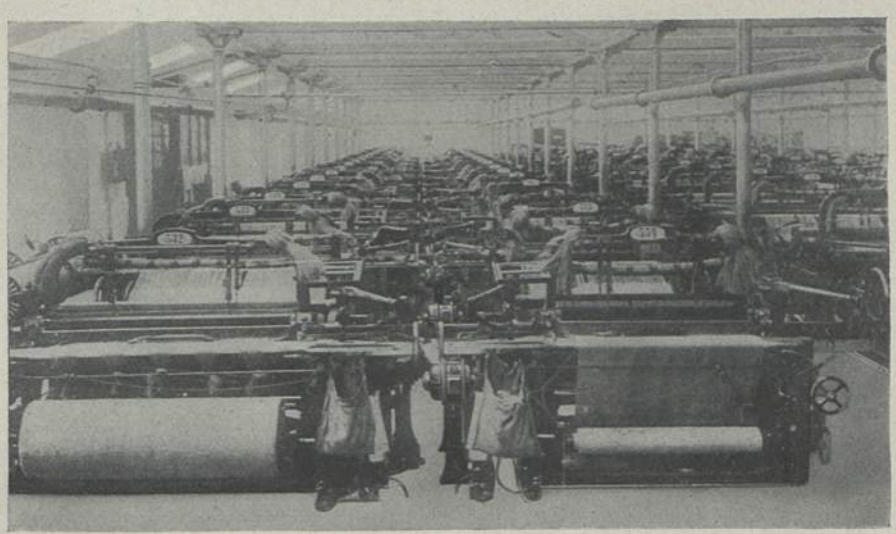


900. Webereisaal mit veralteten Transmissionsantrieben
Ein Riemenwald verdunkelt den Raum

Der Stoff, der den Webstuhl verläßt, hat noch mancherlei andere Behandlungen durchzumachen. Er wird gefärbt, eventuell gesengt und geschoren, gewaschen, mit farbigen Mustern bedruckt und schließlich getrocknet, geglättet und mit Glanz versehen. Alle die Maschinen, die diesen Arbeiten dienen, haben elektrischen Antrieb.

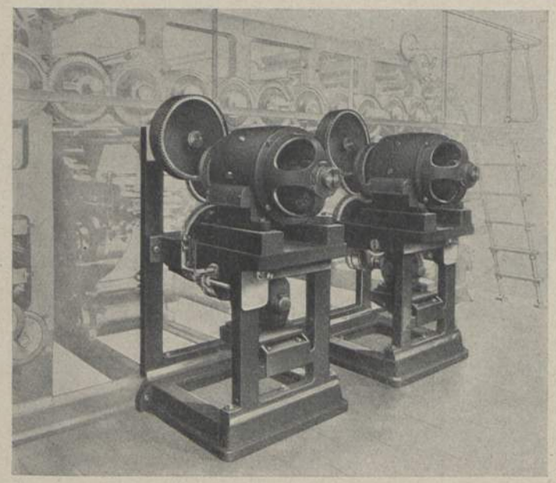
Das Schicksal jedes fertigen Stoffes ist es schließlich immer, mit Nadel und Faden in Berührung zu kommen, irgendwie zugeschnitten und vernäht zu werden. Es versteht sich, daß auch hierbei die Elektrizität eine Rolle spielt. So zeigt Bild 895 mit Gleichstrommotoren angetriebene Nähmaschinen in einer Sackfabrik.

Ein weiteres bedeutendes Gebiet, in dem der Starkstrom dominiert, ist das Druckereigewerbe. Die Druckmaschinen arbeiten heutzutage ausschließlich mit elektrischem Antrieb. So zeigt Bild 903 eine große 96seitige Zeitungs-Rotationsmaschine, die durch zwei Gleichstrommotoren von je 34 Pferdestärken angetrieben wird. Bild 902 gibt Einzelheiten des elektrischen Antriebs einer solchen Maschine. Gerade die Druckmaschinen stellen außerordentlich weitgehende Anforderungen an die Regelbarkeit der Antriebsmotoren. Darüber hinaus muß man bei jeder dieser Maschinen noch zwei vollkommen voneinander verschiedene Betriebsweisen unterscheiden, nämlich einen ganz langsamen und absatzweisen Lauf beim Zurichten des Druckes und beim Einziehen des endlosen Papiers und den vielmal schnelleren Betriebslauf während des Druckens. Man kann dieser Anforderung nur dadurch gerecht werden, daß man für den erstgenannten Betrieb noch einen schwachen Hilfsmotor vorsieht, der sich beim Übergang zum Drucken selbsttätig ausklinkt und ausschaltet.



901. Der gleiche Webereisaal mit elektrischem Zahnradeinzelantrieb
Ausführung der AEG, Berlin

Es versteht sich von selbst, daß auch die Herstellung des Rohstoffes für die

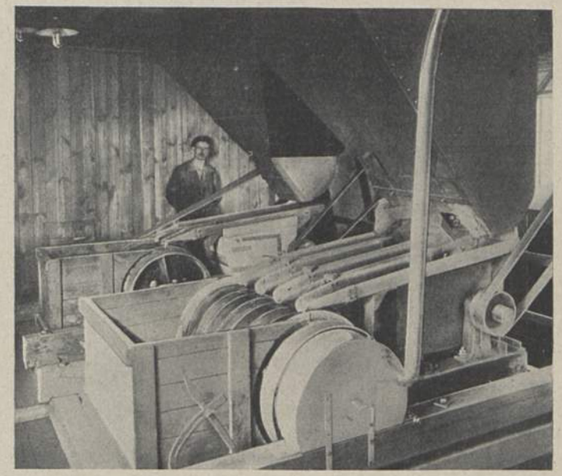


902. Details des elektrischen Antriebs einer Zeitungs-Rotationsmaschine

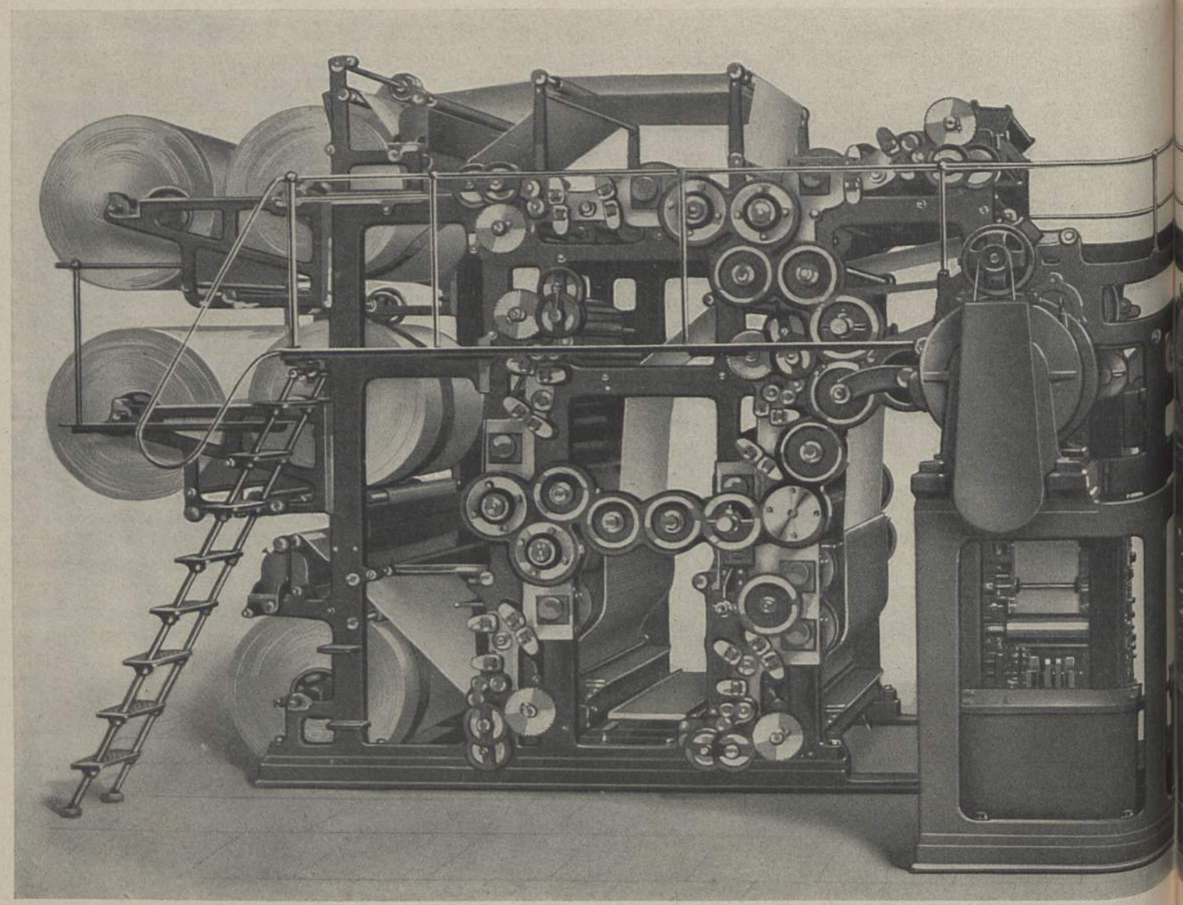
Druckereien, des Papiers, in weitestgehendem Maße unter Zuhilfenahme der Elektrizität erfolgt. Die Papierfabrikation geht ihrerseits vom Holz und Stroh als den zellulosehaltigen Rohstoffen aus, die zunächst vollkommen zu zerfasern sind. Beim Holz geschieht dies durch Schleifmaschinen. Schwere Schleifsteine aus Sandstein rotieren, von sehr kräftigen Elektromotoren angetrieben, während die einzelnen Holzklötze unter reichlicher Wasserzufuhr so gegen den Stein gedrückt werden, daß sie in der Längsrichtung zerfasern. Beim einfachen Holzstoffpapier wird der so gewonnene Holzschliff in den Holländern weiter zerkleinert und dann den Papiermaschinen zugeführt. Bei dem viel edleren Zellstoffpapier wird der Holzschliff erst auf chemischem Wege von allen schädlichen Beimengungen befreit, die ja das schnelle Vergilben und Brüchigwerden des Holzstoffpapiers verursachen. Das Ergebnis dieser chemischen Reinigung ist eine reine Zellulose, die der besten aus Lumpen gewonnenen Papiermasse gleichwertig ist und nun ebenfalls den elektromotorisch angetriebenen Holländern und der Papiermaschine zufließt. Es folgt noch das Satinieren des fertigen Papiers auf besonderen Kalandern, womit die Fabrikation ihr Ende erreicht. Der Energiebedarf der Papierfabriken ist recht erheblich. Die Holzschleifmaschinen verlangen je nach ihrer Größe Antriebsmotoren mit Leistungen von 50 bis 700 Kilowatt. Der Energiebedarf der Holländer schwankt von 10 bis 50 Kilowatt. Der Bedarf der Papiermaschine hängt selbstverständlich auch von ihrer eigenen Leistung ab. Man rechnet etwa 3 Kilowatt für jede innerhalb 24 Stunden fabrizierte Tonne Papier. Die Kalander beanspruchen 25 bis 50 Kilowatt. Auch hier ist eine weitgehende Regulierung erforderlich, und man erreicht sie gewöhnlich durch die Anwendung der bereits auf Seite 484 besprochenen Leonard-Schaltung. Der Papiermaschinenmotor ist dabei ein Nebenschlußmotor mit fremder Felderregung und infolgedessen innerhalb sehr weiter Grenzen regelbar.

Eine der Industrien, in welche die Starkstromtechnik schon sehr früh Eingang gewann, ist die Zuckerindustrie. Sie bezweckt die Gewinnung von reinem Zucker aus den Zuckerrüben. Die erste Tätigkeit in der Zuckerfabrik besteht in einer sehr gründlichen Wäsche der Rüben, die restlos von aller Ackererde gereinigt werden müssen. In der Rübenschwemme, einer flachen, schwachgeneigten Betonrinne, werden die Rüben in einem Strome frischen Wassers einem Rübenhubrad zugespült und schon dabei gut vorgewaschen. Das Rad hebt sie in die Rübenwaschmaschine, nach ihrer Wirkungsweise wohl auch Quirlwäsche genannt.





904. Magnetischer Aschenscheider mit elektrischem Antrieb
Ausgeführt vom Grusonwerk der Friedrich Krupp A.-G.

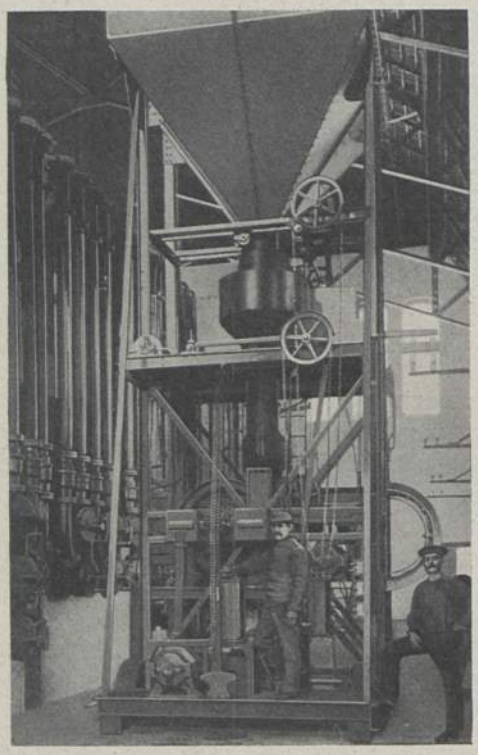


903. 96seitige Zeitungs-Rotationsmaschine mit vollautomatischem Gleichstrom-Zweifachantrieb
Leistung der Motoren: je 34 Pferdestärken. Bauart der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (MAN) und der Siemens-Schuckertwerke

Nach dieser Waschung kommen die Rüben in die ebenfalls motorisch angetriebene Schnitzelmaschine, in der sie durch schnell rotierende Messer in feine Scheiben, die Schnitzel, zerschnitten werden. Auf dem Boden eines etwa 2 Meter weiten Behälters dreht sich eine Scheibe mit eingesetzten Messern mit etwa 150 Touren und einem Kraftaufwand von etwa 7 bis 15 Kilowatt.

Der nächste Arbeitsprozeß der Saftgewinnung und Saftreinigung ist rein physikalisch-chemischer Natur und fordert keinen motorischen Antrieb. Wohl aber die Schnitzelpresse, in welcher die ausgelaugten Schnitzel unter starkem Druck fast trockengepreßt werden, um sofort als Viehfutter in die Landwirtschaft zurückzuwandern.

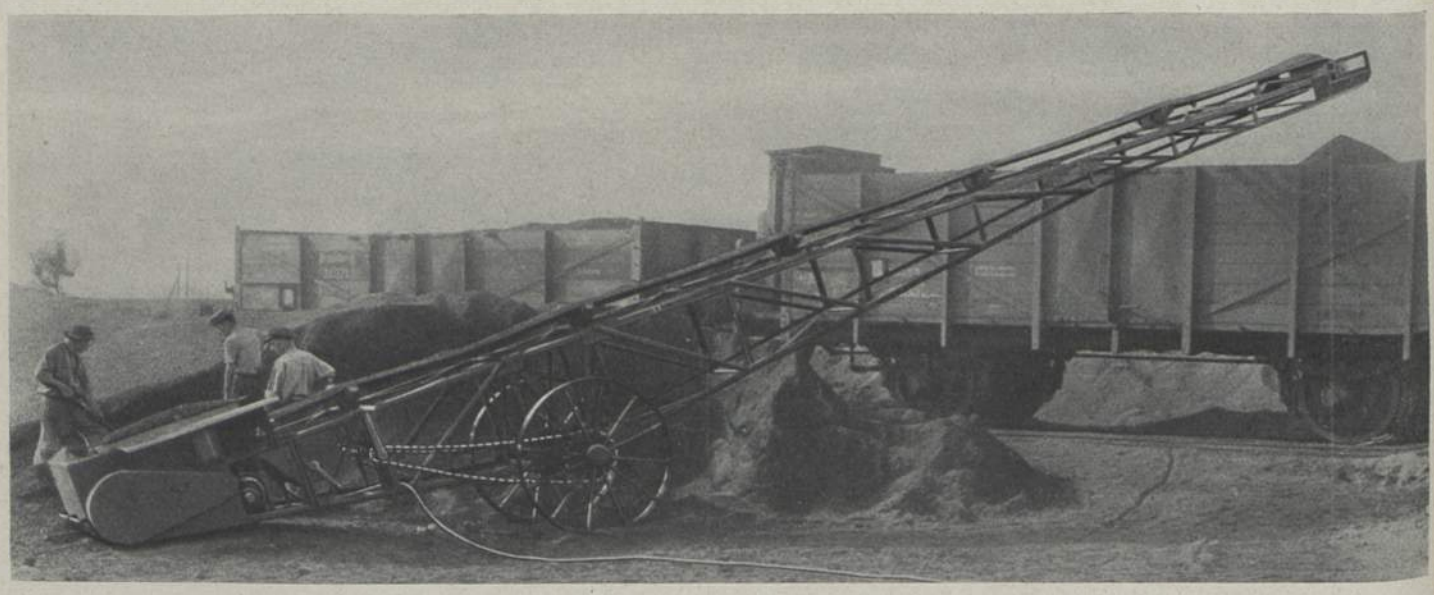
Der gewonnene Saft wird in den sogenannten Scheidepfannen erwärmt, mit Kalkmilch zersetzt und durch eingeblasene Kohlensäure geklärt. Dabei muß ein elektromotorisch angetriebenes Rührwerk den Saft beständig in Bewegung halten. Auch das Durchblasen der Kohlensäure durch den heißen Saft erfordert einen besonderen motorischen Antrieb. Im weiteren Verlaufe der Fabrikation muß der bis zur Kristallisation eingedampfte Zuckersaft dann von dem anhaftenden Sirup auf Zentrifugen befreit werden, und gerade in den Zentrifugenanlagen der Zuckerfabriken und Zuckerraffinerien spielt der Elektromotor eine sehr wichtige Rolle. Die Zentrifugen stehender Bauart werden durch darunter befindliche Drehstrommotoren mit Kurzschlußanker angetrieben. Der Energiebedarf der einzelnen Zentrifuge mit etwa 15 Kilowatt ist dabei gar nicht so hoch. Da aber eine größere Zuckerfabrik mehrere hundert Zentrifugen in Betrieb hat, kommen doch ganz ansehnliche Motorleistungen zusammen.



905. Lade- und Stoßmaschine
mit elektrischem Antrieb auf dem Gaswerk Koburg. Die Maschine füllt die Retorten mit frischer Kohle und stößt nach vollendeter Destillation den übrigbleibenden Koks aus der Retorte. Ausgeführt von der Bamag, Berlin

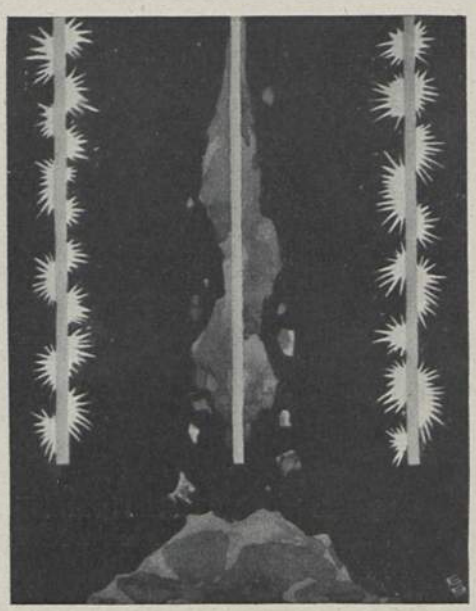
Der Betrieb in Zuckerfabriken ist feucht und klebrig und gerade nicht die geeignetste Umgebung für einen Elektromotor. Es war daher notwendig, die Motoren und alle Zubehörapparate gut zu kapseln und Sonderkonstruktionen zu entwickeln. Die noch ziemlich junge Elektroindustrie stand gerade bei der Elektrifizierung der Zuckerfabriken zum erstenmal vor einer derartigen Aufgabe und hat sie gut gelöst. Auch für den damals noch sehr jungen Drehstrommotor mit Kurzschlußanker bildeten die Zentrifugen der Zuckerfabriken das erste Arbeitsgebiet, und er hat sich dort so bewährt, daß er auch heut nach fast 35 Jahren noch mit Vorliebe dazu genommen wird. Im weiteren Verlauf führt die Fabrikation dann zu den Zuckerzerkleinerungsmaschinen, die für die Herstellung von Würfelzucker als Zuckersägen und Knipszangen, für die Herstellung von Streuzucker als Zuckerwalzmühlen arbeiten. Es folgt die Verpackung, wobei maschinelle Hilfsmittel, wie Sackfüllmaschinen (vgl. Bild 894), und dergleichen Verwendung finden.

Zum Schlusse mag noch eine Industrie betrachtet werden, in der wohl die wenigsten eine starke Anwendung von Elektromotoren vermuten dürften. Es ist die Gasindustrie. Bei der alten Rivalität zwischen Gas und Elektrizität könnte man glauben, daß die jüngere Konkurrenz hier nur schwer Eingang gefunden hätte. Aber das ist durchaus nicht der Fall. Die Gasanstalten haben erstens einmal einen recht erheblichen Verbrauch von Maschinenleistung, der am besten durch elektromotorische Antriebe befriedigt werden kann. Das beginnt bereits bei den Förderanlagen für Kohle und Koks, welche die Gaskohle vom Lagerplatz bis in die Retorten zu bringen und den



906. Fahrbare Vorrichtung mit elektrischem Antrieb zum Verladen von Koks vom Lager auf Fuhrwerke und Eisenbahnwagen
Ausgeführt von der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (MAN)

entfallenden Koks von dort wieder bis zum Lager zu schaffen haben. Da gibt es Verladebrücken, Krane, Führerstandlaufkatzen, fahrbare Koksverlader, Kipper und Elektrohänge- und Seilbahnen. Weiter Transportbänder, Elevatoren, Becherwerke, Schüttelsiebe, Aufzüge und Brecher für Kohle und Koks. Alle diese Einrichtungen, soweit sie der Förderung dienen, wurden in dem Abschnitt „Lastenförderung" dieses Bandes ausführlich besprochen. Es folgen die Spezialmaschinen zum Laden und Entladen der Retorten und zum Ablöschen des glühend aus den Retorten gedrückten Kokses. Zu diesen Maschinen treten dann mannigfache andere für die Weiterverarbeitung des gewonnenen Gases, wie Zentrifugen, Gebläse, Kompressoren, Sauger und Wascher, die verschiedenen Pumpen für Reinwasser, Ammoniakwasser und Teer und die Maschinen der Nebenbetriebe, wie Schlackenscheider, Schlackensteinpressen, Brikettpressen und dergleichen mehr. Außerdem aber spielt auch die elektrische Beleuchtung in den Gasfabriken eine besondere Rolle. Zahlreiche Abteilungen der Betriebe gelten als explosionsgefährlich und verlangen eine unbedingt explosionssichere Beleuchtung, die nur mit Hilfe der elektrischen Glühlampe hergestellt werden kann. So ergibt sich alles in allem ein Bedarf an elektrischer Energie, der bei kleineren Gasanstalten etwa 500 Pferdestärken beträgt, bei den Anstalten der Großstädte aber in die Tausende geht.



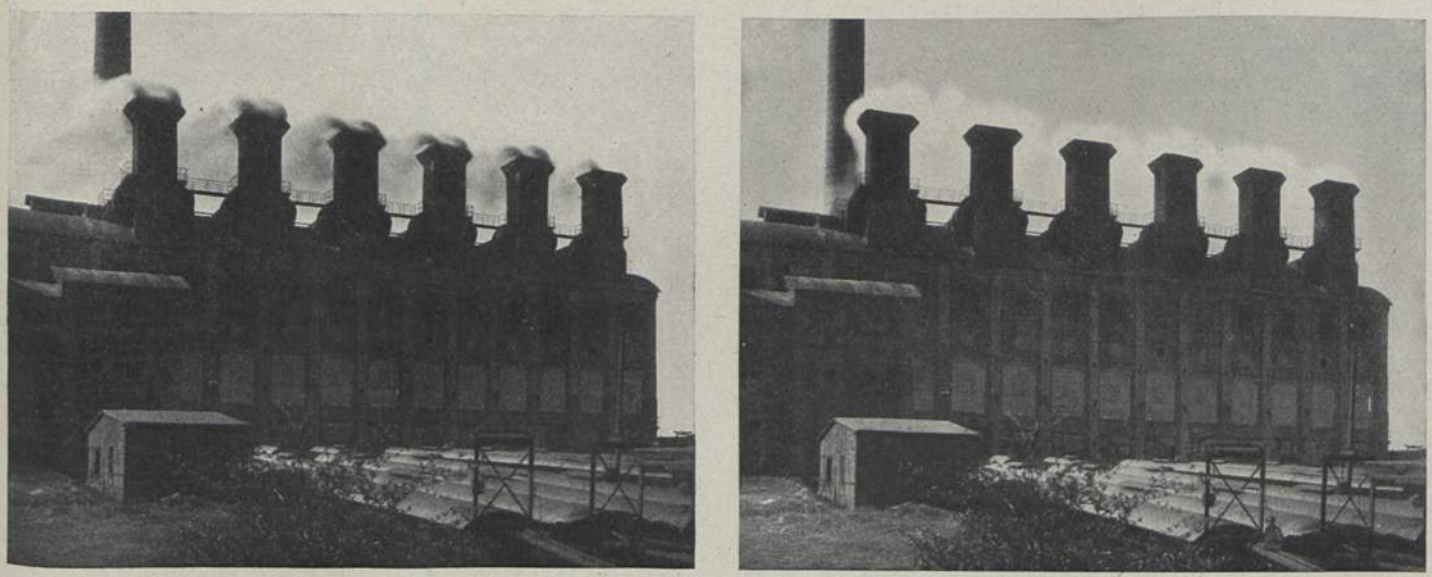
907. Wirkung der Sprüh- und Niederschlagselektroden des Elektrofilters
Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

Aus der Fülle der dabei vorkommenden elektrischen Antriebe sollen im folgenden nur einige für die Gasanstalten besonders charakteristische herausgegriffen werden. Vor allem kommt es darauf an, beim Transport der recht bedeutenden Kohlen- und Koksmassen die teure Handarbeit nach Möglichkeit zu sparen. So zeigt Bild 906 eine fahrbare Verladevorrichtung zum Verladen von Koks auf Fuhrwerke und Eisenbahnwagen. Die Einrichtung besteht aus einem auf zwei Rädern montierten eisernen Traggestell, auf dem ein Transportband aus Gummi läuft, das von einem anderthalbpferdigen Elektromotor angetrieben wird. Am unteren Ende schaufeln drei Mann den Koks auf das Band, oben wirft das Band ihn selbsttätig in die Wagen ab. Der Apparat, dem die elektrische Energie durch ein bewegliches Kabel zugeführt wird, leistet in der Stunde etwa 20 Tonnen, gestattet also innerhalb eines achtstündigen Arbeitstages die Beladung von 10 Güterwagen.

Für die Entladung der auf dem Gaswerk ankommenden Kohlenwagen bedient man sich dagegen der elektrischen Wagenkipper (Bild 4, Seite 4), die den ganzen Wagen fassen und auf einmal auskippen. Ein solcher Kipper entlädt normal etwa 10 Wagen mit je 15 Tonnen Ladung in einer Stunde. Der Antrieb erfolgt durch einen 40pferdigen Gleichstrommotor.

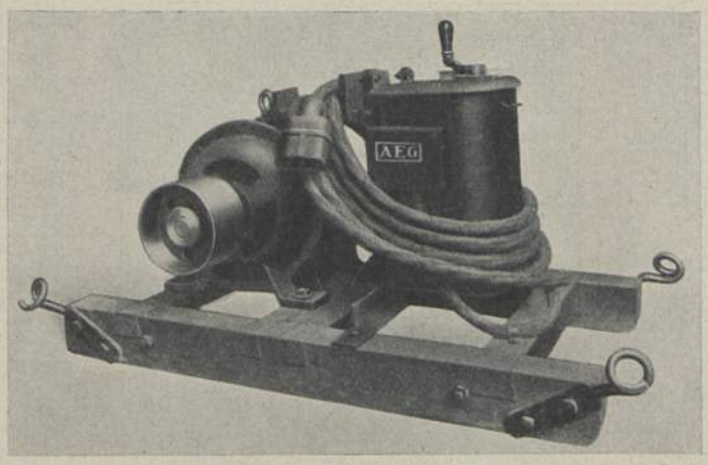
Für den Weitertransport der Kohle in horizontaler Richtung kommen besonders Transportbänder zur Verwendung, endlose breite Bänder mit Transportleistungen bis zu 30 Tonnen in der Stunde. Bild 17, Seite 9, zeigt ein solches Transportband. Etwas dem Transportband Verwandtes ist das Bradley-Werk, eine große Reihe kleinerer, auf Rädern laufender Transportgefäße, die gelenkig zu einer Art von Band oder Kette zusammengesetzt sind (vergl. Bild 30 und 31, S. 16) und die Verteilung der Kohle auf verschiedene Lagerstellen besorgen.

Der weitere Weg der Kohle führt zu den Retorten. Diese sind einerseits nach erfolgter Entgasung ihres Inhaltes von dem übrigbleibenden Koks zu befreien und andererseits mit frischer Kohlenfüllung zu versehen. Das erfolgt durch elektrisch betriebene Lade- und Stoßmaschinen (Bild 905), die zunächst den Koks aus der Retorte herausstoßen und danach frische Füllung geben. Die hier dargestellte Maschine hat drei Motoren für das Fahren, Laden und Stoßen. Der einzelne Motor hat durchschnittlich 5 Pferdestärken, und die Ausräumung und Neufüllung einer Retorte



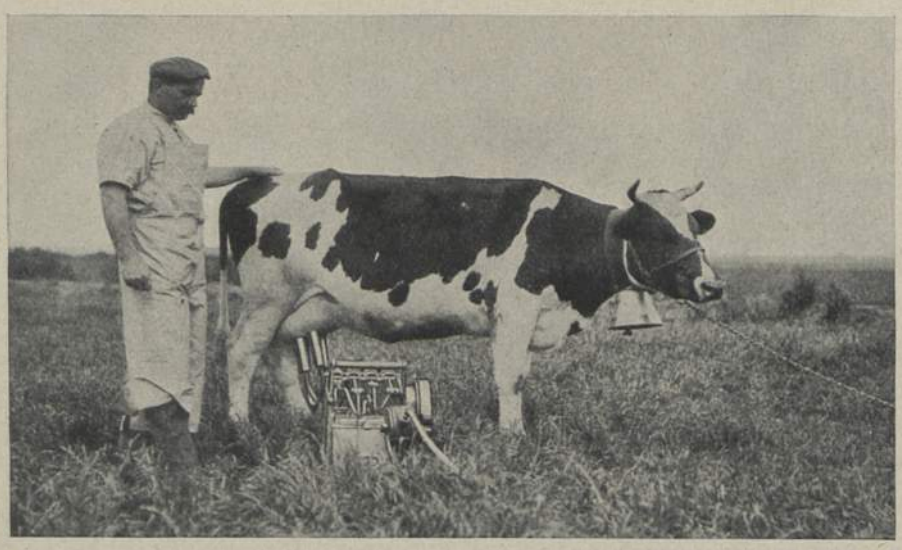
908. Braunkohlenbrikettfabrik im Rheinland mit elf Elektrofiltern
Links: Die Elektrofilter sind ausgeschaltet, dicke schwarze Rauchmassen entquillen den Schloten. Rechts: Die Filter arbeiten, nur schwacher weißer, von allen festen Bestandteilen befreiter Rauch kommt aus den Essen

erfolgt innerhalb zwei Minuten. Aus der Menge der anderen Maschinen sei als besonders bemerkenswert noch der elektromagnetische Aschenscheider erwähnt, durch den die Feuerungsrückstände der verschiedenen Kessel- und Retortenfeuerungen in Schlacke und noch unverbrannte Bestandteile geschieden werden. Der Apparat benutzt den Umstand, daß die Schlackenbestandteile der Verbrennungsrückstände stets, wenn auch in schwachem Maße, eisenhaltig und daher magnetisch beeinflußbar sind, die noch unverbrannten Teile dagegen nicht. Wie Bild 904 erkennen läßt, fällt das zu scheidende Gut, nachdem es durch ein Schüttelsieb nach verschiedenen Korngrößen getrennt wurde, in rotierende Trommeln. Hier werden die Schlackenstücke durch sehr starke Magnetfelder an die Trommelwandung herangezogen, eine halbe Umdrehung lang mitgenommen und erst nach dem Verlassen des Magnetfeldes abgeworfen. Dagegen fallen die unmagnetischen Teile des zu scheidenden Gutes glatt hindurch. Ein einstellbares Abfangblech gestattet weiter, die magnetischen und unmagnetischen Bestandteile der Verbrennungsrückstände getrennt aufzufangen. Schließlich muß an dieser Stelle noch einer eigentümlichen Anwendung der Elektrizität in dem „Elektrofilter" gedacht werden. In vielen Betrieben, wie beispielsweise in der Zementindustrie, der Mühlenindustrie, der chemischen Industrie und noch manchen anderen, tritt eine starke Staubentwicklung auf, und es ist unbedingt notwendig, die staubbeladenen Gase zu reinigen, bevor man sie in die Außenluft entläßt. Hier verdrängt nun das Elektrofilter in neuerer Zeit immer mehr die älteren mechanischen Reinigungsverfahren. Die Wirkung dieses Filters beruht auf der elektrostatischen Anziehung ungleichnamiger Elektrizitäten. Wenn eine Spitze, Kante oder ein Draht einer Platte oder einem dichten Drahtnetz in etwa zehn Zentimeter Abstand gegenübergestellt wird und beide mit den Klemmen einer Gleichstromquelle von etwa 50 000 Volt Spannung verbunden werden, so strömt aus der Spitze oder dem Draht, daher Ausströmer- oder Sprühelektrode genannt, die hochgespannte Elektrizität aus und lädt die Staubteilchen des Gases zwischen den Elektroden, so daß die Staubteilchen von der Platte oder dem Drahtnetz, Abscheide- oder Niederschlagselektrode genannt, angezogen werden und sich dort absetzen, bis sie von selbst oder unter der Wirkung einer Schüttelvorrichtung abfallen und sich in einem unterhalb der Elektroden angebrachten Trichter oder Graben sammeln, aus dem sie durch Ausfallverschlüsse oder Förderschnecken abgezogen werden. In den heutigen Elektrofiltern wird die Gasrichtung je nach den besonderen Erfordernissen entweder wagerecht oder lotrecht gewählt. Die Sprühelektroden sind als kleinflächige, meist gitterförmige Gebilde in Spezialmetall, von Rohrrahmen umfaßt, ausgeführt und entsprechend der Hochspannung isoliert befestigt. Die Niederschlagselektroden sind ebenso wie das Filtergehäuse und alle Getriebeteile geerdet und bestehen aus glatten oder gewellten Blechen oder Drahtsieben. Die Elektroden sind mit ihrer Ebene parallel der Strömungsrichtung der Gase angeordnet, so daß diese sich zwischen den Elektroden entlangbewegen.



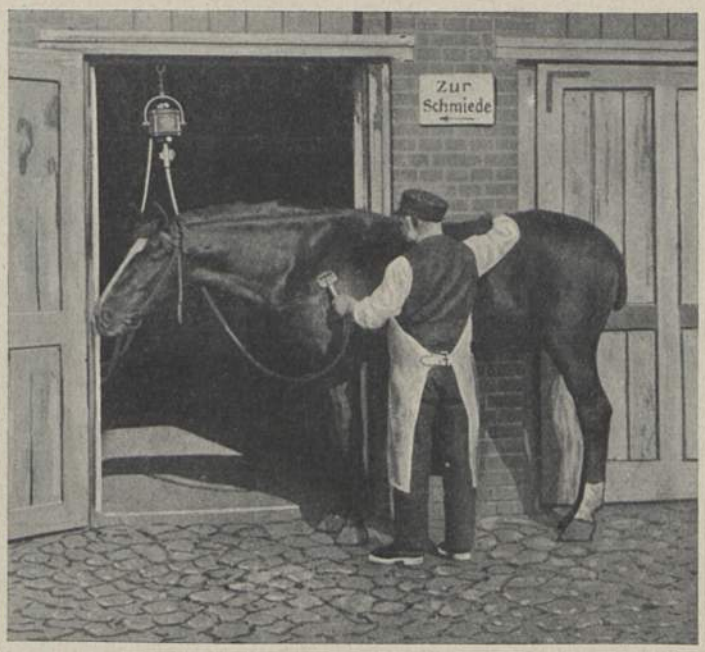

909. Motorschleife mit Schaltwalzenanlasser
Es ist nur eine Kurbel zu bedienen. Bauart AEG, Berlin

Bild 907 zeigt zwei Sprühelektroden und eine Niederschlagselektrode. Man sieht, wie der Staubgehalt des zwischen den Elektroden hindurchziehenden Gases unter dem Einfluß der elektrischen Ladung in kompakter Form niedergeschlagen wird. Die für den Betrieb des Elektrofilters notwendige hohe Gleichstromspannung läßt sich natürlich nicht direkt erzeugen, da kein Kollektor einer solchen Spannung gewachsen wäre. Man transformiert daher Wechselstrom in einem ruhenden Transformator auf die gewünschte Spannung und verwandelt ihn dann durch einen mechanischen Gleichrichter, der genau im Rhythmus der Stromwechsel umschaltet, in einen pulsierenden Gleichstrom. Der Energieverbrauch ist dabei sehr gering, da man es ja nicht mit einem eigentlichen Starkstrom, sondern nur mit einer Sprühentladung zu tun hat. Man rechnet etwa 0,1 bis 0,2 Kilowattstunden für 1000 Kubikmeter zu reinigenden Gases und erreicht dabei, daß bis zu 98% des Staub- und Rußgehalts niedergeschlagen werden. Wie sich die Wirkung dieser elektrischen Filter äußerlich dokumentiert, geht aus Bild 908 hervor. Es zeigt eine Braunkohlen-Brikettfabrik mit elf Elektrofiltern, einmal mit ausgeschalteten, das andere Mal mit arbeitenden Filtern. Bemerkenswert ist es, daß das Elektrofilter auch für die Reinigung heißer Gase mit Temperaturen bis zu 500 Grad Verwendung finden kann. Es schlägt nicht nur den ziemlich groben Staub der Textil- und Mühlenindustrie und jeglichen Ruß, sondern auch die feinsten Säurennebel der chemischen Industrie nieder.



910. Elektromotorisch betriebene Melkmaschine
Eine winzige Kreiselpumpe erzeugt ein Vakuum. Vom Vakuumkessel führen Leitungen zu den einzelnen Zitzen des Kuheuters. Durch das Vakuum wird die Milch ohne die sonst üblichen Melkprozeduren und ohne jede Verunreinigung in den Milchkessel gesaugt

Weiterhin findet es auch für die Entstaubung der Hüttengase weitgehende Verwendung. Ein paar Zahlen mögen seine wirtschaftlichen Vorzüge erläutern. In einer Brikettfabrik werden nach dem Einbau der Elektrofilter wöchentlich dreihundert Tonnen preßfähigen Braunkohlenstaubes aufgefangen, die früher in die Atmosphäre gingen und die Umgebung belästigten. In einer Zementfabrik werden durch ein kleines Elektrofilter die Mühlenräume von der zementhaltigen Staubluft befreit und daraus in jeder Woche 30 Tonnen Zementstaub wiedergewonnen. Neben diesen wirtschaftlichen Vorteilen hat das Elektrofilter aber auch eine große Bedeutung für die Volkswohlfahrt, die nicht unterschätzt werden darf.




911. Pferdeschur

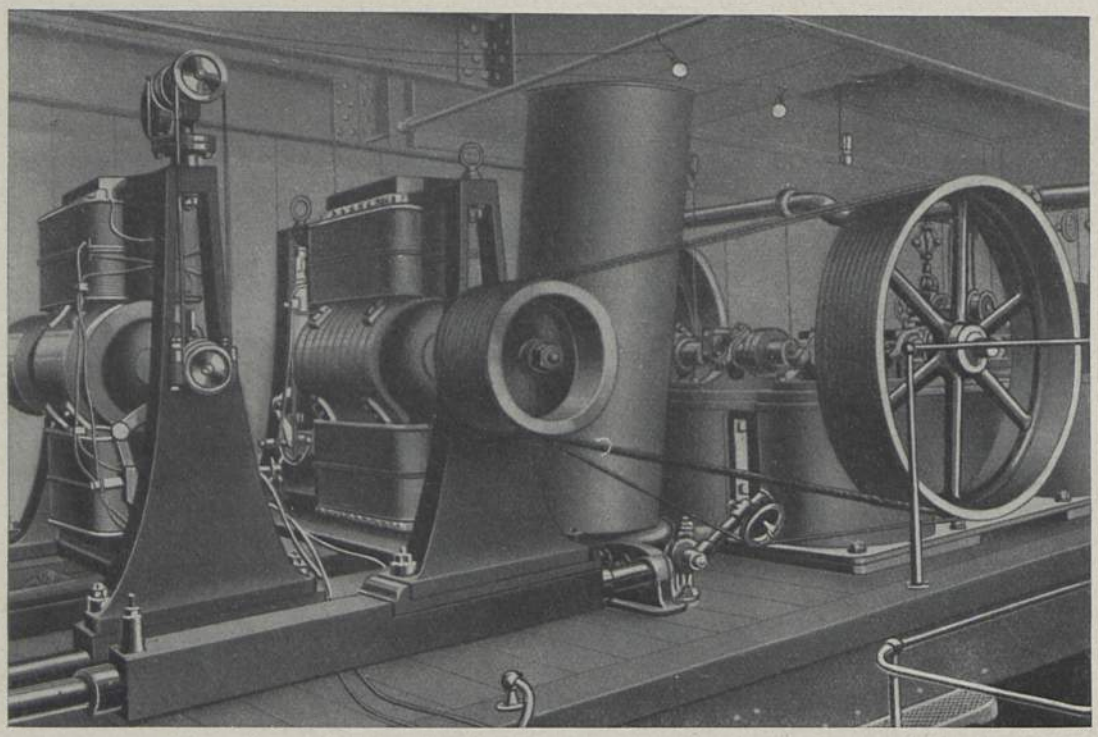
mittels elektromotorisch angetriebener Maschinenschere. Die elektrische Leitung führt zu dem oben links sichtbaren Elektromotor. Von dort führt eine biegsame Welle zur Maschinenschere. AEG, Berlin

*

Die Arbeiten und Verrichtungen der landwirtschaftlichen Betriebe zerfallen in ortsfeste und ortsbewegliche. Zu den letzteren gehören die gesamten Erntearbeiten, beginnend mit der Bodenbearbeitung durch Pflügen, Eggen usw. und endend mit dem Mähen und Garbenbinden. Diese Arbeiten müssen jeden einzelnen Punkt der ganzen großen, in Kultur stehenden Fläche treffen. Sie sind in noch viel höherem Grade ortsbeweglich als die Verkehrsunternehmungen. Während man diese, die sich schließlich immer nur auf einer einzelnen Linie oder Strecke bewegen, als eindimensional beweglich bezeichnen kann, muß man die landwirtschaftlichen Betriebe, die sich über die ganze Ackerfläche hin ausdehnen, als zweidimensional beweglich ansprechen. Unter diesen Umständen hat es recht lange gedauert, bevor hier überhaupt eine Mechanisierung eintrat, bevor die seit Jahrtausenden übliche tierische und menschliche Muskelkraft durch Maschinen ersetzt wurde. Dabei haben sich die Dinge so entwickelt, daß für diese Arbeiten der leichte landwirtschaftliche Traktor mit einem Explosionsmotor sich zurzeit wenigstens als das wirtschaftlichste Betriebsmittel erwiesen hat und die Versuche, elektrisch zu pflügen, zu säen und zu ernten, bis auf weiteres aufgegeben worden sind. Die Herrschaft des Elektromotors beginnt an der Stelle, wo die

912. Motorschleife in Verbindung mit einer Schlagleisten-Dreschmaschine

Bemerkenswert ist die einfache Verankerung der Schleife, um die Riemenspannung zu sichern. Der Motor drischt zu einer beliebigen Zeit nach der Ernte und wird sonst anderweitig ausgenutzt. AEG, Berlin

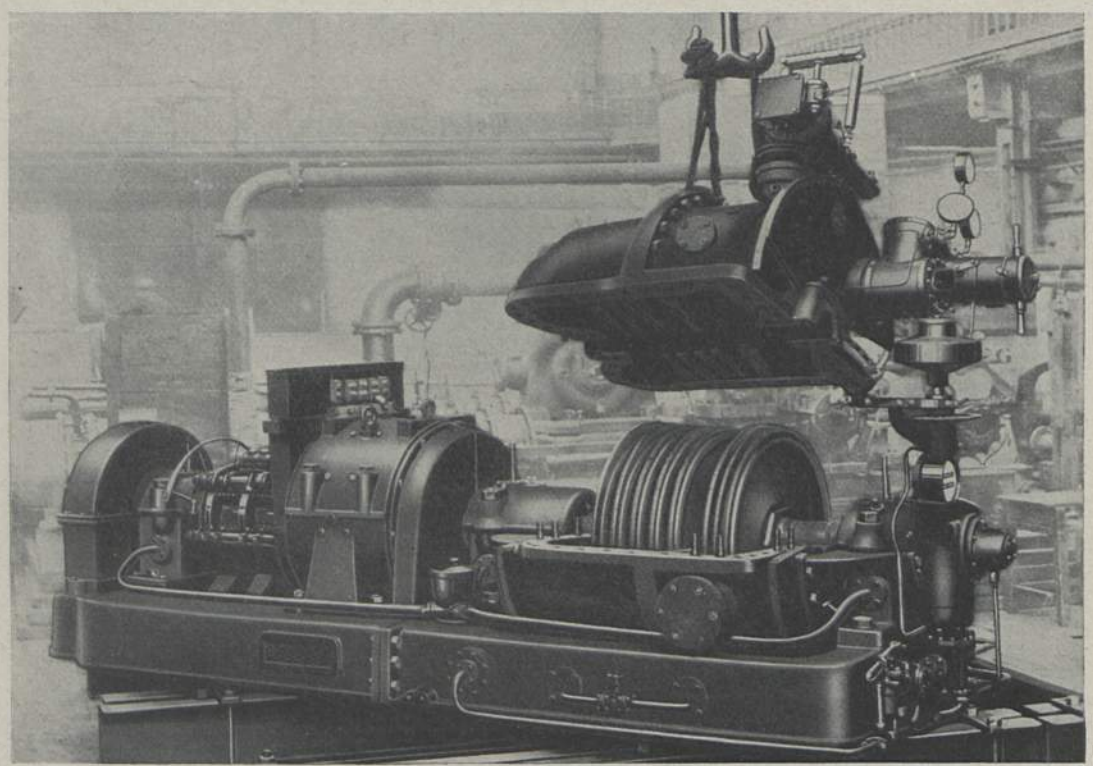


913. Schiffsdynamoanlage aus den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts
Ausgesprochene Schnelläufer von liegender Kolbendampfmaschine durch Seile angetrieben

Erntearbeiten verhältnismäßig ortsfest werden, nämlich beim Ausdrusch des Getreides.

Hier haben die großen Überlandzentralen reformierend gewirkt, welche die elektrische Energie auch bis in die kleinsten und abgelegensten Dörfer bringen und zu einem recht wohlfeilen Preise abgeben. Die einzelnen Landwirtschaften ließen sich so gut wie ausnahmslos an diese Werke anschließen, da die elektrische Beleuchtung den bis dahin allein vorhandenen primitiven und feuergefährlichen Beleuchtungsarten in jeder Hinsicht weit überlegen war und sich bereits durch die Verminderung der Versicherungsprämien bezahlt machte. War aber der elektrische Anschluß einmal da, so lag es auch nah, ihn für motorische Zwecke auszunutzen, und das ist denn auch reichlich und mit wirtschaftlich gutem Erfolge geschehen. Wo noch vor wenigen Jahren in landwirtschaftlichen Betrieben Göpelwerke und ähnliche durch tierische Muskelkraft bewegte Antriebsvorrichtungen in Gebrauch waren, da dominiert jetzt der Elektromotor.

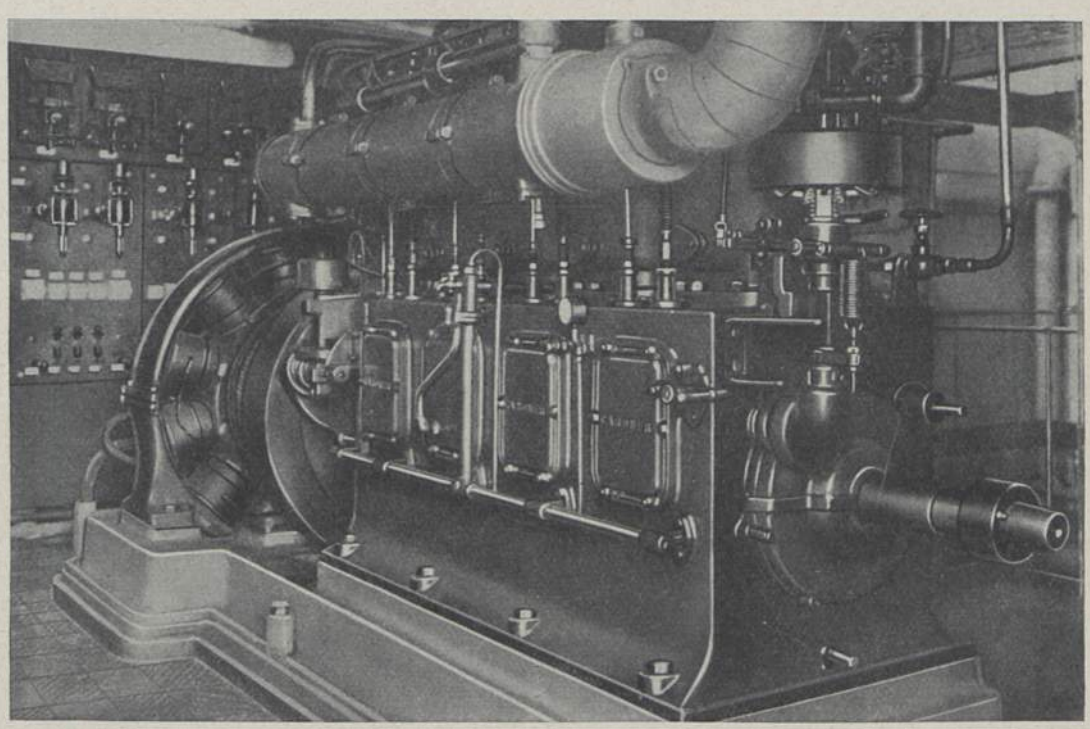
Die Größe und Art, in der er auftritt, hängt ganz von der Größe des betreffenden landwirtschaftlichen Betriebes ab. Diese entscheidet auch darüber, ob es sich lohnt, einen eigenen Dreschkasten und Motor zu beschaffen oder mit geliehenen oder auf genossenschaftlichem Wege beschafften Maschinen zu arbeiten. Für größere Betriebe sind eigene Dreschmaschinen mit einem Energiebedarf von 7,5 bis 35 Pferdestärken gebräuchlich, die in der Stunde 700 bis 2500 Kilogramm Getreide ausdreschen. Der dazugehörige Elektromotor wird bis zu einer Leistung von 15 Pferdestärken gewöhnlich nebst seinen Schalt- und Sicherungsapparaten auf einer einfachen stabilen Holzschleife montiert. Bild 909 zeigt eine solche Motorschleife der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft nebst Schaltwalzenanlasser und beweglichem Kabel. Die aus kräftigem Gebälk bestehende eisenbeschlagene Schleife kann über kleinere Strecken von Zugtieren gezogen werden. Für größere Entfernungen wird man sie auf einen Wagen setzen. Die stärkeren Motoren von 15 Pferdestärken an werden überhaupt besser von vornherein in einen besonderen Motorwagen eingebaut. Bild 912 zeigt die Motorschleife in Verbindung mit einem Dreschkasten beim Ausdrusch an der Scheune. Bei Ausdrusch auf freiem Felde mittels eines im Wagen eingebauten Motors wird die Energie vom nächsten Anschlußpunkt aus mittels beweglicher Kabel zugeführt. Als Anhaltspunkte für die Wirtschaft-



914. Neuzeitliches Schiffsaggregat, Dampfturbine und Dynamo
auf gemeinsamem Rahmen montiert. 220 Kilowatt bei 2200 Touren. AEG, Berlin

lichkeit des elektrischen Dreschens mögen die folgenden Zahlen dienen. Das Ausdreschen von 100 Kilogramm Körnern in Form marktfähigen Getreides beansprucht im Durchschnitt bei Roggen eine Kilowattstunde, bei Weizen 0,85, bei Hafer 0,80 und bei Gerste 0,75 Kilowattstunden.

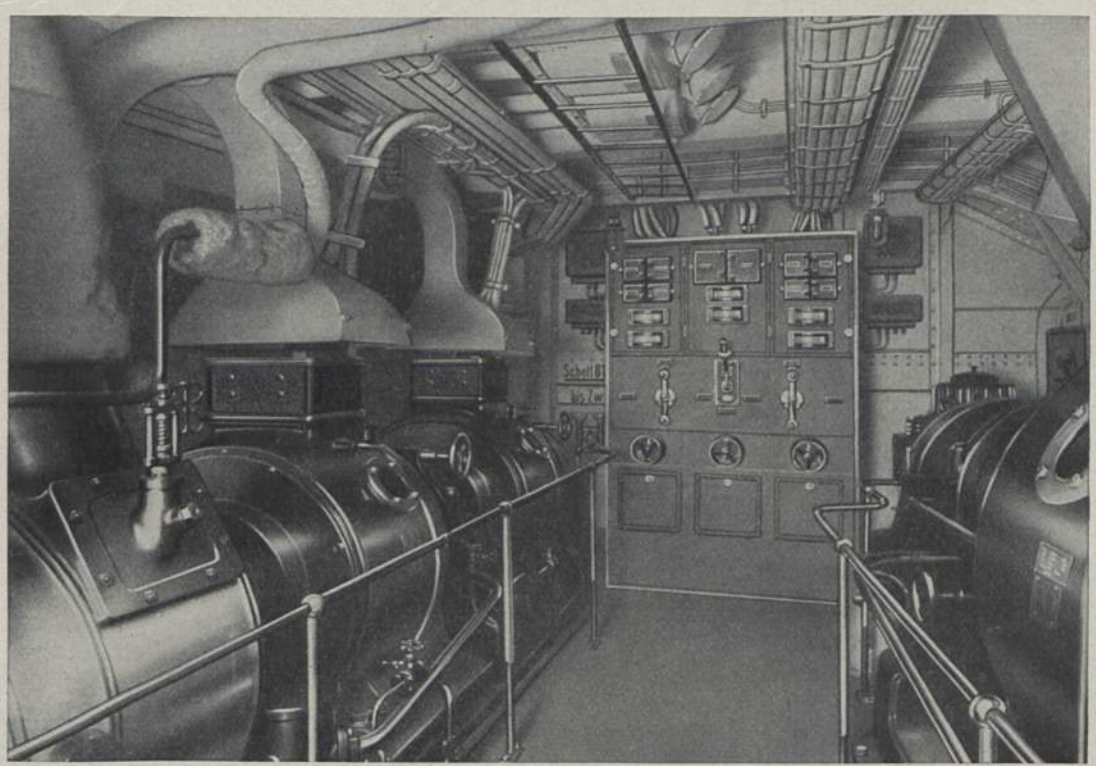
Außer dem Dreschen kommen in den landwirtschaftlichen Betrieben noch zahlreiche andere Arbeiten vor, die heut fast ausschließlich durch elektromotorischen Antrieb besorgt werden. Das Schneiden von Häcksel und von Rüben, das Schroten von Getreide und das Brechen von Ölkuchen gehören zur Futterbereitung. Der Leistungsbedarf dieser Arbeiten richtet sich naturgemäß nach der Größe der Viehhaltung, erfordert aber im Durchschnitt Motoren von zwei bis fünf Pferdestärken. Man wird auch hier wieder eine Motorschleife wählen, die sich bequem zu den verschiedenen Maschinen hintransportieren und durch einen Riementrieb mit ihnen verbinden läßt.



915. Benzoldynamo für 50 Kilowatt bei 500 Umdrehungen in der Minute
Das Aggregat ist von der Dampfversorgung durch die Schiffskessel unabhängig. AEG, Berlin

Ein weiteres Arbeitsfeld für den Elektromotor geben die Speicherarbeiten, die insbesondere der Erhaltung, Reinigung und Trocknung des ausgedroschenen Getreides dienen. Andere Speichermaschinen sind die Stoppelmaschinen für Rübensamen, die Kartoffelsichtmaschinen und die Kartoffelwaschmaschinen. Alle diese Maschinen sind in jedem gut geleiteten Betriebe vorhanden und erfahren durch den elektromotorischen Antrieb eine bedeutende Erhöhung ihrer Leistungsfähigkeit.

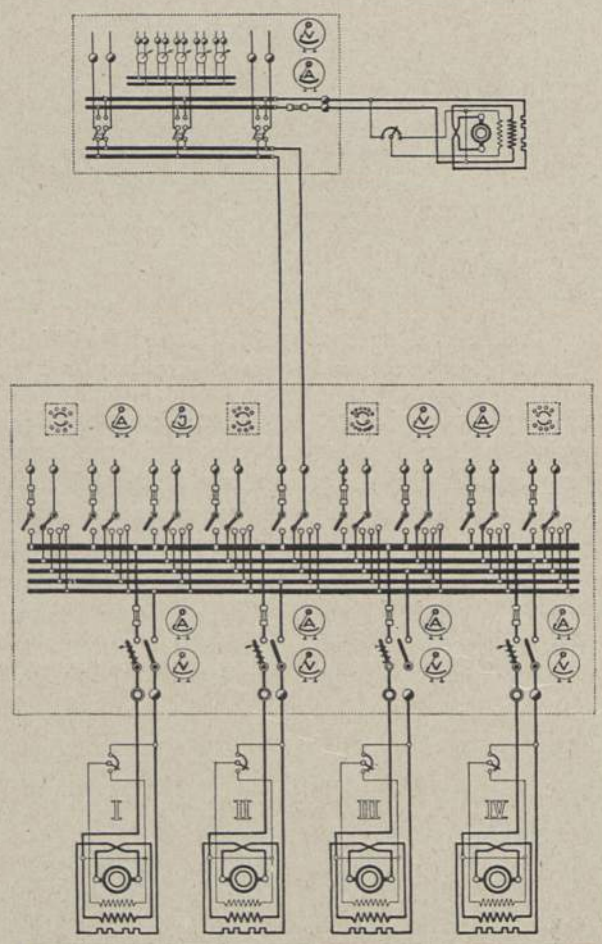
Bei allen diesen Arbeiten muß ein grundsätzlicher Unterschied zwischen den landwirtschaftlichen und den früher behandelten industriellen Betrieben betont werden. In diesen Betrieben ist die einzelne Arbeitsmaschine und der zugehörige Motor normalerweise für die ganze Dauer des Arbeitstages voll beschäftigt, wenn nicht etwa gerade außergewöhnliche Verhältnisse zu Betriebseinschränkungen zwingen. Dagegen ist die Arbeit in den landwirtschaftlichen Betrieben im allgemeinen unstetig und springt von der einen zur anderen Stelle. Für die verschiedenen hier genannten Arbeitsmaschinen ergeben sich nur tägliche Arbeitszeiten, die etwa um eine Stunde herum schwanken. Es handelt sich daher immer wieder darum, richtig zu disponieren und die einzelnen Arbeiten so anzusetzen, daß die vorhandenen Elektromotoren über die ganze Dauer des Arbeitstages möglichst gleichbleibend beschäftigt sind und gut ausgenutzt werden können. Diese nur der Landwirtschaft



916. Geschlossener Turbodynamoraum einer modernen Schiffsanlage
Ausführung der AEG, Berlin

eigentümlichen Verhältnisse bringen es auch mit sich, daß man hier die Elektromotoren nur äußerst selten fest mit ihren Arbeitsmaschinen zusammenbaut und sich im allgemeinen auf eine vorübergehende Verbindung mittels Zahn- oder Riementriebes beschränkt, die in der Industrie nur noch ausnahmsweise benutzt wird. Bei einer richtigen Disposition wird sich aber für die vorhandenen Elektromotoren stets reichliche Arbeit finden. Da bleibt immer noch das große Gebiet der Ent- und Bewässerung, wo jederzeit nützliche Pumparbeit geleistet werden kann, wenn die Motoren anderweitig nicht beansprucht werden.

Weiterhin sind die landwirtschaftlichen Nebenbetriebe zu erwähnen. An erster Stelle die Milchwirtschaft. Hier beginnt das Arbeitsgebiet der Elektrizität schon beim Melken. Bekanntlich verfügt man heut über Melkmaschinen, deren Verwendung viel sauberer und in jeder Beziehung hygienischer ist als das ältere Melken von Hand. Das Prinzip der Melkmaschine beruht darauf, die Milch durch die Erzeugung eines Vakuums aus dem Euter zu ziehen. Es ist daher ein motorischer Antrieb für eine Luftpumpe erforderlich, die die notwendige Luftleere herstellt. Bild 910 zeigt eine elektrisch betriebene Melkmaschine, von der die erforderlichen Schlauchleitungen zu den Eutern der Kühe abzweigen. Auch für die weitere Verarbeitung der Milch durch Separatoren, für den Betrieb der Butterfässer und Butterknetmaschinen ist der Elektromotor das gegebene Antriebsmittel. Alle diese Einrichtungen machen sich schon bei verhältnismäßig kleinen Betrieben bald bezahlt, da der Elektromotor hier den Menschen unmittelbar entlastet. In einer kleineren Wirtschaft würde etwa in dem Sinne zu disponieren sein, daß der Speichermotor täglich zwei oder drei Stunden in der Milchwirtschaft zu arbeiten hat.




917. Schaltungsschema der in Bild 918 gezeigten Schaltanlage

Wieder ein anderes Arbeitsgebiet ist die Schur von Schafen und Pferden. Ganz allgemein hat man heut für diesen Zweck Schermaschinen, die nach Art der vom Friseur her bekannten Haarschneidemaschinen gebaut sind. Ihr Antrieb erfolgt gewöhnlich mittels biegsamer Welle von einem kleinen Elektromotor aus, der durch ein flexibles Kabel an das Netz angeschlossen wird. Bild 911 zeigt eine elektrisch betriebene Pferdeschermaschine. Was gerade hier der elektrische Antrieb für eine Erleichterung bedeutet, läßt sich nur ermessen, wenn man sich in vergangene Zeiten zurückversetzt, da die Schur großer, nach Hunderten von Tieren zählender Schafherden noch mittels der einfachen Schafschere von Hand erfolgen mußte. Es war ungemein anstrengend, zeitraubend und gleichermaßen eine Tortur für Mensch und Tier.

Eine weitere Verwendungsmöglichkeit des Elektromotors in einem landwirtschaftlichen Betrieb bietet die Benutzung einer Kreissäge, mit der das Brennholz sehr viel schneller und billiger zerkleinert wird als mit einer Handsäge. Auch hier kommt die Motorschleife gut zupaß, wenn es einmal anderswo keine Arbeit für sie gibt.

Im Zusammenhang mit der Landwirtschaft muß auch noch die elektrische Glucke erwähnt werden, ein elektrischer Brutapparat, der auf eine möglichst genaue Nachahmung der Vorgänge beim natürlichen Brüten eingerichtet ist. Die Bruttemperatur im elektrischen Brutapparat wird absolut gleichmäßig auf $^1/_{10}$ Grad Celsius einreguliert. Die menschliche Tätigkeit bleibt auf das Lüften und Wenden der Eier beschränkt. Der Apparat bringt die Brut zum Ausschlüpfen und unterstützt auch weiterhin eine sichere Aufzucht der ausgeschlüpften Küken bei einem ganz minimalen Stromverbrauch.

Die vorstehenden Beispiele erschöpfen noch keineswegs alle möglichen Anwendungen der Elektrizität in landwirtschaftlichen Betrieben. Je nach der Art des einzelnen Betriebes kommen stets noch diese oder jene Sonderanwendungen hinzu, wie etwa elektrisch betriebene Aufzüge und elektrische Antriebe für allerlei Werkzeugmaschinen. Die angeführten Beispiele dürften aber wohl zeigen, daß die Elektrizität heute auch bereits in der Landwirtschaft Bürgerrecht besitzt, die am längsten einer planmäßigen Energiewirtschaft verschlossen geblieben war.

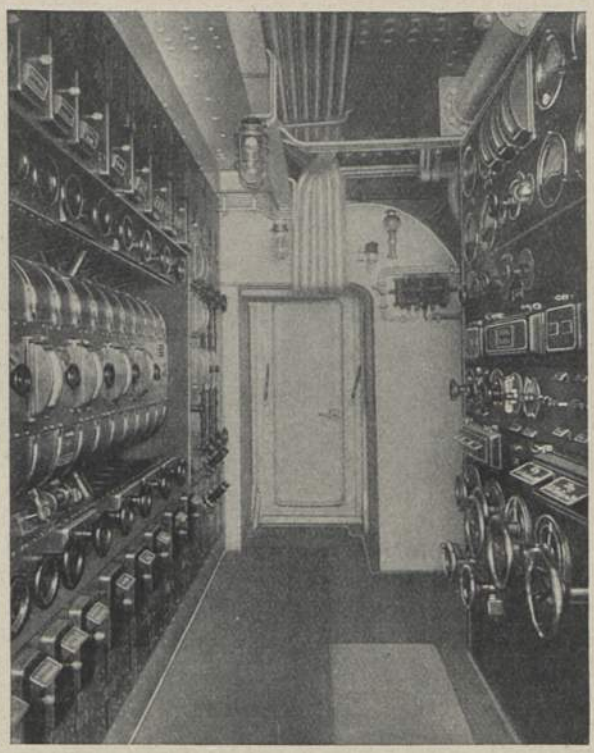
*

Die Geschichte der Starkstromtechnik zur See beginnt im Jahre 1879. Oberingenieur Hermann Meyer von Siemens & Halske berichtet darüber in seinen Erinnerungsblättern aus der Jugendzeit der Elektrotechnik:

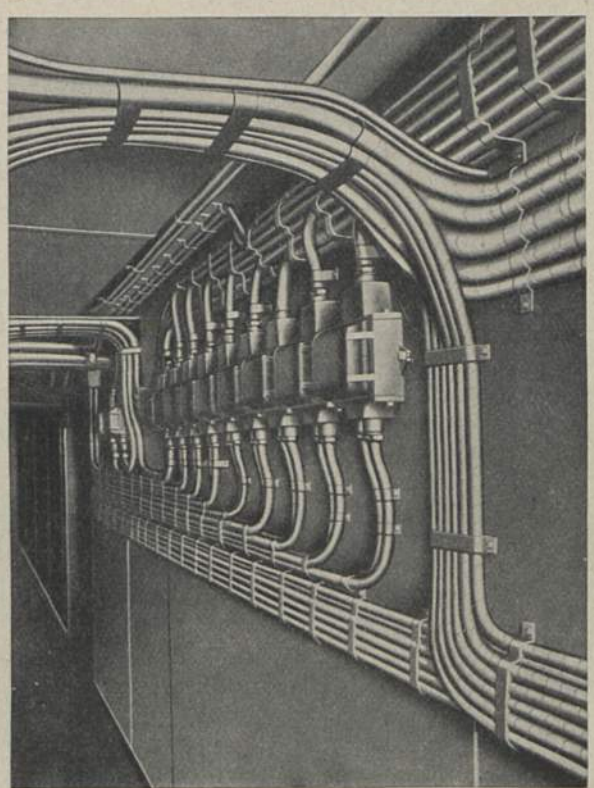
„Gegen Ende des Jahres 1879 hatte die Kaiserliche Marine den Wunsch, einen Scheinwerfer, wie er für militärische Zwecke schon lange im Gebrauch war, auch einmal auf See zu probieren. Dazu gehörten außer den elektrischen Apparaten auch eine Dampfmaschine und ein besonderer Dampfkessel, da die Schiffskessel damals nur für 2 Atmosphären Druck eingerichtet waren. Der Dampfkessel und die Dampfmaschine waren von A. Borsig in Berlin geliefert. Die verwendete Dynamomaschine war der liegende Typ D 2, die stehend D 8 genannt wurde. Nach Fertigstellung der Anlage auf dem Kriegsschiff, dem Raddampfer S.M.S. ‚Falke', ging es eines Abends von Wilhelmshaven hinaus zur Probe, mit einer Kommission zur Begutachtung an Bord. Draußen fing es an, etwas wacklig zu werden. Mein Scheinwerfer, der über dem Radkasten der Steuerbordseite aufgestellt war, kam dabei bedeutend aus dem Lot. Doch auf das Kommando ‚Licht!' warf der Scheinwerfer den strahlenden Lichtkegel über das Wasser. ‚Jetzt Bojen suchen!' — erscholl das Kommando. Das war nun nicht so leicht, denn vom Scheinwerfer aus läßt sich das Objekt schwer finden, weil der Lichtkegel undurchsichtig ist, der Beobachter muß etwas seitwärts vom Scheinwerfer stehen. Auf dem Verdeck des kleinen Schiffes war aber nicht genügend Platz vorhanden, um

sich einen geeigneten Beobachtungsstand aussuchen zu können. ‚Licht aus!' wurde befohlen. Da ergab sich, daß der Seemann im Dunkeln auf größere Entfernung besser zu sehen schien als bei Beleuchtung, denn die Bojen wurden nun entdeckt. Ein Dreimaster mit vollen Segeln kam in Sicht und wurde als größeres Objekt natürlich sofort bemerkt und stark ‚unter Feuer' genommen. Die Mannschaft des Seglers wußte sich diese Erscheinung wohl nicht zu erklären und steuerte die ‚Sonne' an. Nach mehreren Kreuz- und Querfahrten und Auseinandersetzungen wurden die Versuche eingestellt. Das Schiff fuhr friedlich und sicher im Dunkeln in den Hafen zurück. Das Versuchsergebnis war: ‚Das elektrische Licht ist gänzlich unbrauchbar für Seezwecke.'"

Man weiß, daß dies absprechende Urteil nicht von Dauer gewesen ist, und daß heute Kriegsschiffe ohne starke Scheinwerferanlagen gar nicht mehr denkbar sind. Zunächst aber hielt die Starkstromtechnik ihren Einzug in die Handelsmarine. Der erste größere Auftrag, den Edison im Jahre 1880 für seine neue Glühlichtbeleuchtung erhielt, betraf die Errichtung einer Installation von 250 Glühlampen an Bord des amerikanischen Handelsdampfers „Columbia". Wir haben jene erste Bestellung nach Edisons Orderbuch auf Seite 445 veröffentlicht. Sehr schnell folgten dieser ersten elektrischen Lichtanlage weitere, nachdem die verbesserte Glühlampe sich als ganz besonders geeignet für die Schiffsbeleuchtung erwiesen hatte. 1881 erhielt das englische Panzerschiff „Inflexible" durch J. W. Swan eine Innenbeleuchtung von 144 Glühlampen. 1883 wurden das chinesische Panzerschiff „Chen Ysen" und der deutsche Schnelldampfer „Werra" durch die Deutsche Edison-Gesellschaft mit elektrischer Beleuchtung ausgerüstet, und im gleichen Jahre baute die Edison-Company auf dem amerikanischen Dampfer „Oregon" eine Anlage von 500 Lampen, die größte Anlage der damaligen Zeit. Berücksichtigt man, daß die 16kerzige Kohlenfadenlampe damals noch einen Verbrauch von 60 Watt hatte, so ergibt sich für die Installation auf der „Oregon" eine Maschinenstation von 30 Kilowatt oder fast 50 Pferdestärken, für damalige Zeiten eine recht bedeutende Anlage.



918. Schaltraum einer Schiffsanlage
Schalttafel mit zweipoligen, gegeneinander verriegelten Einzel- und Vielfachwahlschaltern. Ausführung der AEG, Berlin

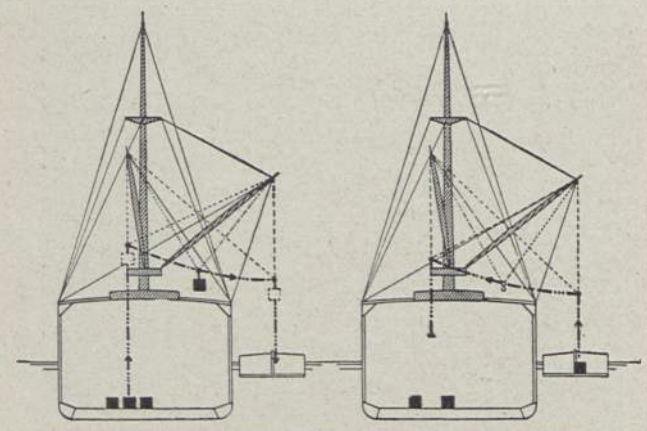


919. Gruppenverteilungsstelle einer Schiffsinstallation mit wasserdichten Sicherungskästen
Das Bild läßt die unbedingt seefeste Kapselung der ganzen Anlage erkennen

Will man den schnellen Siegeslauf des elektrischen Lichtes gerade in der Seeschiffahrt verstehen, so muß man sich die Beleuchtungsmittel vergegenwärtigen, die bis dahin zur Verfügung standen. Es waren recht übel riechende Öl- und Petroleumlampen, die wegen der Schiffsbewegungen unter allen Umständen kardanisch aufgehängt werden mußten und trotzdem immer noch eine Quelle von Gefahren und den Schrecken der Seefahrer bildeten. Nur allzuoft wurde der Schreckensruf „Feuer im Schiff" durch eine dieser Lampen verursacht. Dabei waren sie nur in geschlossenen Räumen zu verwenden. Eine Beleuchtung der Promenadendecks und sonstigen Wind und Wetter ausgesetzten Stellen war mit diesen Mitteln kaum möglich. Die elektrische Lampe brachte den Umschwung. In jeder Lage betriebsfähig und durch die Schiffsbewegungen unbeeinflußt, war sie auf Deck und unter Deck an jeder Stelle gleich verwendbar. Besondere Sorgfalt erfordert freilich die Ausbildung der ganzen Installation, denn es gibt kaum eine unglücklichere Mischung als Seewasser, Elektrizität und Kupfer. Wo immer die Isolation versagte und das Seewasser herankonnte, da bildeten sich Wucherungen von grünen und blauen Kupfersalzen, die zwar das Herz jedes Kristallographen erfreuen mußten, aber dem Elektrotechniker sehr zuwider waren. Besonders auf den Decks sind Leitungen, Lampen und elektrisch betriebene Winden auf das sorgfältigste gegen überkommende See zu schützen, zu kapseln und zu isolieren.

Ein anderes durchaus nicht unbedenkliches Kapitel bildeten die Wechselbeziehungen zwischen elektrischen Strömen und magnetischen Feldern (vgl. S. 368). Der einzige Wegweiser des Schiffes auf hoher See war bis zur Erfindung des Kreiselkompasses der Magnetkompaß. Von ihm hing die Sicherheit ab, und jede plötzliche und unkontrollierbare Mißweisung der Nadel konnte die schlimmsten Folgen haben. Schon die Einführung des Eisens als Schiffbaumaterial hatte hier, wie in Band III, Seite 255 bis 257, ausführlich erörtert wurde, schwere Sorge gemacht. Ändert sich ja theoretisch wenigstens der Magnetismus eines eisernen Schiffskörpers mit jeder Kursänderung und damit auch die

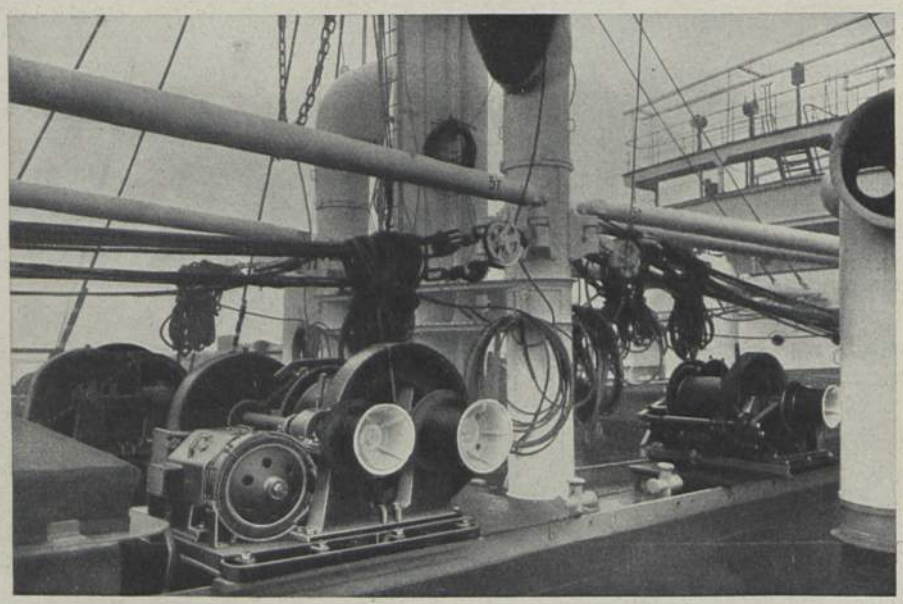
Mißweisung der Nadel. Nun kam noch der elektrische Strom hinzu. Im Anfange benutzte man den eisernen Schiffskörper, um sich die zweite isolierte Leitung zu ersparen. Von der Maschinenstation wurde der Strom isoliert bis zur einzelnen Lampe geführt. Hier durchfloß er den Kohlenbügel und trat dann in den eisernen Schiffskörper ein, um auf irgendeinem ihm genehm scheinenden Wege durch diesen zu dem ebenfalls mit dem Schiffskörper verbundenen zweiten Pol der Dynamomaschine zurückzukehren. Heut hat man diese Bauart längst wieder aufgegeben. Damals machten sich die untrennbar mit ihr verbundenen vagabundierenden Ströme in mehr als einer Beziehung unangenehm bemerkbar. Durch eine zweipolige Installation wurden alle diese Einwirkungen auf ein Minimum reduziert. Dabei liegen ja stets zwei Leitungen, in denen der Strom in entgegengesetzter Richtung fließt, dicht nebeneinander, und da ihre elektromagnetischen Wirkungen nach außen hin sich genau aufheben, findet eine Kompaßstörung nicht mehr statt. In gleicher Weise wirken die Fortschritte des Elektromaschinenbaus. Bild 913 zeigt eine alte Schiffsdynamo-Anlage aus den achtziger Jahren. Die Maschinen, ausgesprochene Schnellläufer, werden von einer liegenden Kolbendampfmaschine her durch Seile getrieben. Diese alten Maschinen besaßen noch ein recht starkes Streufeld. Der von den Feldwicklungen erzeugte magnetische Kraftlinienfluß fand nicht genug Eisenquerschnitt für seinen Weg und breitete sich daher ziemlich weit in dem die Maschinen umgebenden Raume aus. Näherte man sich einer solchen laufenden Maschine mit der Uhr in der Westentasche auch nur auf einige Meter, so war die Uhr sicher verdorben. Die feine stählerne Unruhfeder klebte mit ihren stark magnetisierten Windungen zusammen und machte das Spiel der Unruhe unmöglich. Begreiflicherweise nahmen diese Streufelder ihren Weg aber auch zum Teil durch die umgebenden eisernen Schiffswände, erzeugten dort Magnetpole und störten die Kompaßnadel.



920. Der Verlauf eines Hakenspieles beim Löschen der Ladung in einen Ewer

Bei den neueren Anlagen ist dieser Übelstand vollkommen behoben. Das eiserne Feldgestell der Dynamo ist so bemessen, daß der Kraftfluß vollkommen im Eisen verläuft und man sich mit einer Uhr in der Tasche in die nächste Nähe der Maschinen wagen kann. Weiterhin sind Dynamo und Antriebsmaschine direkt miteinander gekuppelt und zu einem geschlossenen Aggregat vereinigt. So zeigt Bild 914 eine Schiffsturbodynamo der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft für 220 Kilowatt. Derartige Maschinen werden bereits im Prüfstand für die auf See herrschenden Verhältnisse erprobt. Sie müssen dort stundenlang in starker Schräglage unter voller Belastung laufen, um später vollkommene Betriebssicherheit zu gewährleisten. Außer der Dampfturbine sind auch Expansionsmotoren vielfach für den Betrieb der Maschinen in Gebrauch. So zeigt Bild 915 eine Benzoldynamo für 50 Kilowatt. Auch hier ist die Vereinigung beider Maschinen zu einem geschlossenen Aggregat auf gemeinsamer Fundamentplatte das Gegebene.

Zu Anfang war die elektrische Station an Bord von Schiffen immer nur mehr oder weniger geduldet. Handelte es sich doch in der überwiegenden Mehrzahl aller Fälle um einen nachträglichen Einbau der ganzen elektrischen Anlage in ältere Schiffe. Da mußte man eben mit irgendeinem Platz für die Zentralstation vorliebnehmen, wie er sich gerade noch bot. Das hat sich naturgemäß im Laufe der Jahre gründlich geändert. Heut wird die elektrische Anlage schon bei der Projektierung des Schiffes genau so berücksichtigt wie jeder andere Teil der Maschinenanlage und bekommt für die Maschinen und die dazugehörigen Schalteinrichtungen besondere, von den übrigen Anlagen getrennte Räumlichkeiten. So zeigt Bild 916 den geschlossenen Turbodynamoraum eines großen deutschen Handelsdampfers, Bild 918 eine Schalttafel mit zweipoligen, gegeneinander verriegelten Einzel- und Vielfachwahlschaltern. Bild 917 gibt das Schaltungsschema einer solchen Anlage. Es sind hier vier Doppelschluß-Dynamomaschinen vorgesehen, die nach Belieben einzeln oder zusammen auf die Sammelschienen der Hauptverteilungsschalttafeln geschaltet werden können. Von den Sammelschienen führen in der Schaltung acht normale Stromkreise zu den verschiedenen Teilen des Schiffes. Außerdem ist ein neunter Stromkreis, der sogenannte Notstromkreis, vorgesehen. Er umfaßt die Notbeleuchtung auf Vorplätzen, Treppen, Gängen und Bootsdecks, die ausreicht, den Verkehr an Bord auch im Gefahrfalle noch aufrechtzuerhalten. Auch die Seitenmast- und Hecklaternen erhalten aus Sicherheitsgründen eine eigene, von der Hauptschalttafel ausgehende Speiseleitung. Weiter ist von den übrigen Maschinen räumlich getrennt eine Notdynamo vorgesehen,

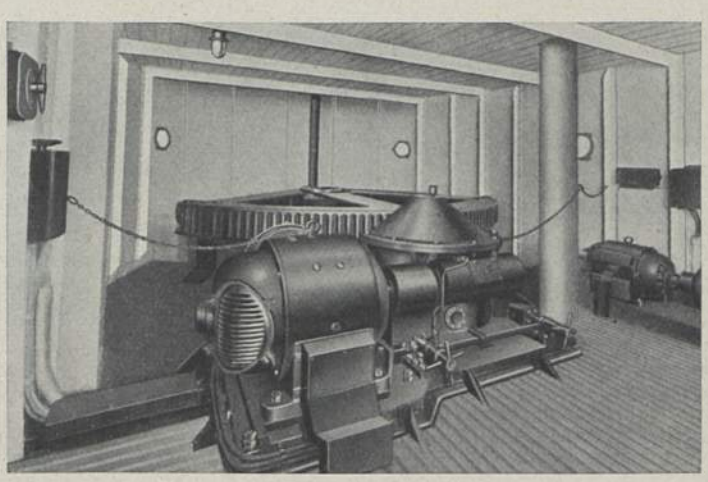


921. Elektrisch betriebene Ladewinden auf dem Motorschiff „Osiris"
Die Bedienung erfolgt durch einen einzigen Steuerhebel. Ausführung der AEG, Berlin

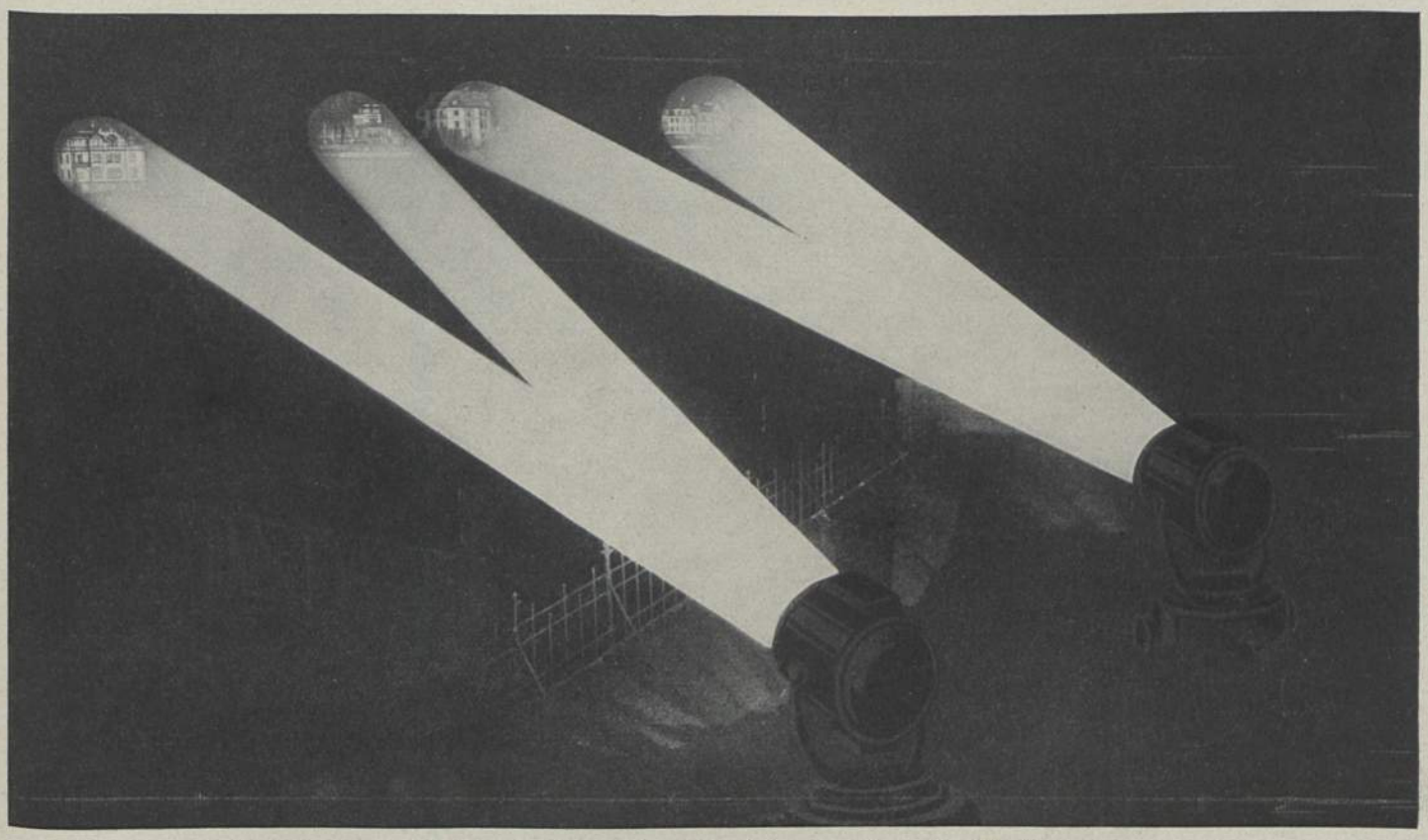
die den Betrieb des Notstromkreises übernimmt, wenn die anderen Maschinen aus irgendwelchen Gründen versagen.

Als Leitungsmaterial kommen bei diesen Schiffsinstallationen nur Kabel und Leitungen allerbester Qualität in Frage. Muß man doch an vielen Stellen so installieren, als ob die ganze Anlage dauernd im Wasser läge. Man nimmt Gummiaderleitungen mit nahtlosem Bleimantel oder gepanzerte Kabel. In besonders exponierten Räumen genügt aber selbst die Eisenbandbewehrung der Kabel noch nicht, und es ist ein zusätzlicher Schutz durch Eisenrohr notwendig. Nur in den sauberen und trockenen Gesellschaftsräumen sind einfache Gummiaderleitungen zulässig. Bild 919 zeigt eine Gruppenverteilungsstelle einer derartigen Schiffsinstallation und läßt die robuste Art der Verlegung wohl erkennen. Diese Einrichtungen haben natürlich die Beleuchtungsverhältnisse auf den Schiffen von Grund auf geändert, so daß heute in den Wohn- und Arbeitsräumen der Dampfer die gleiche Lichtfülle zur Verfügung steht, wie man sie zu Lande gewohnt ist.

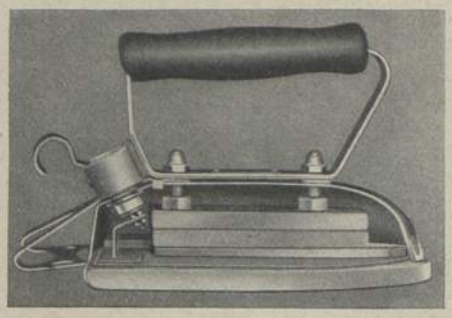
Die elektrische Beleuchtung durch Glühlampen war die erste wichtige Aufgabe der Starkstromtechnik an Bord der Schiffe. Sehr bald erfuhr auch das auf Seite 503 zitierte absprechende Urteil über die Bogenlichtscheinwerfer eine Korrektur. Große elektrische Scheinwerfer mit guten Parabolspiegeln sind heut nicht nur für die Kriegsmarine unentbehrlich, sondern spielen auch in der Handelsschiffahrt eine bedeutende Rolle. Die Durchfahrt zur Nachtzeit durch die großen Kanäle wie den Suez- und Panamakanal ist nur mit Hilfe von Scheinwerfern möglich, die das Ufergelände und die Fahrstraße scharf beleuchten. Bild 923 zeigt die eigenartigen, bei der Durchfahrt durch den Suezkanal gebräuchlichen Scheinwerfer. Durch ein besonderes optisches System wird das Lichtbündel hier in zwei in einem spitzen Winkel auseinandergehende Strahlen gespalten. Der Winkel ist unter Berücksichtigung der Kanalbreite gerade so bemessen, daß die beiden Strahlen die Kanalufer auf eine große Strecke hin in helles Licht setzen. Nun bildet aber die Kanalfahrt ja nur einen sehr geringen Bruchteil der ganzen Fahrt der von Europa nach dem fernen Osten gehenden Schiffe, und es wäre nicht wirtschaftlich, jedes Schiff dauernd mit Scheinwerfern auszurüsten. Vielmehr hat sich hier ein regulärer Scheinwerferverleih entwickelt. Die an der einen Kanalmündung von See her ankommenden Schiffe erhalten dort gegen eine mäßige Gebühr die Scheinwerfer an Bord und geben sie an der anderen Mündung wieder ab. Je nach der Einrichtung der einzelnen Schiffe werden dabei nur die Scheinwerfer oder auch komplette Maschinenaggregate an Bord gegeben, die dann für die Kanalfahrt provisorisch an die Dampfleitung angeschlossen werden müssen.



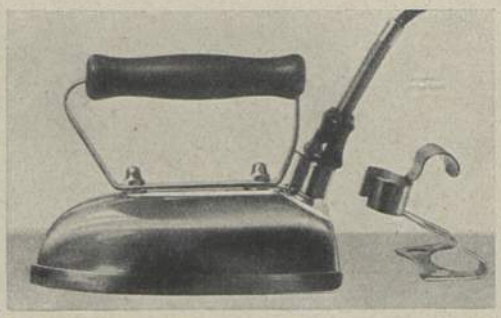
922. Elektrische Rudermaschine
Bauart der AEG, Berlin

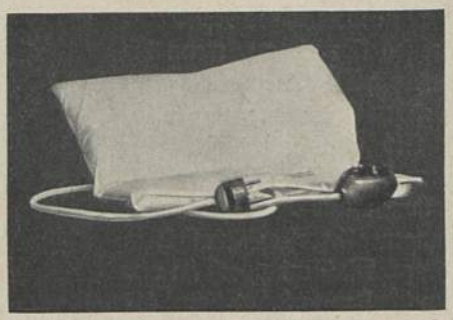


923. Suezkanal-Scheinwerfer bei der Erprobung im Werk
Durch eine besondere optische Anordnung sendet der Scheinwerfer zwei divergierende Lichtbündel aus, die gleichzeitig beide Kanalufer beleuchten.
AEG, Berlin



924. Schnitt und Ansicht des Protos-Bügeleisens
Der elektrische Heizkörper befindet sich unmittelbar über der Sohle. Über ihm liegen die Druckplatten. Der größte Teil der erzeugten Wärme wird dadurch in die Sohle geleitet.
Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin





925. Heizkissen mit drei Regelstufen
Der flexible Heizwiderstand ist in ein Kissen eingebaut

Damit kommen wir zu den Dampfleitungen, die heut Schritt für Schritt vor den elektrischen Leitungen gewichen sind. Der Energiebedarf eines modernen Schiffes beschränkt sich ja keineswegs auf die eigentlichen Maschinenräume. Im Gegenteil gibt es kaum eine Stelle auf dem Deck, vom Vorder- bis zum Hintersteven, wo nicht irgendwie Maschinenkraft benötigt würde. Da sind an erster Stelle die zahlreichen ziemlich starken Deckwinden, die in Verbindung mit Flaschenzügen und Auslegerbäumen die Ladung und Entladung des Schiffes im Hafen besorgen, soweit nicht Hafenkräne diese Arbeit übernehmen. An zweiter Stelle sind die nicht minder häufigen Ventilatoren oder Lüfter zu nennen, welche die Versorgung des ganzen gewaltigen Schiffsrumpfs mit frischer Luft bewirken.

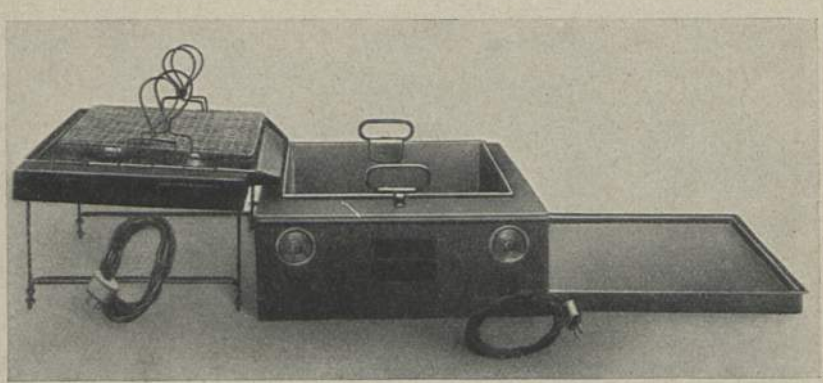
Wir lernten auf Seite 485 die Bewetterung der Bergwerke kennen. Angesichts der modernen Lüftungsanlagen fühlt man sich beinahe versucht, auch von einer Bewetterung der Schiffe zu sprechen. Längst reicht hier der natürliche, durch die Windfänger in den Schiffsraum geleitete Luftzug nicht mehr aus. Es wird nötig, namentlich in die Kesselräume Frischluft mit einem recht erheblichen Überdruck und in Mengen von Hunderten von Kubikmetern pro Minute hineinzupressen, um den Kesselfeuerungen die großen, für die Verbrennung notwendigen Sauerstoffmengen zuzuführen. Schließlich ist der Rudermaschine zu gedenken. Die Zeiten, da man das Ruder vom Ruderrad aus direkt durch Menschenkraft bewegte, sind für die großen Seedampfer längst vorüber. Seit 50 Jahren hat man, wie in Band III, Seite 240 bis 242 ausführlich berichtet wird, Dampfrudermaschinen, die das schwere Schiffsruder automatisch genau so einstellen, wie es der Mann im Kartenhaus durch die Drehung eines leichten Handrades angibt.

Alle die hier genannten Stellen brauchen Kesselfrischdampf, und so bildeten denn die in ihrer Gesamtheit oft mehrere hundert Meter langen Dampfleitungen noch um die Jahrhundertwende einen wichtigen Teil der ganzen maschinellen Anlage und eine Quelle unendlichen Ärgers für das Maschinenpersonal. Undichtigkeiten an den Rohrverbindungsstellen, Kondenswasser, lästige Wärmewirkungen der Rohre unter Deck, eingefrorene Rohre über Deck, das sind nur einige Blüten aus diesem Strauß von Unannehmlichkeiten. Dagegen liegt das sachgemäß verlegte elektrische Kabel ein für allemal betriebsbereit an seiner Stelle. Es verzehrt keine Energie, so lange die angeschlossenen Maschinen nicht laufen, heizt nicht und friert nicht ein. Kein Wunder daher, daß die Starkstromtechnik auch an Bord der Schiffe sofort den Antrieb aller der hier genannten Maschinen übernahm, sobald sie nur aus dem gröbsten heraus war. Heut findet man an Bord moderner Schiffe kaum noch eine einzige dieser störenden Dampfleitungen. Überall ist die Elektrizität an ihre Stelle getreten.

Zum Antrieb der Maschinenraumlüfter eines großen Seedampfers dienen Gleichstrom-Nebenschlußmotoren, die innerhalb weiter Grenzen in ihrer Tourenzahl regulierbar sind. Die Bedienung erfolgt von der Hauptschalttafel der elektrischen Zentrale aus. Dabei liegen in den Zuleitungen Strommesser, die es gestatten, die einzelnen Motoren auf ganz bestimmte Leistungen einzustellen.

Oft müssen aus räumlichen Gründen zwei Motoren auf ein und denselben Luftschacht arbeiten. In diesem Fall verwendet man für die Strommessung ein Doppelinstrument mit zwei Zeigern. Die Einstellung erfolgt so, daß die beiden Zeiger auf der Skala sich decken, und man weiß dann, daß beide Motoren sich gleichmäßig in die zu leistende Arbeit teilen.

926. Elektrisch beheizte Kleinküche
mit mehreren Regelstufen zum Braten, Backen und Schmoren.
Ausführung der Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

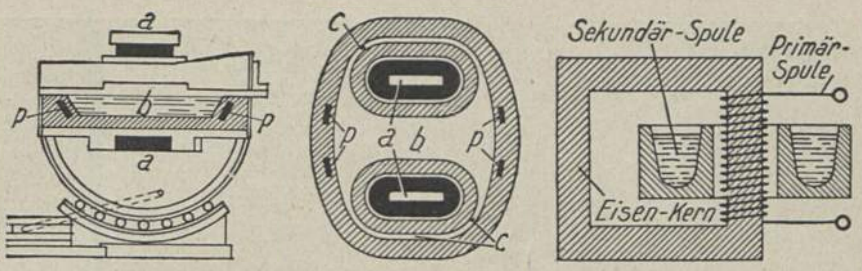


927. Elektrisch beheiztes Temperierbad mit abgenommenem Deckel
Der Apparat dient dazu, Flüssigkeiten, z. B. Überziehmassen für Zuckerwaren, dauernd selbständig auf gleicher Temperatur zu halten

Bild 920 gibt schematisch den Vorgang der Entladung mittels Deckwinde und Ladebaum und zeigt ein Hakenspiel vom Aufnehmen der Last aus dem Schiffraum bis zum Absetzen in den längsbord liegenden Leichter. Der Antrieb der Ladewinde erfolgt durch Hauptstrommotoren oder auch durch Doppelstrommotoren. Bild 921 zeigt Ladewinden auf Deck des Motorschiffes „Osiris" nach der Konstruktion der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft. Bemerkenswert ist dabei die vollkommene Kapselung aller elektrischen Teile der Winde. Sie ist durchaus so eingerichtet, daß gelegentliche über Deck kommende Brecher ihr nichts anhaben können. Die Steuerung selbst erfolgt nach einem der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft patentierten Verfahren derartig, daß dabei die Intelligenz des Bedienungsmannes möglichst ausgeschaltet und fast alles der automatischen Steuerung überlassen wird.

Das Gewicht der einzelnen zu bewegenden Lasten schwankt ja stets innerhalb weiter Grenzen. Von einer guten Ladewinde wird nun verlangt, daß sie unter diesen stark wechselnden Verhältnissen stets mit bester Ausnutzung der Motorleistung arbeitet, beim Anheben also entsprechend der Größe der Last ihre Drehzahl verringert, beim Senken nach Möglichkeit erhöht. Wie weit die hier erwähnte Anordnung das erreicht, geht daraus hervor, daß die Drehzahl eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors, der ja an sich der gegebene Kran- und Windenmotor ist, bei Windenleerlauf, wenn also nur die Reibungswiderstände von Seil und Winde zu bewältigen sind, 300% seiner normalen Drehzahl beträgt. Dagegen steigt die Tourenzahl der Windentrommel einer mit der patentierten Schaltung ausgerüsteten Winde in den Leerlaufzeiten bis auf 500% der normalen, und überdies liefert der Motor beim Absenken der Last Strom in das Netz zurück.

Schließlich der elektrische Ruderantrieb. In einer Sonderveröffentlichung der AEG über eine „sympathische Steuerung" des Schiffsruders heißt es:

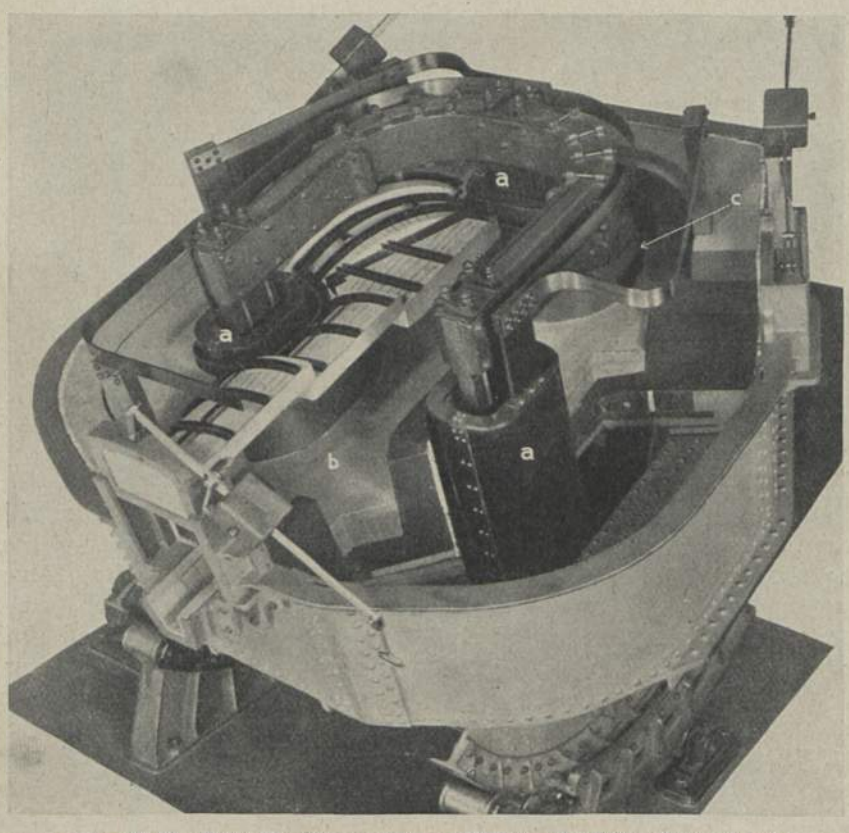



928. Schnitt und Schema eines Induktions-Elektrostahlofens, System Röchling-Rodenhauser

Links und Mitte: Einphasen-Wechselstrom-Ofen im Durchschnitt und Querschnitt (schematisch). a die als Magnetjoch ausgebildete Primärspule, b der durch Erweiterung der Schmelzrinne gebildete Ofenherd, c Schmelzrinne, p Polplatten. Rechts: Grundschema eines Induktionsofens. Die der Primärspule zugeführte elektrische Energie wird in wechselnde Magnetisierung des Eisenkerns umgewandelt, die sich in der als Schmelzrinne ausgebildeten Sekundärspule wieder in elektrischen Strom und dann in Wärme umsetzt

„Das Ruder gibt dem Schiffe die von seinem Führer bestimmte Fahrtrichtung. Versagt es, so ist das Schiff hilflos. Die Ruderanlage ist somit eines der wichtigsten Organe an Bord, und es muß von ihr die größte Betriebssicherheit und allereinfachste, auch dem nicht technisch vorgebildeten Seemann geläufige Handhabung gefordert werden."

Die elektrischen Ruderantriebe arbeiten heut äußerlich ebenso wie die älteren Dampfruderanlagen. Der Mann im Kartenhaus dreht das Steuerrad in irgendeine Winkelstellung nach Backbord oder Steuerbord und läßt es in dieser Stellung stehen (vgl. Bild 365, Bd. III, Seite 248). Sofort beginnt die Rudermaschine zu arbeiten, bringt das Ruder in genau die gleiche Winkelstellung und setzt sich dann automatisch still. Auch die bereits im Dampfbetriebe bewährte konstruktive Verbindung des Ruders mit der Rudermaschine, das sogenannte „Rudergeschirr", hat man für den elektrischen Betrieb übernommen. Es ist der Quadrant, ein Zahnradsegment, dessen Nabe fest mit der Ruderwelle oder Ruderpinne verbunden ist, und in dessen Zahnung der Antriebsmotor mittels Zahnrad und Schnecke eingreift. Bild 922 zeigt den Teil der elektrischen Ruderanlage am Quadranten. Im Prinzip laufen alle elektrischen Ruderanlagen darauf hinaus, daß sich auf der Welle des Handrades im Kartenhaus und auf der Ruderwelle zwei elektrische Einrichtungen befinden, die durch die Betätigung von Schleifkontakten, durch die Veränderung von elektromagnetischen Feldern oder sonstwie derart zusammenwirken, daß sie den Rudermotor stromlos machen, sowie Handrad und Ruder die gleiche Winkelstellung besitzen, in jedem anderen Falle aber den Motor laufen lassen, und zwar stets in dem Sinne, daß er dahin wirkt, die zwischen Handrad und Ruder vorhandene Winkeldifferenz gleich Null zu machen, worauf dann automatisch ein Stillsetzen des Motors eintritt. Bei der in Bild 922 gezeigten elektrischen Ruderanlage der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft erfolgt dieser




929. Elektrostahl-Drehstrom-Ofen, System Röchling-Rodenhauser

a Elektroden, b Ofenherz, c Schmelzrinne

930. Fiat-Elektro-Ofen, Drehstrom-Lichtbogenofen nach dem System Héroult
beim Abgießen des Schmelzgutes. Bauart Demag — AEG

Vorgang durch einen kleinen sinnreichen, an der Ruderwelle sitzenden Apparat, den „Ruderwächter", der in der angedeuteten Wechselwirkung mit dem „Rudereinsteller" des Handrades arbeitet.

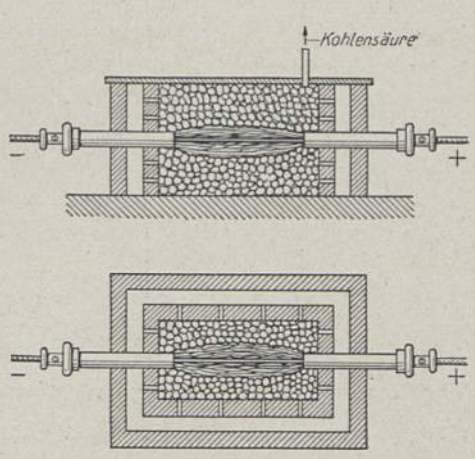
Außer den hier geschilderten elektrischen Betrieben gibt es an Bord noch mannigfache andere Anwendungsgebiete der Elektrizität. So wird sie in den Schiffsbäckereien zur Beheizung der Backöfen und vielfach auch in den Schiffsküchen zum Kochen und Braten benutzt. Fast alle größeren Schiffe haben auch elektrische Ozonanlagen, um die Luft zu verbessern und die Vorräte an Lebensmitteln bestmöglich zu konservieren. Schließlich findet die elektrische Heizung neben der allgemeinen Dampfheizung vielfach als Zusatzheizung Verwendung, um den einzelnen Kajütspassagieren die Möglichkeit zu geben, ihre Wärmeansprüche ganz nach eigenem Belieben zu regeln.

Wie die vorstehenden Ausführungen zeigen, beherrscht die Starkstromtechnik den Schiffsbetrieb bereits in weitgehendem Maße. Aber es ist möglich, daß die Entwicklung über kurz oder lang noch viel weiter geht. Immer mehr denkt man daran, die verhältnismäßig großen und schweren, langsam laufenden Schiffsturbinen durch viel kleinere und leichte Schnelläufer gleicher Leistung zu ersetzen, die direkt mit Dynamomaschinen gekuppelt sind. Die erzeugte elektrische Energie wäre dann weiter entsprechend starken, direkt mit den Schraubenwellen gekuppelten Motoren zuzuführen. Im Augenblick ist die Technik noch nicht vollkommen reif für dies Projekt, aber es ist

nicht ausgeschlossen, daß sie es in absehbarer Zeit wird, und dann würde die Starkstromtechnik im Seeverkehr genau so dominieren wie heut etwa im Bergwerks- und Hüttenbetrieb.

*

Die allgemeine Eigenschaft der elektrischen Energie, sich sehr leicht in andere Energieformen umsetzen zu lassen, trifft auch für ihre Umwandlung in Wärme zu. Jeder, auch der beste Leiter bietet dem Strom einen gewissen elektrischen Widerstand, dessen Wirkung sich äußerlich in einem Spannungsverlust oder Spannungsabfall bemerkbar macht. Scheinbar geht dabei eine elektrische Energiemenge verloren, die gleich dem Produkte aus dem durch den Leiter fließenden Strom und dem dabei auftretenden Spannungsabfall ist. Tatsächlich aber tritt das Äquivalent dieser Energiemenge als Stromwärme in die Erscheinung, erhitzt den Leitungsdraht und dessen Umgebung. Bei dieser Lage der Dinge ist es die einfachste Sache von der Welt, einen elektrischen Ofen zu bauen. Jeder Widerstandsdraht und auch jede elektrische Lampe ist ja bereits etwas Derartiges. Ohne




931. Schematischer Schnitt durch einen gedeckten Kalziumkarbid-Ofen

weiteres kann man sich Kaffee heiß machen oder auch Gemüse kochen, wenn man eine gewöhnliche elektrische Glühlampe mit der Glasbirne (aber nicht mit dem Fassungsrand) in die zu kochende Substanz eintaucht und genügend lange wirken läßt. Doch so einfach die Angelegenheit von der konstruktiven Seite aus erscheint, so schwierig gestaltet sie sich energiewirtschaftlich. Nach dem elektrischen Wärmeäquivalent ist elektrische Arbeit im Betrage von einer Kilowattstunde gleich 859 Kalorien oder Wärmeeinheiten. Gute Steinkohle entwickelt bei restloser Verbrennung 8000 Kalorien pro Kilogramm. Man müßte also etwa 9 Kilowattstunden im Handelswerte von etwa 2 RM. bis 4 RM. aufwenden, um die gleiche Wärmemenge zu erhalten, die sich durch die Verbrennung von einem Kilogramm Kohle im Werte von 1 bis 2 Pfennigen erzielen läßt. Nach dieser einfachen Überschlagsrechnung erscheint der Fall der elektrischen Ofen und sonstigen Heizapparate zunächst vollkommen hoffnungslos. Wenn derartige Apparate trotzdem, und zwar in immer steigendem Maße zur Anwendung gelangen, so muß das also seine ganz besonderen Gründe haben, auf die im

932. Offener Kalziumkarbid-Ofen in Betrieb

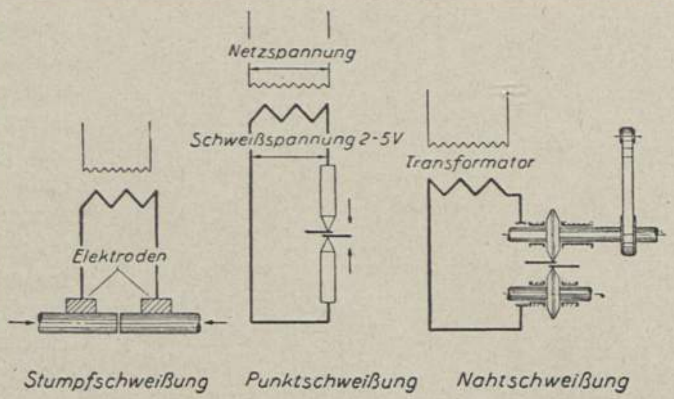
Er erfordert eine Energie von 12 000 Kilo-Volt-Ampere bei einer Spannung von 120 Volt und einer Stromstärke von 57 000 Ampere. Der Ofen liefert 50 Tonnen Karbid in 24 Stunden

folgenden näher eingegangen werden soll.

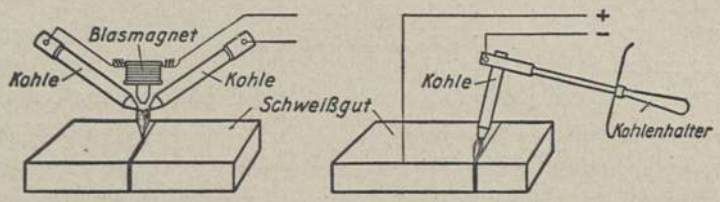
In der Hauptsache sind es drei Gründe. Erstens ist die Stromwärme jederzeit und fast momentan in den feinsten Stufen regulierbar. Dieser Umstand ist für einen elektrischen Backofen (Bild 926) schon recht wertvoll, aber er wird geradezu lebenswichtig und entscheidend für verschiedene technische Öfen, wie beispielsweise die Vulkanisieröfen der Zahnärzte oder die Lötöfen der Goldschmiede. Zweitens läßt sich die elektrische Wärmeentwicklung auf beliebig kleine oder beliebig gestaltete Räume zusammendrängen, so daß man ihre Wirkung genau im voraus ermessen kann. Diese wertvolle Eigenschaft wird unter anderem in zahlreichen medizinischen Instrumenten und Apparaten ausgenutzt, wie in den Elektrokautern, den elektrisch beheizten Messern, Schlingen, Löffeln usw. zur Vornahme von Operationen. Weiter in Verbindung mit der zuerst erwähnten Eigenschaft der guten Regulierfähigkeit in den mannigfachen Heiz- und Wärmekissen (Bild 925) und schließlich auch in zahlreichen hauswirtschaftlichen Apparaten, wie Bügeleisen, Brennscherenwärmern und dergleichen.

Eine Betrachtung des Bügeleisens (Bild 924) wird vielleicht auch erkennen lassen, wo die eingangs aufgestellte Energierechnung ihre schwache Seite hat. Das normale Haushaltungsbügeleisen hat einen Verbrauch von rund 400 Watt. Es erfordert also für 2½ Plättstunden gerade eine Kilowattstunde, für die ein mittlerer Preis von 30 Pfennigen angesetzt werden mag. Theoretisch brauchte man nur 100 Gramm Kohle, um das gleiche zu erreichen. Aber in Wirklichkeit müßte man 2½ Stunden hindurch ein recht kräftiges Herdfeuer unterhalten, um die Bolzen rotwarm zu machen. Da ein solches Feuer geraume Zeit zum Aufbrennen und ebenso lange zum Erlöschen braucht, muß man sogar mit 3 Stunden rechnen, und es ist sicher, daß dafür weit mehr als 100 Gramm Kohle benötigt werden. Weiter aber arbeitet das elektrische Bügeleisen ohne Rauch und Ruß und ohne jede Belästigung der Plätterin und ihrer Umgebung durch Qualm und Hitze. Diese Vorteile allein aber bereits, über eine Dauer von 2,5 Stunden verteilt, werden reichlich so hoch bewertet wie die etwa noch mögliche Preisdifferenz von 25 Pfennigen zwischen dem Plätten mit Elektrizität und mit Kohlenfeuer. Es treten eben nach der einfachen Energierechnung bei allen hauswirtschaftlichen Elektrowärmeapparaten auch noch andere Momente ästhetischer und persönlicher Art auf, die schließlich den Ausschlag zugunsten der Elektrizität geben. Das gilt auch für die mannigfachen elektrischen Kochapparate, wie Kaffeemaschinen, Eierkocher und dgl. Gewiß würde heut kein Mensch mehr daran denken, einer Tasse Kaffee halber ein Herdfeuer zu entzünden. In jeder Küche pflegt aber, in den Städten wenigstens, Gas vorhanden zu sein, und es genügt eine Hahnumdrehung und ein Streichholz, um eine saubere Heizflamme zu haben. Und trotzdem machen die elektrischen Kocher sogar in den Städten dem Gaskocher Konkurrenz, weil sie doch noch viel sauberer und anheimelnder als dieser sind. Mit dem Gaskocher wird man wohl oder übel in der Küche bleiben müssen. Die elektrischen Kocher kann man ohne weiteres in das Zimmer nehmen und auf dem Frühstückstisch arbeiten lassen. Daher ihre steigende Beliebtheit auch in der Stadt. Auf dem Lande aber, wo zwar die elektrischen Drähte der Fernkraftwerke, aber keine Gasleitungen mehr hinkommen, gehört den Elektrowärmeapparaten unbedingt eine bedeutende Zukunft, und schon heut sind sie dort in überraschender Menge vertreten.

Schließlich die dritte wichtige Eigenschaft der Stromwärme. Im Gegensatz zu der durch irgendwelche Verbrennungsprozesse erzeugten Wärme tritt sie ohne alle chemischen Begleiterscheinungen und ohne die Neubildung irgendwelcher chemischer Stoffe auf. Diese Eigenschaft gewinnt enorme Bedeutung für die Metallurgie. Nur allzu viele, dem Hüttenmann höchst unsympathische

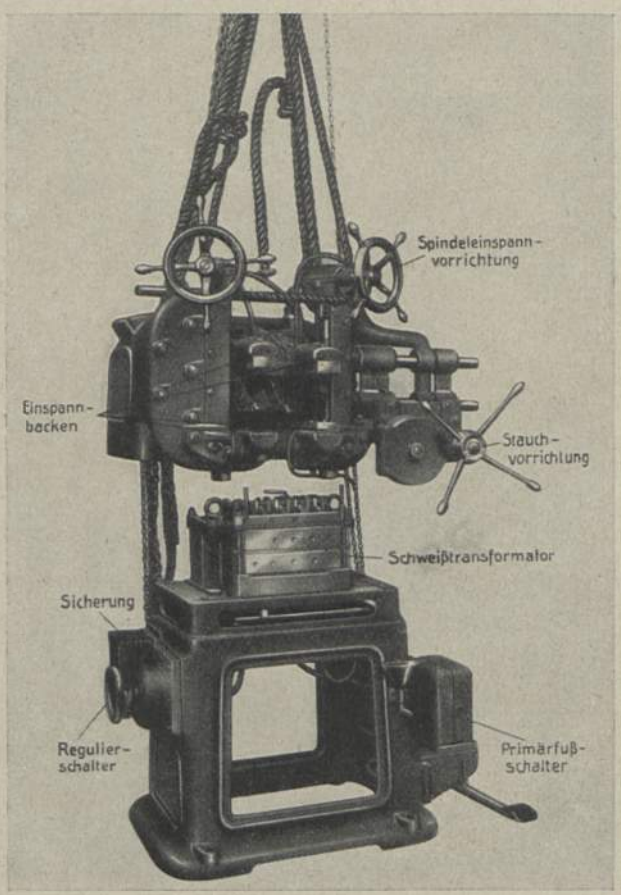



933. Die verschiedenen Arten der elektrischen Schweißung




934. Schweißen nach dem Zerener-Verfahren (links) und nach dem Benardos-Verfahren (rechts)

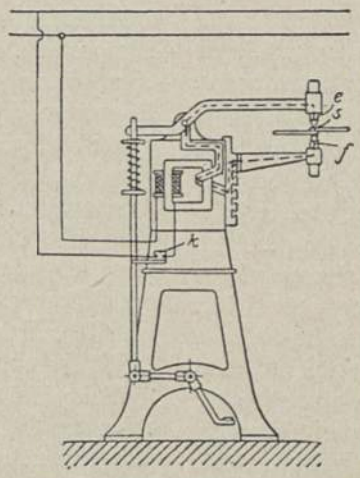
Links: Der Lichtbogen wird zwischen zwei Kohlenstiften gebildet und durch einen Blasmagneten gegen die Schweißstelle getrieben. Er wirkt wie eine Schweißflamme. Rechts: Der Lichtbogen entsteht zwischen einem Kohlenstift und dem Schweißstück. Erhitzend wirken der Lichtbogen und die im Schweißstück selbst frei werdende Stromwärme




935. Stumpfschweißmaschine beim Zusammenbau
Bauart der AEG, Berlin

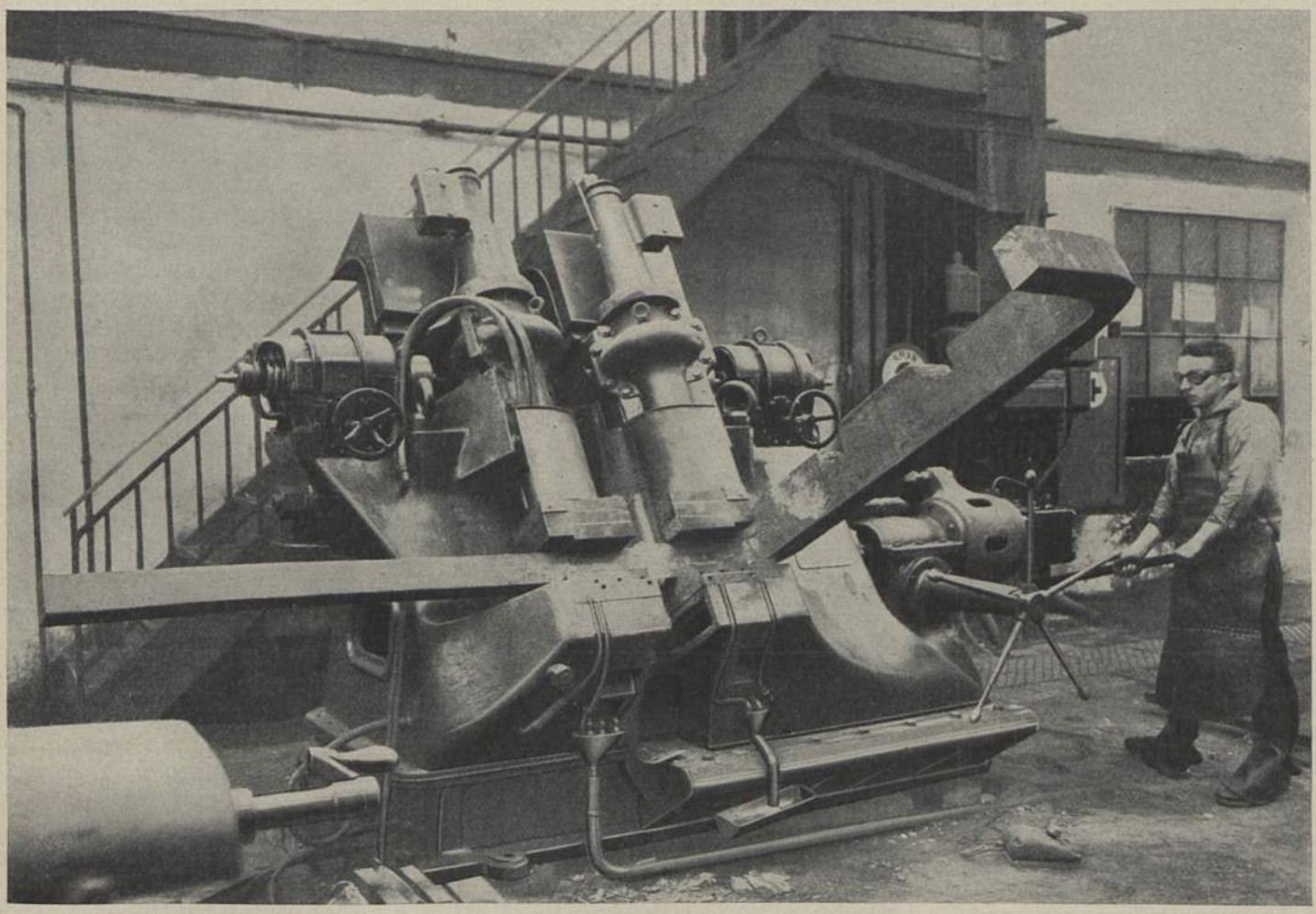
Stoffe, wie Schwefel, Arsen, Phosphor und dergleichen, stecken in der Kohle und geraten auf dem Wege über die Kohlenflamme in das zu erschmelzende Metall.

Eine Möglichkeit, dem zu entgehen, bietet die elektrische Stromwärme. In Deutschland ist es aus den bereits erörterten energiewirtschaftlichen Gründen nicht möglich, im Eisenhüttenwesen schon von der Erschmelzung des Roheisens aus dem Eisenerz an mit Elektrizität zu arbeiten, obwohl es technisch recht gut möglich wäre. Wohl aber lohnt sich das Verfahren in der Stahlerzeugung, sobald es sich nun darum handelt, den in der Birne erblasenen oder sonstwie mit Hilfe der Kohlenwärme gewonnenen Stahl weiter zu reinigen und zu veredeln. In der Tat hat denn auch der Elektrostahlofen in den letzten Jahren in Deutschland eine derartige Verbreitung gewonnen, daß gegenwärtig mehr als die Hälfte alles überhaupt erzeugten Qualitätsstahles aus dem Elektroofen stammt.



936. Schema einer elektrischen Punktschweißmaschine

Der gegenwärtig am meisten für diese Zwecke benutzte Typ ist der Induktionsofen (Bild 928 u. 929). Das eigentliche Ofengefäß aus feuerfestem und nicht leitendem Gestein hat dabei im allgemeinen eine zylindrische Gestalt und ist außen von einer vieldrähtigen Spule umgeben, die der Primärwicklung eines Transformators entspricht. Im Betriebe wird die Spule mit einem kräftigen Wechselstrom im Betrage mehrerer tausend Kilo-Volt-Ampere gespeist. Solange der Ofen leer ist, wirkt sie dabei wie eine einfache Drosselspule. Aber das Bild ändert sich, sobald man den Ofen mit Stahlbrocken füllt oder etwa ein flüssiges Stahlbad eingießt. Dann bildet dies Metall der Füllung die Sekundärwicklung, und zwar eine einzige in sich geschlossene Windung von sehr großem Querschnitt, in der nach dem Transformatorgesetz (vgl. Seite 392) ein Strom von Hunderttausenden von Ampere zirkuliert und seine gesamte Energie restlos innerhalb des Stahlbades in Wärme umsetzt. Durch die Regulierung der der Primärspule zugeführten Energie ist es dabei möglich, die Hitze des Bades genau abzustimmen. Durch geeignete Gesteinszuschläge und Legierungen kann man weiter dem Stahlbad die letzten Verunreinigungen entziehen und ihm alle gewünschten Eigenschaften verleihen, während infolge der elektrischen Beheizung keine unkontrollierbaren Substanzen mehr hinzukommen. In dieser Beziehung ist der elektrische Induktionsofen auch den für viele andere Zwecke gebräuchlichen Lichtbogenöfen (Bild 930) überlegen, bei denen der Strom dem Ofeninhalt durch Kohlenelektroden in Form eines mächtigen



937. Stumpfschweißmaschine

Eine der größten Schweißmaschinen, mit der ein Mann in 10 Minuten zwei Eisenstücke mit einem Querschnitt von 100 Quadratzentimetern bei einem Energieverbrauch von 15 kWh zusammenschweißt. Das alte Feuerschweißen solcher Stücke erforderte bei drei bis vier Mann Bedienung etwa einen halben Tag. AEG, Berlin

Lichtbogens zugeführt wird. Dabei läßt es sich natürlich niemals vermeiden, daß Kohlenstoff von den Elektroden in das Ofengut einwandert, was bei der Stahlbereitung recht unerwünschte Folgen haben könnte.

Dagegen wird der Lichtbogenofen überall dort, wo sehr billige Wasserkraftenergie zur Verfügung steht, für die Gewinnung der mannigfachsten Stoffe verwendet. Bei der Betrachtung dieser Ofen begeben wir uns freilich schon auf die Grenze zwischen elektrothermischen und elektrochemischen Wirkungen. Bekanntlich ist der elektrische Lichtbogen das Mittel zur Herstellung der höchsten für uns überhaupt erreichbaren Temperaturen von etwa 4500 Grad, und diese Hochtemperaturen lösen bereits an sich chemische Wirkungen aus, ohne daß zunächst elektrochemische Wirkungen dabei notwendig werden. Das gilt beispielsweise vom Kalziumkarbidofen, den man daher auch mit Wechselstrom betreiben kann und gewöhnlich damit betreibt. Bild 931 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen solchen Ofen, Bild 932 gibt eine äußere Ansicht. Im Inneren des aus feuerfestestem Material erbauten Ofens ist um die beiden mächtigen Kohlenelektroden herum ein Gemenge von Koks (Kohlenstoff) und Kalkstein (kohlensaurem Kalk) gepackt. Unter der Einwirkung der Lichtbogenhitze wird zunächst die Kohlensäure aus dem Kalk getrieben und entweicht aus dem Ofen, während gebrannter Kalk (Kalziumoxyd) zurückbleibt. Bei steigender Temperatur geht eine weitere Umwandlung vor sich. Die chemische Verwandtschaft zwischen Kohle und Kalzium wird größer als die zwischen Kalzium und Sauerstoff. Ein Kalziumatom verbindet sich mit zwei Kohlenstoffatomen zu Kalziumkarbid, während der ausgetriebene Sauerstoff mit dem Koks zu Kohlensäure verbrennt. Das Endergebnis ist das jedem Radfahrer wohlbekannte Kalziumkarbid. Wegen seiner Entstehung im elektrischen Ofen hat man es häufig auch als gespeicherte elektrische Energie angesprochen, und tatsächlich enthält es, auf die Gewichtseinheit bezogen, viel mehr Energie als der Bleiakkumulator. Nur läßt sich diese Energie erst auf Umwegen wieder in Elektrizität verwandeln, was in der Praxis dem Akkumulator vor dem Kalziumkarbid den Vorrang sicherte. Man kann es im Kraftfahrwesen beobachten, wo die früher ausschließlich verwendeten Azetylenscheinwerfer mehr und mehr durch elektrische Scheinwerfer verdrängt werden, die ihren Strom aus mitgeführten Bleibatterien beziehen.

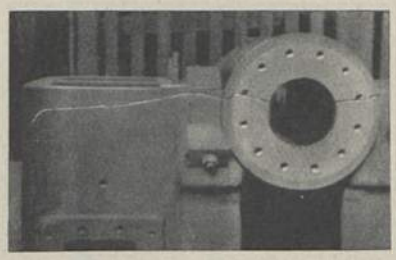
Ähnliche Umwandlungen unter dem Einfluß der extremen Hitze des elektrischen Ofens ergeben sich beim Zusammenschmelzen von Kohle und Tonerde. Die Tonerde, ein Oxyd des Aluminiums, bildet im kristallisierten Zustande die Edelkorunde, Rubine und Saphire, die nächst dem Diamanten, dem kristallisierten Kohlenstoff, die härtesten uns bekannten Körper sind. Im elektrischen Ofen verbinden sich Kohlenstoff und Tonerde zu dem Karbokorund, einem ebenfalls überaus harten Stoff, der ein vorzügliches Schleifmittel ist. Dagegen führt die Behandlung reiner Tonerde und der diese Erde in größeren Mengen enthaltenden Minerale im elektrischen Gleichstromofen zu einer elektrochemischen Zerlegung, bei der sich das Aluminium in reiner Metallform abscheidet. Bei der Wichtigkeit, welche die Legierungen des Aluminiums in der modernen Technik gewonnen haben, hat die Herstellung dieses Leichtmetalls stetig zugenommen, und zurzeit arbeiten auf der ganzen Erde rund eine halbe Million elektrischer Pferdestärken an seiner Gewinnung. Spricht man doch heut davon, daß wir uns bereits auf dem Wege aus dem Zeitalter des Stahls in das der Leichtmetalle befinden, eine Anschauung, die namentlich durch den Luftschiff- und Flugzeugbau eine gewisse Unterstützung erfährt.

Weitgehende Verbreitung haben auch die Elektro-Muffelöfen gefunden. Man braucht sie in der Metallindustrie zum Härten und Zementieren von Stahl, zum Vergüten des Stahls, zum Ausglühen von Drahtbündeln und dergleichen. In den Laboratorien dienen sie zur Vornahme von Schmelzversuchen jeder Art in eingestellten Tiegeln, in Emaillierwerken zum Emaillieren von allerlei Gefäßen und in der optischen Industrie zur Herstellung von Glasflüssen. Die Muffelöfen besitzen in den Wandungen eingebaut elektrische Widerstände, durch deren Beschickung mit Strom alle Temperaturen bis zu etwa 1500 Grad genau regelbar erreicht werden können.

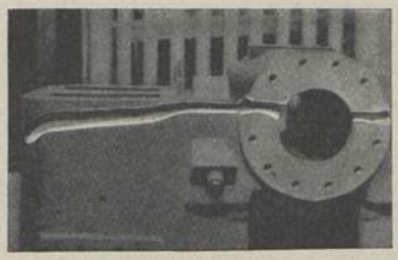
Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet der Stromwärme ist das elektrische Schweißen. Man unterscheidet das elektrische Schweißen nach dem Widerstandsverfahren und nach dem Lichtbogenverfahren. Die Widerstandsschweißung beruht darauf, daß ein Hochstrom bei seinem Durchgange durch die miteinander zu verschweißenden Eisenteile an der weniger gut leitenden Berührungsstelle derselben auf einen derartigen Widerstand stößt, daß er sie bis zur Schweißhitze erwärmt, wonach ein mäßiger Druck die Verschweißung bewirkt. Es handelt sich also bei diesem Verfahren um Hochströme, die in besonderen Schweißtransformatoren durch eine entsprechende Umformung gewöhnlichen Wechselstromes erzeugt werden. Bei der Ausführung der Schweißungen selbst unterscheidet man Stumpfschweißung, Punktschweißung und Nahtschweißung. Bild 933 zeigt die drei Schweißungsarten im Schema. Bei der Stumpfschweißung werden die zu verschweißenden Rohre oder Bolzen stumpf zusammengestoßen, an der Stoßstelle erhitzt und dann zusammengepreßt. Die Punktschweißung soll bei der Vereinigung von Blechen eine Nietnaht ersetzen. Wo man sonst Niete durchziehen würde, werden die Bleche hier durch zwei stiftförmige aufgepreßte Elektroden Punkt für Punkt verschweißt. Die Nahtschweißung ist eine weitere Ausbildung der Punktschweißung, derart, daß die Schweißpunkte zu einer fortlaufenden Linie oder Naht vereinigt werden. Man bedient sich dabei, wie das Schema erkennen läßt, rollenförmiger Elektroden. Bild 935 zeigt eine Stumpfschweißmaschine beim Zusammenbau. Alle elektrischen Teile sind im

938. Aufschweißen der Winkeleisenspanten an die Außenhaut eines Motorschiffs
nach dem Slawianoff-Verfahren. Der Kohlenstift ist durch einen Eisenstift ersetzt, der durch Abschmelzen das nötige Schweißmaterial liefert

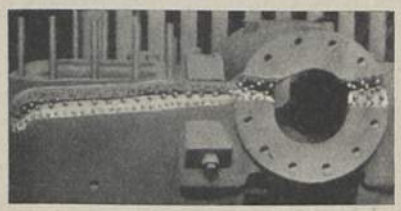
Unterbau, die mechanischen Teile zum Festhalten und Stauchen des Schweißgutes im Oberbau untergebracht. Einen charakteristischen Vertreter der größten Stumpfschweißmaschinentype sehen wir in Bild 937. Bild 936 gibt die schematische Darstellung einer elektrischen Punktschweißmaschine. Hier ist deutlich die Anlage des Schweißtransformators zu erkennen. Ein viereckiger Ring aus lamelliertem Eisen trägt auf dem einen Schenkel eine vielwindige, vom Netz gespeiste Spule. Auf dem anderen Schenkel umschlingt ihn die Hochstromwicklung nur in einer halben Windung aus entsprechend starkem Kupfer, dessen beide Enden zu den beiden Schweißbacken führen.



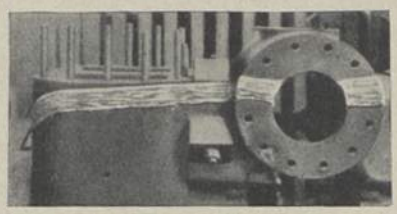
Gesprungener Gußzylinder



Keilförmig ausgeweitete Sprungstelle



Rinne mit Stiftschrauben versehen



Der wiederhergestellte Zylinder

939. Reparatur eines gesprungenen Gußzylinders durch Kaltschweißung

Die Lichtbogenschweißung beruht auf der Ausnutzung der im Lichtbogen auf kleinstem Raum erzeugten Stromwärme. Man unterscheidet das Zerener-Verfahren (Bild 934 links), bei dem der Lichtbogen zwischen zwei Kohlenstiften gebildet und durch einen Elektromagnet gegen die zu schweißende Stelle geblasen wird, und das Benardos-Verfahren (Bild 934 rechts), bei dem das Werkstück selbst den einen Pol des Lichtbogens bildet. Das erstgenannte Verfahren wird heut nur noch als Ersatz für Hartlötungen angewandt, das Benardos-Verfahren beim Verschweißen von dünneren Blechgefäßen wie Transformatorkästen, Petroleumfässern und dergleichen. Die wertvollste Weiterbildung des Benardos-Verfahrens ist das Slawianoff-Verfahren, bei dem der bewegliche Kohlepol durch einen Metallpol ersetzt ist, beim Verschweißen von Eisen also durch einen passend dimensionierten Eisendraht, dessen Spitze unter der Wirkung des Lichtbogens schmilzt und in die Schweißstelle hineintropft. Nach diesem Verfahren lassen sich praktisch alle überhaupt vorkommenden Schweißungen durchführen. Dabei muß der Lichtbogen kurz gehalten werden, damit die Eisentropfen möglichst wenig Gelegenheit finden, Sauerstoff oder Stickstoff aus der Luft aufzunehmen. Bild 938 zeigt das strichweise Anschweißen der Winkeleisenspanten an die Außenhaut eines Motorschiffes nach diesem Verfahren, Bild 939 die Reparatur eines gesprungenen Gußzylinders. Längs der Sprungstelle wird eine keilförmige Rinne ausgearbeitet, diese mit Stiftschrauben aus einem Eisen besetzt, welches in Verbindung mit dem vom schmelzenden Draht tropfenden Eisen ein dem übrigen Gußstück gleichartiges Eisen ergibt. Im Bild 939 rechts unten endlich ist die Schweißung vollendet. Nach dem Abschleifen der Schweißstelle ist das Gußstück vollkommen repariert.

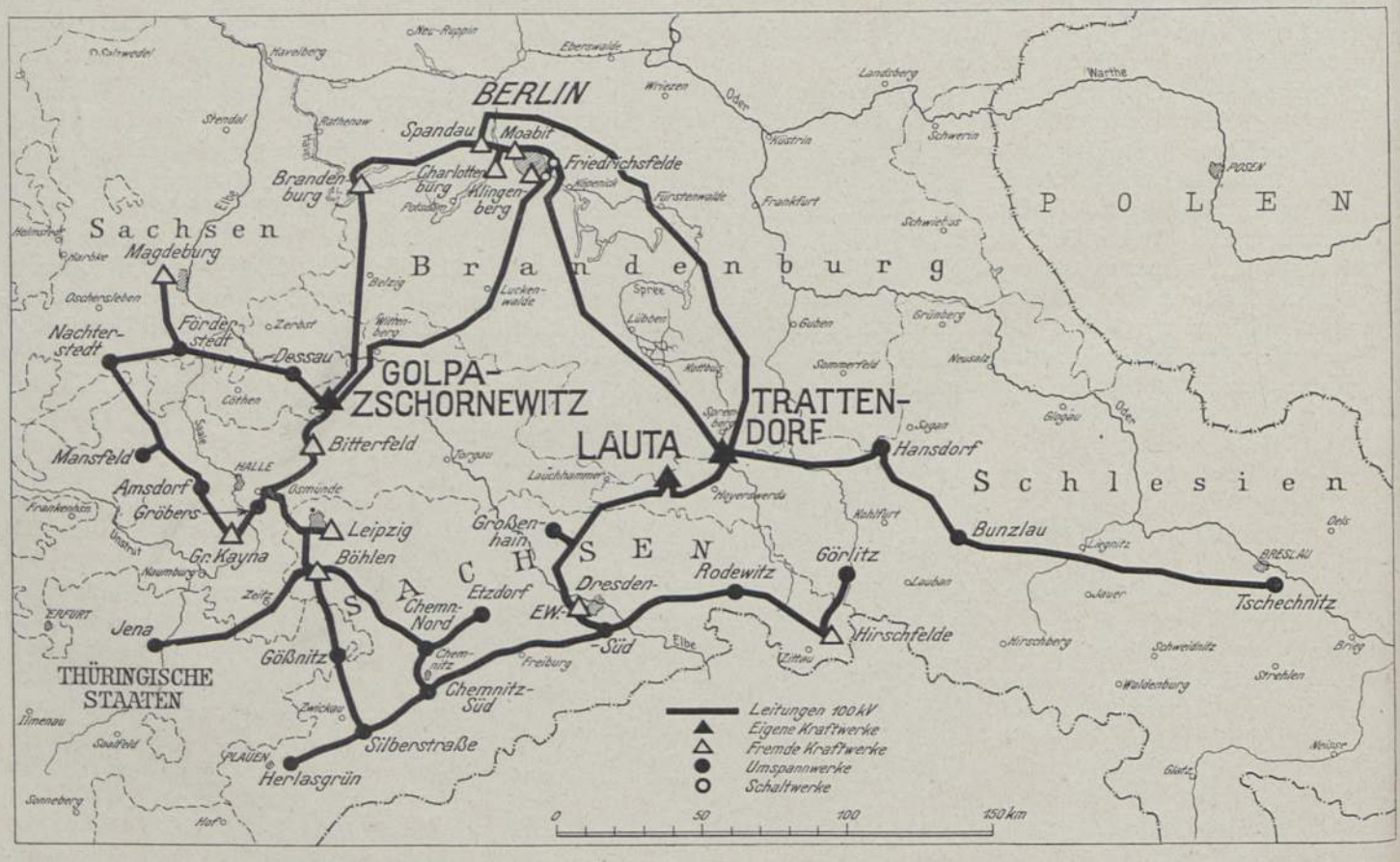
Die Hitze des Lichtbogens wird aber nicht nur zum Zusammenschweißen, sondern auch zum Auseinanderschneiden eiserner Teile verwendet. In vergangenen Jahrzehnten hatte man für solche Arbeiten nur Kreuzmeißel und Hammer und brauchte viele Wochen und viele Hände zu einer Arbeit, die heute von wenigen Leuten in einigen Stunden erledigt wird. Bekannt dürfte es wohl sein, daß auch die Herren Einbrecher sich bereits diesen Fortschritt der Technik mit Erfolg zunutze gemacht haben. Voraussetzung dafür ist eine elektrische Leitung in der Nähe des Geldschrankes, der man 20 bis 25 Ampere entnehmen kann, ohne daß die Sicherungen durchschlagen. Im wohlverstandenen Interesse des Geldschrankes wird man derartig hochgesicherte Leitungen in seiner näheren Umgebung also besser vermeiden.

In der Hauptsache konnten die vorstehenden Zeilen eine Darstellung der Anwendungen der elektrischen Stromwärme geben. Vollständig kann sie schon aus dem Grunde nicht sein, weil fast täglich neue hinzukommen: elektrische Warmwasserbereitung, elektrisch beheizte Kissen, Teppiche, Fliegeranzüge u. dgl.; elektrische Öfen zum Vorwärmen von Nieten und Schmiedestücken, Öfen zum Warmhalten von Speisen und Getränken. Es ist charakteristisch für die Lage der Dinge auf diesem Gebiet, daß die großen Elektrizitätskonzerne bereits seit längerer Zeit besondere Elektro-Thermo-Gesellschaften begründet haben, die dies große Gebiet unabhängig von der übrigen Starkstromtechnik bearbeiten.

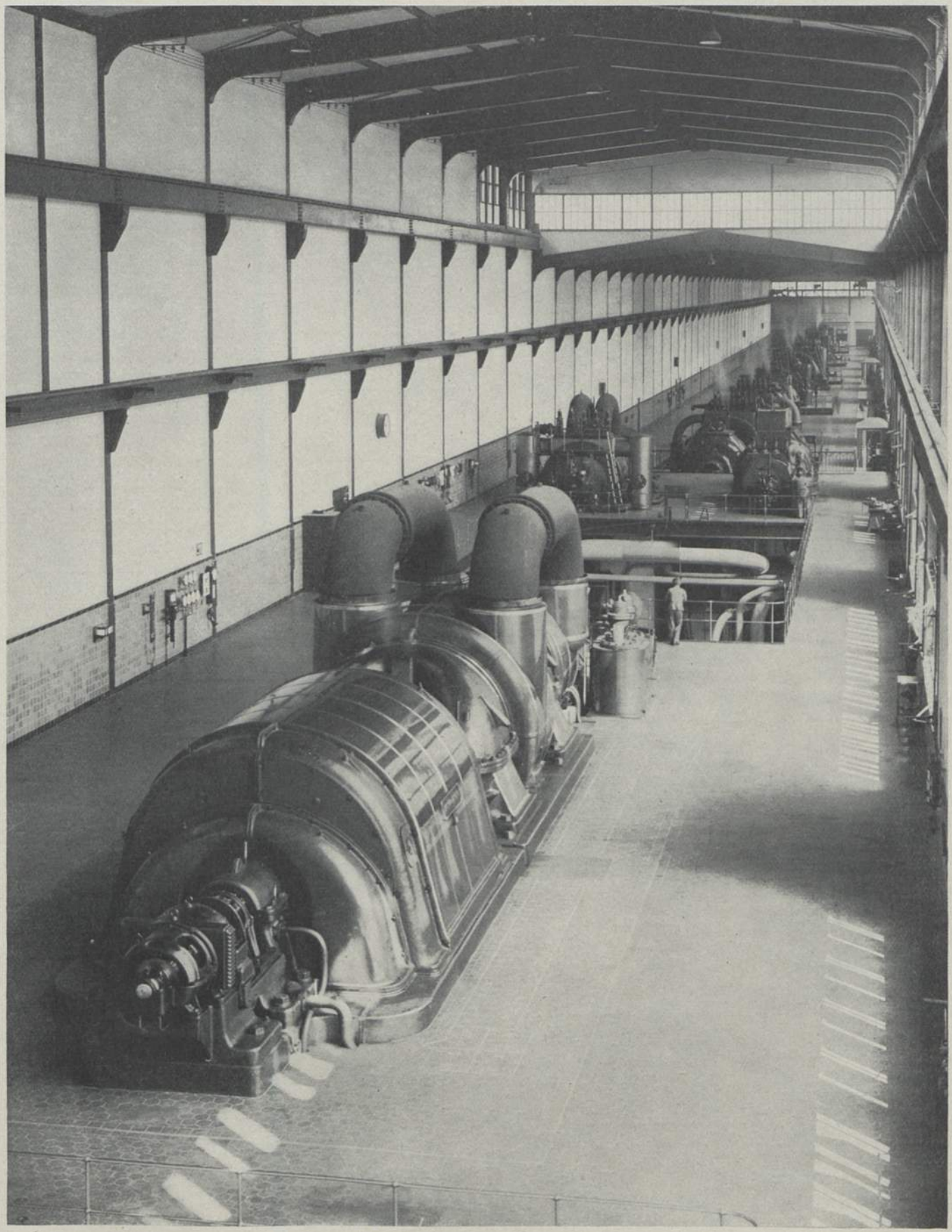
# 34. Das Großkraftwerk der Gegenwart

Das elektrische Kraftwerk begann bescheiden als Blockzentrale in gemieteten Kellerräumen. Schon in den achtziger Jahren entwickelte es sich zur Stadtzentrale, die im eigenen Hause und mit tausendpferdigen Maschinen die Versorgung ganzer Stadtviertel übernahm. Dann kam, wie in Abschnitt 31 geschildert wurde, der Sprung vom Gleichstrom zum hochgespannten Drehstrom, und die neunziger Jahre brachten für Berlin die erste außerhalb des Weichbildes liegende Fernversorgung, die Hochspannungszentrale der Berliner Elektrizitätswerke in Oberschöneweide an der Spree. Es folgten ähnliche Hochspannungswerke in Moabit und Rummelsburg, alle an der Peripherie des eigentlichen Versorgungsgebietes gelegen, die ebenso wie Oberschöneweide die erzeugte Energie mit einer Spannung von 30 000 Volt in die Verbrauchsgebiete leiteten.

Darüber war das erste Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts zu Ende gegangen, und die Stadt Berlin war fest entschlossen, von ihren vertraglichen Rechten Gebrauch zu machen: die Berliner Elektrizitätswerke bei Ablauf des Vertrages im Jahre 1915 zu dem festgesetzten Preise zu erwerben und in eigener Regie weiterzuführen. Bei dieser Lage der Dinge faßten die führenden Persönlichkeiten des Konzerns der Berliner Elektrizitätswerke schon im Jahre 1912 den Plan, einen Teil des Berliner Strombedarfs durch ein bei Bitterfeld zu errichtendes Fernkraftwerk zu decken. Man verfiel auf die Gegend zwischen

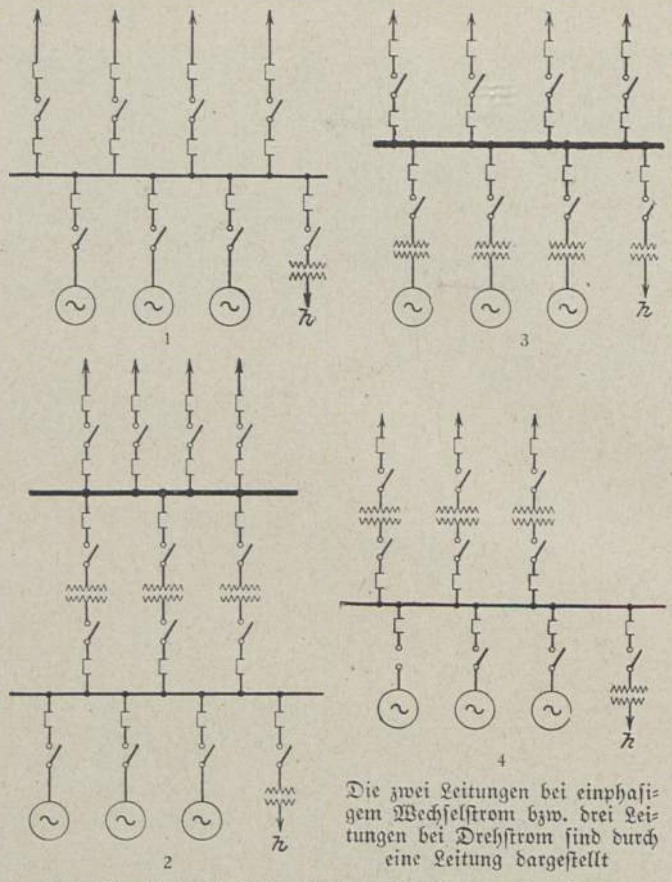



940. Das mittel- und ostdeutsche 110 000-Volt-Fernleitungsnetz
in Verbindung mit den Großkraftwerken Golpa-Zschornewitz, Lauta und Trattendorf



941. Blick in das Maschinenhaus des Kraftwerkes Golpa-Zschornewitz
Turbogeneratoren von 14 300 bis 47 500 Kilo-Volt-Ampere. Elektrowerke A.-G., Berlin

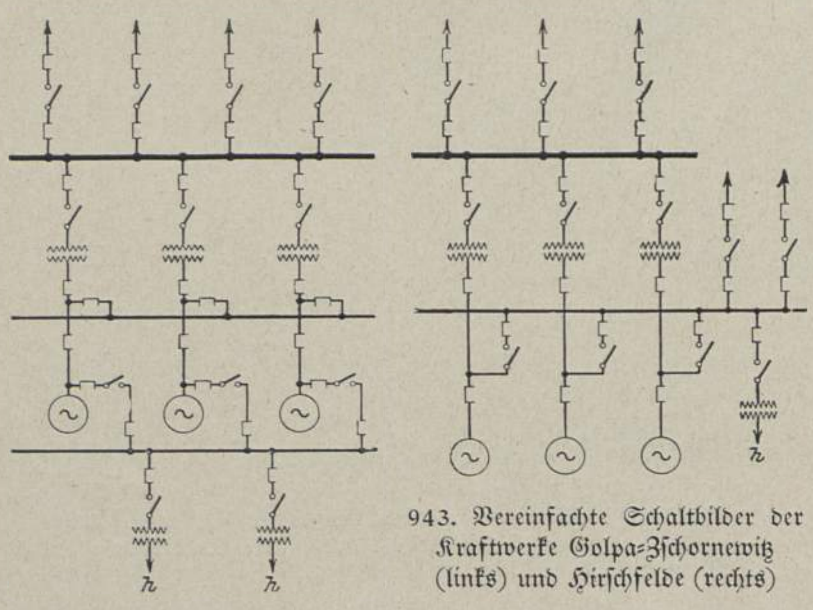
Bitterfeld und Wittenberg, weil hier, in der Luftlinie etwa 120 Kilometer von Berlin entfernt, zahlreiche Braunkohlenfelder liegen, in denen eine minderwertige Braunkohle im Tagebau gewonnen wird. Infolge ihres niedrigen Heizwertes und hohen Wassergehaltes vertrug diese Kohle aus wirtschaftlichen Gründen nur einen Bahntransport von etwa 70 Kilometern. Unter Berücksichtigung der Kesselwirkungsgrade und aller sonstigen Umstände konnte man annehmen, daß 3,5 Kilogramm dieser Braunkohle einem Kilogramm guter westfälischer Steinkohle gleichwertig waren. Entsprechend niedrig war aber auch ihr Preis. Während eine Tonne guter westfälischer Steinkohle in Berlin vor dem Kriege frei Kesselhaus sich auf 18 Goldmark stellte, betrug der Preis für die gleichwertige Braunkohlenmenge von 3,5 Tonnen in den Bitterfelder Gruben nur 5,3 Mark. Die Differenz der beiden Werte in Höhe von 12,70 Mark verblieb zugunsten eines unmittelbar an den Braunkohlengruben errichteten Fernkraftwerkes für jede dem Heizwert einer Tonne Steinkohlen entsprechende verfeuerte Braunkohlenmenge. Aus dieser Differenz waren zu decken: die Mehrkosten für die Hochspannungseinrichtungen, die Fernleitungen nach Berlin und die bei einer solchen Übertragung unvermeidlichen Energieverluste. Das war die wirtschaftliche Grundlage dieses und aller ähnlichen Projekte. Daß die Rechnung gut aufgegangen ist, zeigt die bisherige Entwicklung der Braunkohlen-Fernkraftwerke.




Die zwei Leitungen bei einphasigem Wechselstrom bzw. drei Leitungen bei Drehstrom sind durch eine Leitung dargestellt

942. Vereinfachte Schaltbilder für kleinere Kraftwerke

Während die B.E.W.-Gruppe ihre Vorbereitungen traf und schon einen großen Komplex von Braunkohlengruben in der Nähe der Dörfer Golpa und Zschornewitz erwarb, brach der Weltkrieg aus. Im Jahre 1915 übernahm die Stadt Berlin programmäßig die bestehenden Elektrizitätswerke und wies im übrigen jedes weitere Zusammenarbeiten mit dem alten Konzern von der Hand. Infolge der gesteigerten Kriegsindustrie machte sich aber ein allgemeiner Energiemangel und ein gewaltiger Bedarf an Stickstoffverbindungen fühlbar, und in der außergewöhnlich kurzen Zeit von knapp zehn Monaten wurde ein Großkraftwerk mit einer vorläufigen Leistung von 45 000 Kilo-Volt-Ampere an der geplanten Stelle bei Zschornewitz errichtet. Noch während des Krieges wurde es auf die vierfache Leistung von 180 000 Kilo-Volt-Ampere ausgebaut, und unter dem Zwange der immer schlimmer werdenden Energienot mußte auch die Stadt Berlin ihren Widerstand gegen das neue Kraftwerk aufgeben, so daß schließlich über den Betrieb der Stickstoffwerke hinaus eine ganz großzügige Fernversorgung Berlins von Zschornewitz aus zustande kam. Die erste Hochspannungsleitung von Golpa nach Berlin folgte ziemlich genau der Bahnlinie Berlin-Bitterfeld. Sie geht über Wittenberg und Luckenwalde nach dem Osten Berlins, wo in Friedrichsfelde eine neue große Umspannungsanlage für die von Zschornewitz kommende Energie errichtet wurde. Die gesamte Länge der Fernleitung beträgt dabei 132 Kilometer. Was man vor 25 Jahren zwischen Lauffen und Frankfurt als kühnen, der Zeit vorauseilenden Versuch unternommen hatte, wurde jetzt in der Not des Krieges als betriebsmäßige Anlage erfolgreich durchgeführt. Diese erste Fernleitung ist aber nur der Anfang zu etwas noch viel Größerem gewesen. Will man in der Geschichte der Technik noch einmal etwas Ähnliches finden, so muß man achtzig Jahre zurückgehen. Damals entstanden in Deutschland erst ganz bescheiden hier und dort einzelne Eisenbahnstrecken. Als Friedrich List mit seiner Schrift „Über ein sächsisches Eisenbahnsystem als Grundlage eines allgemeinen deutschen Eisenbahnsystems" an die Öffentlichkeit trat, wurde er lange Jahre als Phantast verlacht. Die Idee, daß sich die hier und dort erbauten Eisenbahnlinien zu einem einzigen, ganz Deutschland, ja das ganze Europa überspannenden Netz zusammenschließen müßten, schien allzu weit aus dem Bereiche aller Möglichkeit zu liegen (vgl. Band II, S. 164, 165).

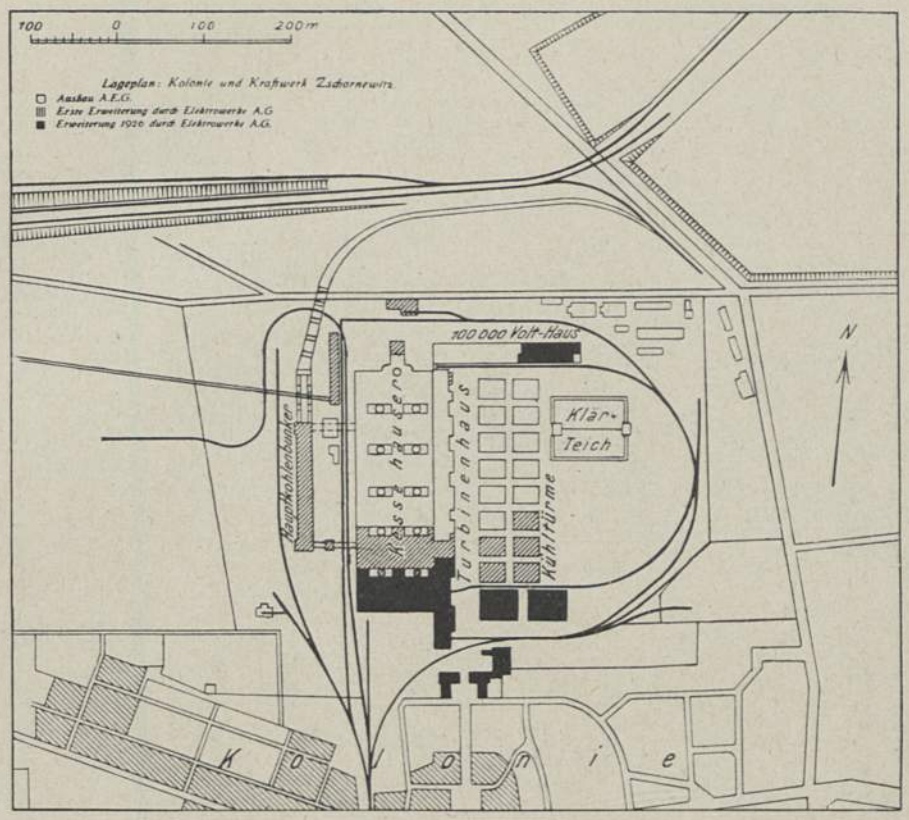


943. Vereinfachte Schaltbilder der Kraftwerke Golpa-Zschornewitz (links) und Hirschfelde (rechts)

Es ist bekannt, daß der Plan Lists trotz alledem im Laufe eines Menschenalters Wirklichkeit wurde, und ganz ähnlich scheint es in unseren Tagen mit der elektrischen Fernversorgung zu gehen. Der in Bild 940 gegebene Plan zeigt das Leitungsnetz, das mit den Großkraftwerken der Elektro-Werke A.-G. in Verbindung steht, nach dem Stande von 1927. Ein

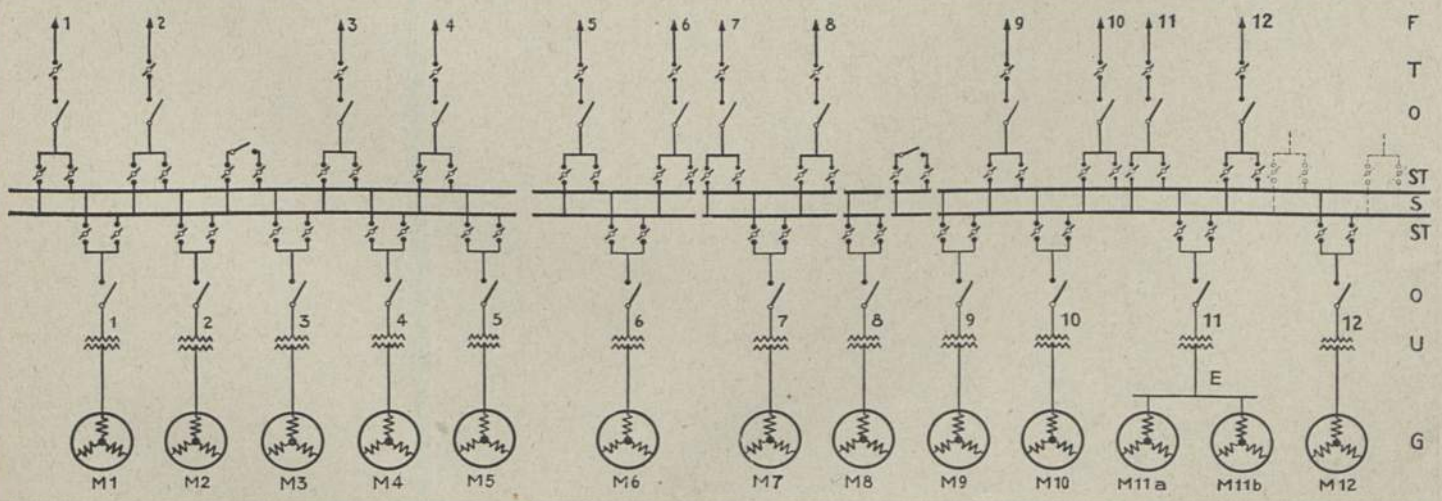
Blick auf diese Karte läßt erkennen, daß die einzelne Fernleitung von 1918 sich im knappen Laufe eines Jahrzehntes schon zu einem recht stattlichen Netz ausgewachsen hat. Neue Leitungen und neue Kraftwerke sind in dieser Zeit entstanden.

Die fast zu Tage anstehenden Braunkohlenvorkommen in Lauta und Trattendorf ermutigten zur Anlage weiterer großer Kraftwerke. Die Industrien von Brandenburg, Magdeburg, Leipzig, Chemnitz und Dresden verlangten großzügige Stromversorgung. So wuchs das Netz. Eine zweite Leitung von Golpa über Brandenburg nach Berlin. Zwei Leitungen von Trattendorf nach der Reichshauptstadt. Eine Ringleitung von Golpa über Nachterstedt und Großkayna für die Versorgung des Mansfelder Bergbaugebietes mit Abzweigungen nach Magdeburg und Leipzig. Eine Leitung von Trattendorf und Lauta nach Dresden und von hier aus ein weiterer Zusammenschluß von Golpa und Trattendorf über das Chemnitzer Gebiet. Ein neues Kohlengroßkraftwerk in Hirschfelde mit Anschluß an dieses Netz. Man kann wohl ohne Übertreibung sagen, daß das Kraftwerk Golpa mit seiner ersten Fernleitung eine Keimzelle gewesen und in den ersten zehn Jahren gewaltig gewachsen ist.




944. Lageplan des Großkraftwerkes Golpa-Zschornewitz

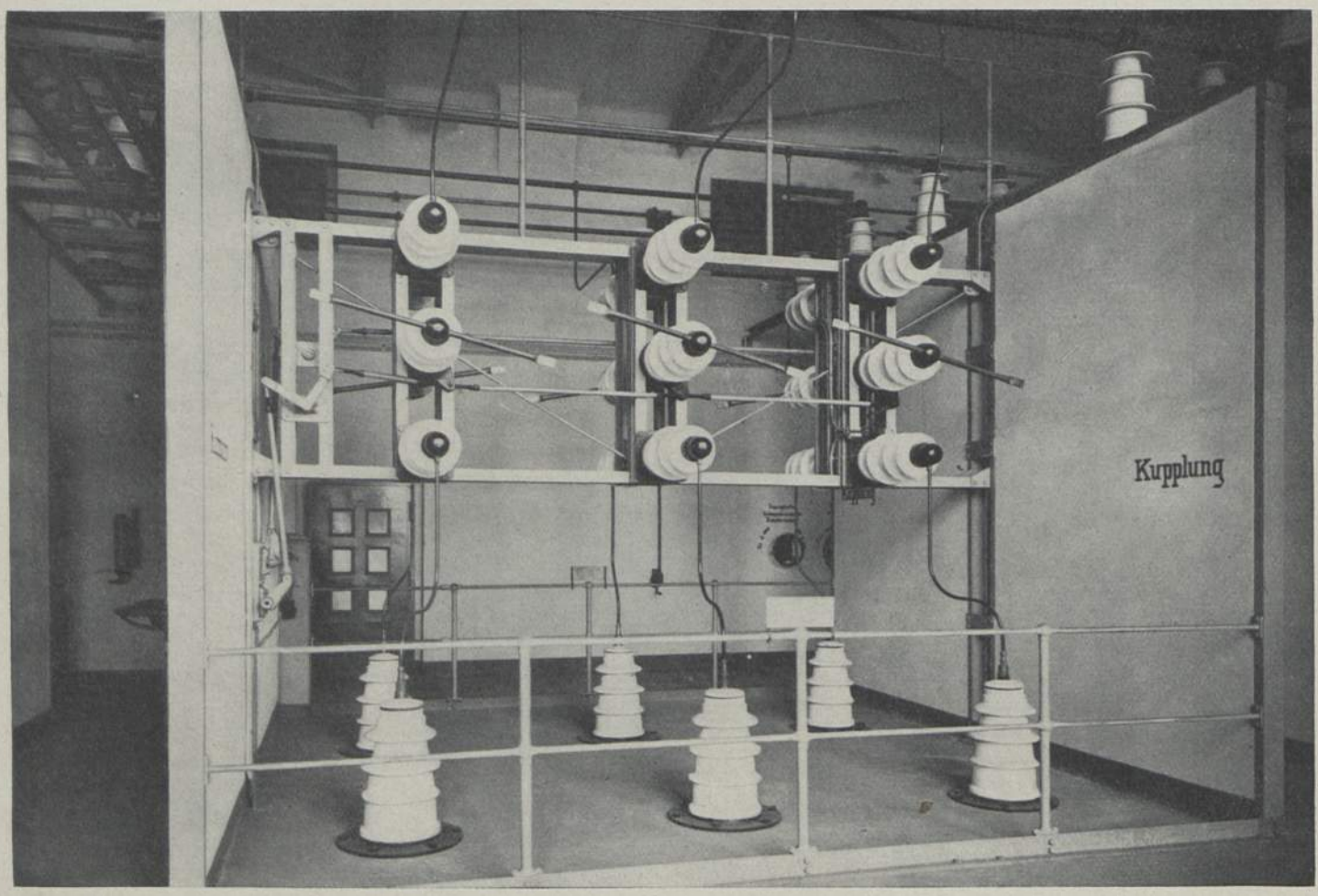
Die gegenwärtige Entwicklung der Fernkraftwerke geht unter dem Begriff der „Reichssammelschiene" vor sich. Dieser Begriff umfaßt die 110 000-Volt-Sammelschienen aller in den Jahren nach dem Kriege entstandenen Hochspannungswerke. Mögen sich diese in den Wasserkraftwerken Oberbayerns oder in den Torfkraftwerken Oldenburgs befinden, mögen sie in den Braunkohlenwerken Sachsens und Schlesiens oder in den Steinkohlenkraftwerken Westfalens und des Rheinlandes montiert sein, sie alle sollen, soweit es heut noch nicht geschehen ist, durch ein gemeinsames, das ganze Reich überspannendes 110 000-Volt-Netz verbunden werden, derart, daß sie sich für die Energieversorgung Deutschlands gegenseitig unterstützen und ihre Energie jederzeit dorthin senden können, wo gerade starke, für die nächsten Werke zu große Belastungsspitzen auftreten. Nach der vollkommenen Durchführung dieses Planes wäre es also möglich, daß zu gewissen Stunden die Energie der Bayerischen Kraftwerke die Motoren und Lampen in Berlin und Hamburg speist, zu anderen Stunden die Energie von Oldenburg bis München fließt. Aber diese Entfernungen sind so bedeutend, daß selbst die Spannung von 110 000 Volt für ihre wirtschaftliche Bewältigung nicht vollkommen auslangt, und daher erklären sich die Bestrebungen, für die „Reichssammelschiene" die Spannung von 220 000 Volt einzuführen. Transformatoren, Öl- und Trennschalter beherrschen diese Spannung heute bereits vollkommen.



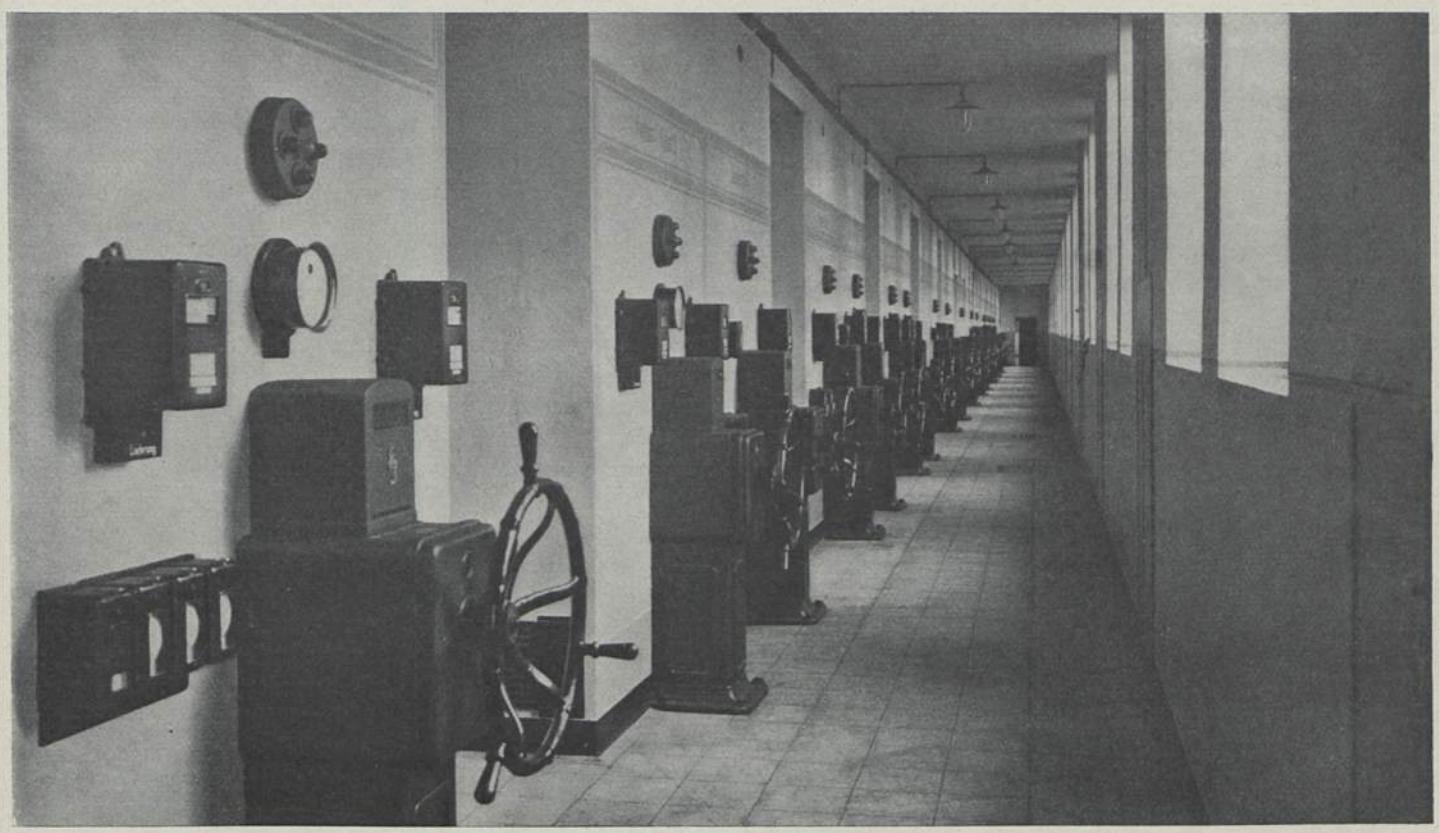

945. Schaltungsschema des Kraftwerkes Golpa-Zschornewitz nach dem letzten Ausbau

F Freileitungen, T Trennschalter, O Ölschalter, ST Sammelschienen-Trennschalter, S Sammelschienen, U Umspanner (Transformatoren 6100/110 000 Volt), G Generatoren: M 1 bis M 8: je 22 350, M 9 und M 10: je 18 750, M 11a: 14 700, M 11b: 14 300 und M 12: 47 500 Kilo-Volt-Ampere Leistung. E Sammelschiene für den Eigenbedarf

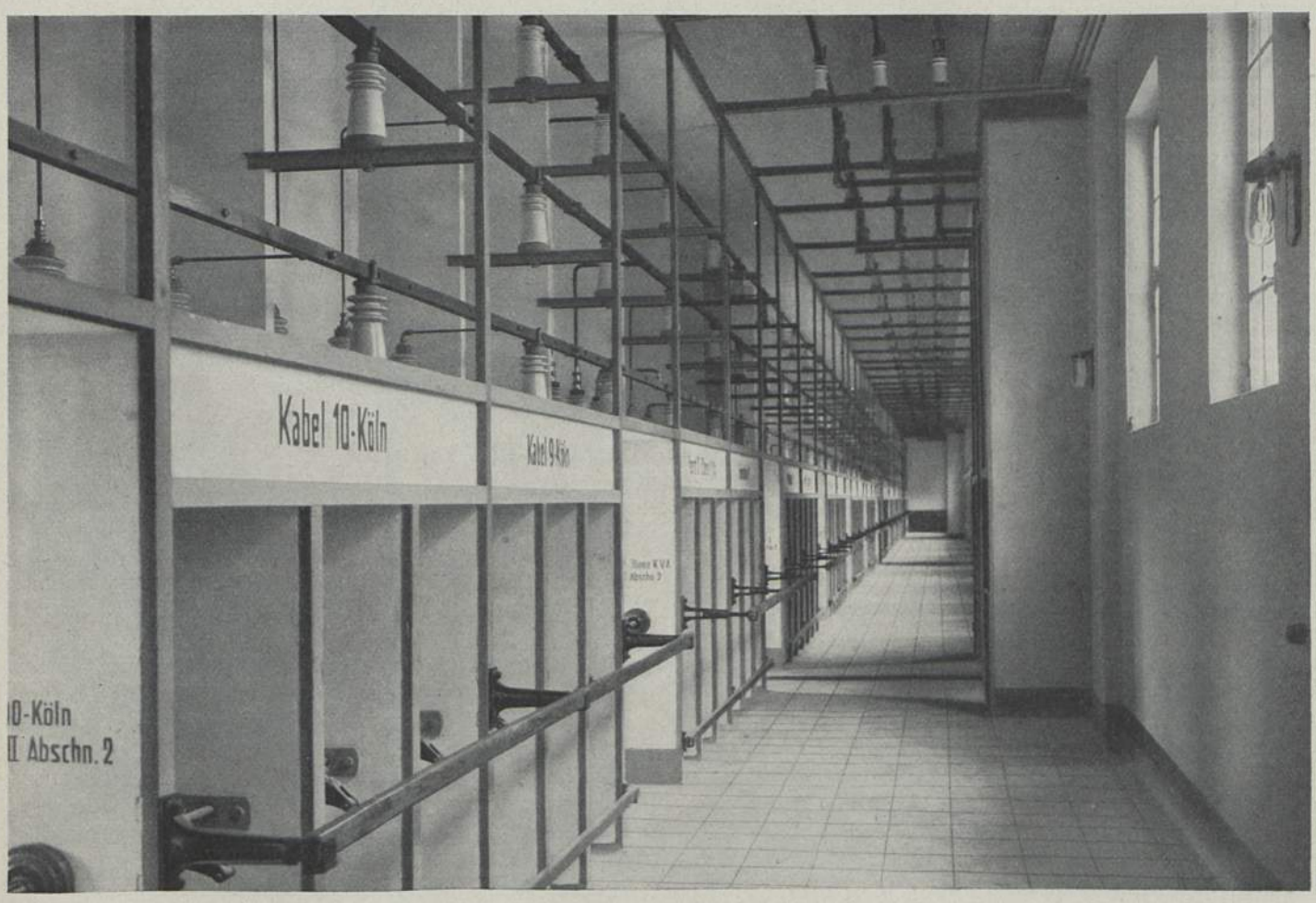
946. Schalthaus des Fernkraftwerkes Trattendorf mit 110 000-Volt-Leitungen




947. Trennschalter für 110 000 Volt in Golpa-Zschornewitz
Unter den drehbaren Mittelsäulen ist die Zugstange sichtbar, die ihrerseits durch einen Motor bewegt wird und die Schaltvorgänge bewirkt.
Elektrowerke A.-G., Berlin



948. Bedienungsgang im Ölschaltergeschoß des Kraftwerkes Fortuna I




949. Gang im Sammelschienengeschoß des Kraftwerkes Fortuna II

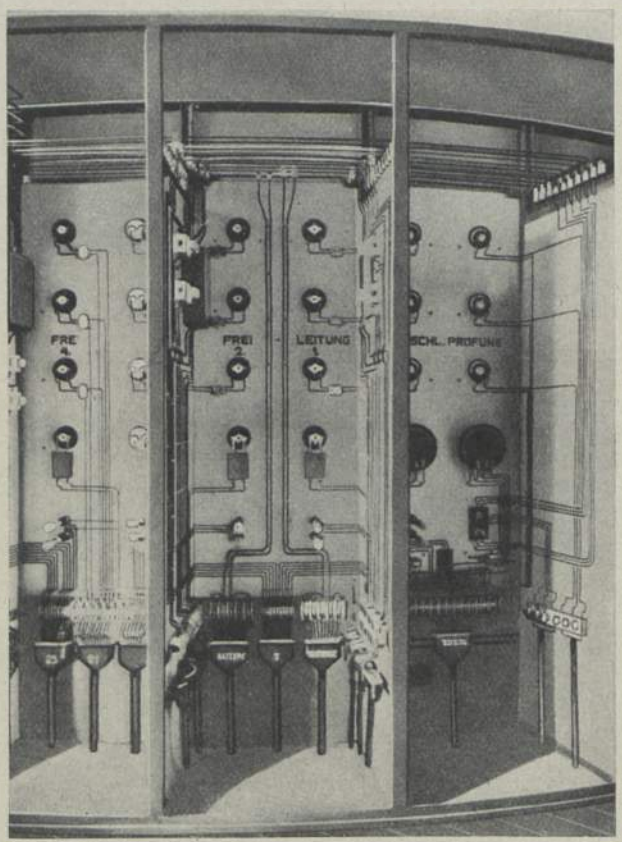
In den Zellen Hauptsammelschienen mit 25 000 Volt, an der Decke Hilfssammelschienen mit 6000 Volt.
Ausführung der Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

Schwierigkeiten machten die Freileitungen, bis es gelang, ihrer durch Leitungshohlseile (vgl. Seite 432) Herr zu werden.

Bild 944 gibt den Lageplan des Golpa-Werkes nebst der südlich davon gelegenen Kolonie für die Arbeiter und Beamten. Aus dem Plane geht hervor, daß die Kesselhäuser und die Kühltürme für die Rückkühlung des Kondenswassers den bei weitem größten Teil des Werkgeländes einnehmen, während das Maschinenhaus mit seinen Turbinen und Generatoren dazwischen fast verschwindet. In der Tat geben die neun gewaltigen, bis zu einer Höhe von 100 Metern aufragenden Schornsteine und die acht je 35 Meter hohen Kühltürme dem ganzen Werk das charakteristische Gepräge, wie Tafel XXVI erkennen läßt. Der Kohlenbedarf dieses Riesenwerkes erhellt aus der Tatsache, daß die Seilbahnen und Transportbänder, welche die Kohle aus dem Tagebau bis an die Kessel bringen, eine stündliche Förderleistung von 225 Tonnen besitzen.

Das Maschinenhaus ist 205 Meter lang, 16 Meter breit und bekam im ersten und zweiten Ausbau acht AEG-Turbinen mit je 18 000 Pferdestärken, direkt gekuppelt mit je einem Drehstromgenerator von 22 350 Kilo-Volt-Ampere. Die Generatoren erzeugen elektrische Energie von 6100 Volt Spannung. Bild 941 gibt einen Blick in das Maschinenhaus mit den einzelnen Aggregaten.

Bei seiner Errichtung war das Werk, wie bereits gesagt, ausschließlich für die Stickstofferzeugung geplant und führte den nur 25 Kilometer entfernten Reichsstickstoffwerken in Piesteritz an der Elbe 64 000 Kilowatt mit einer Spannung von 82 500 Volt zu, während 33 000 Kilowatt mit Generatorspannung in einer dicht neben dem Werk liegenden Salpeterfabrik Verwendung fanden. Aber die Not des Krieges zwang im Spätsommer 1917 zu dem Entschluß, das Werk durch eine Fernleitung mit Berlin zu verbinden, die in den ersten fünf Monaten des Jahres 1918 auch ausgeführt wurde. Bild 945 veranschaulicht das Schaltungsschema des voll ausgebauten Werkes. Die Generatoren geben ihre Energie auf die entsprechende Zahl von Transformatoren ab, welche die Spannung von 6100 auf 110 000 Volt erhöhen und die Energie weiter an die 110 000-Volt-Sammelschienen senden.




950. Rückseite der Instrumententafel des Walchensee-Kraftwerkes

Weder Hochspannungs- noch Hochstromleitungen werden an die Schalttafel geführt. AEG, Berlin. Vgl. Tafel X, 2

Bild 947 gibt einen Blick in das Innere des Hochspannungswerkes auf die Trennschalter. Zweimal drei Hochspannungsleitungen treten von unten her mit Hilfe von sechs Wanddurchführungsisolatoren in den Schaltraum und gehen zum Schaltrahmen. Nach oben hin gehen die Leitungen vom Rahmen ab zu wagerechten Verteilungsleitungen. Im Schaltrahmen sind sechs Messerschalter montiert, deren mittlere durch Fernbewegung drehbare Isolatoren die Schaltmesser tragen.

Bild 946 zeigt den Austritt der Hochspannungsleitungen aus dem Schalthause des Kraftwerkes Trattendorf. Der Übergang von der Innenleitung zu den Freileitungen vollzieht sich hier unter Benutzung wettergeschützter Nischen. Die Freileitungen kommen im Bilde von links und sind an Hochspannungsisolatoren, die als Isolatorketten ausgebildet sind, abgespannt, die ihrerseits an der Überdachung der Nischen befestigt sind. In jeder der Nischen treten weiter drei Hochspannungs-Mauerdurchführungsisolatoren ins Freie, von denen aus die Hausleitung in kleinem Bogen zu der darüber abgespannten Freileitung geführt ist.

Das Werk Golpa-Zschornewitz war das erste seiner Art, aber es ist nicht lange das einzige geblieben. Schon während des Krieges wurde an zahlreichen Stellen weitergebaut. So entstanden die bereits erwähnten Kraftwerke Trattendorf und Lauta bei Spremberg, welche mit Golpa zusammen für Mitteldeutschland die ersten Anfänge eines Reichsnetzes bilden. Ganz unabhängig davon erwuchsen im Süden unter der unermüdlichen Initiative Oskar von Millers andere, und zwar hauptsächlich Wasserkraftwerke (vgl. Abschnitt 26, Seite 145 bis 149), die heute bereits durch eine ganz Bayern durchziehende Ringleitung, den „Bayernring", zusammengeschlossen sind, in kommenden Jahren aber einen äußerst wichtigen Bestandteil des Reichsnetzes bilden werden.

Wir betrachten nun die Schaltungsarten und die angewandten Schaltungen solcher Kraftwerke. Den einfachsten Fall stellt eine Nahversorgung dar, die ohne Transformation mit der Maschinenspannung von etwa 5- bis 10 000 Volt möglich ist. Bild 942, 1 gibt das Schema eines solchen Werkes. Hier wie in den folgenden Darstellungen sind die drei Drehstromleitungen im Interesse einer besseren Übersichtlichkeit durch nur eine Leitung angedeutet. Als Apparate kommen automatische Ölschalter, Trennschalter und Transformatoren in Betracht. In Bild 942, 1 arbeiten drei Drehstromgeneratoren über Ölschalter und Trennschalter auf eine gemeinsame Sammelschiene. Nach außen hin gehen über Trennschalter, Ölschalter und nochmals Trennschalter vier Fernleitungen ab. Für die Hilfsbetriebe des Werkes selbst ist eine Transformation auf niedrige Gebrauchsspannung notwendig. Eine weitere Abzweigung von den Sammelschienen führt daher über einen Trennschalter und einen Ölschalter zu einem Transformator, an dessen Niederspannungsseite die Hilfsbetriebe hängen. Die Bilder 942, 2 bis 4 zeigen die drei Möglichkeiten für Kraftwerke mit einer Hochtransformation für die Fernversorgung. In Bild 942, 2 sind die Generatoren zunächst ebenso wie in dem vorhergehenden Schema über Ölschalter und Trennschalter an eine Mittelspannungssammelschiene gelegt. Von dieser geht es über die Transformatoren zu der Hochspannungssammelschiene und von dieser zu den Fernleitungen. Hier sind also zwei Sammelschienen notwendig, eine Komplikation, die nicht unbedingt erforderlich ist. Das

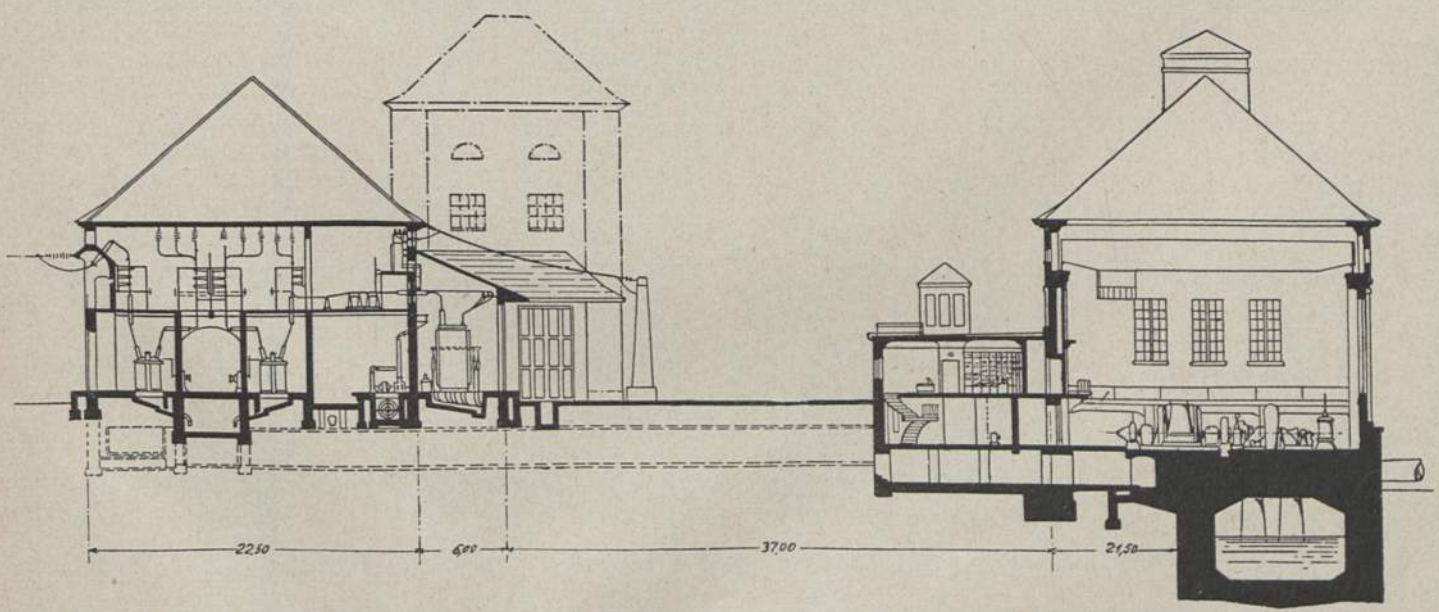
Das Großkraftwerk Golpa-Zschornewitz aus der Vogelschau

Links: Brecherhaus, Mitte: Kessel- und Maschinenhaus, rechts: Kühltürme, dahinter die Fernleitung. Die Kohlenfelder liegen in einiger Entfernung (links vom Bild). Von dort wird die Braunkohle mittels Kettenbahn ins Brecherhaus, von da durch zwei schräge Trogförderer zur Verteilungsanlage geschafft. Gurtförderer führen sie den einzelnen Bunkern in den Kesselhäusern zu

Schema in Bild 943, 3 zeigt eine Anordnung mit nur einer Hochspannungssammelschiene. Jeder Generator bildet mit seinem Transformator eine geschlossene Einheit. Eine Komplikation könnte man darin erblicken, daß hier die Energie für die Hilfsbetriebe erst bis auf Hochspannung und dann wieder bis auf Verbrauchsspannung zurücktransformiert wird. Eine gewisse Schwäche könnte man darin sehen, daß ein defekt werdender Generator auch seinen zugehörenden Transformator aus dem Betriebe zieht und umgekehrt ein Transformator seinen Generator. In dem Schema 942, 4 ist nur eine Mittelspannungsschiene vorgesehen, auf welche die Generatoren arbeiten und an der über einen Transformator die Hilfsbetriebe hängen, während nach oben hin die Fernleitungen über ihre einzelnen Transformatoren abgehen. Hier fehlen zwar die an dem vorangehenden Schema bemerkten Schwächen. Dafür aber wird hier die einzelne Fernleitung durch einen ausfallenden Transformator außer Betrieb gesetzt. Welche Schaltungen für Großkraftwerke zur Anwendung kommen, mögen die beiden Schaltbilder in Bild 943 zeigen. Links ist die Schaltung des Kraftwerkes Golpa nach Berlin vor dem letzten Ausbau dargestellt. Die drei Generatoren arbeiteten über Ölschalter und doppelte Trennschalter auf eine Mittelspannungssammelschiene, von der wiederum über Trennschalter und Ölschalter die Transformatoren zu den Hilfsbetrieben abzweigten. Sie arbeiteten außerdem über Trennschalter auf eine zweite Mittelspannungsschiene und unabhängig von dieser Schiene über andere Trennschalter auf ihre Hochspannungstransformatoren. Von diesen ging es über Ölschalter und Trennschalter zur Hochspannungssammelschiene, von der die einzelnen Fernleitungen abzweigten. Man muß bei der Betrachtung aller dieser Darstellungen immer im Auge behalten, daß der automatische Ölschalter durchaus einer Schmelzsicherung entspricht, die irgendeinen schadhaft werdenden Stromkreis sofort abschaltet, daß die Trennschalter dagegen normale Betriebsschalter sind, durch deren Öffnen oder Schließen man beliebig Verbindungen herstellen und unterbrechen kann. Selbstverständlich immer unter der Vorsicht, daß man den zu unterbrechenden Kreis vorher möglichst entlastet. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache wird man schnell die vielfachen Sicherheiten und Möglichkeiten erkennen, welche das in Bild 945 gezeigte Schaltbild enthält. Das Schaltbild des Kraftwerkes Hirschfelde ist dadurch gekennzeichnet, daß hier ein Teil der Energie mit Generatorspannung für die nähere Umgebung abgezweigt wird, ein anderer Teil in der üblichen Weise zu der Hochspannungsschiene geht.

951. Unterirdischer Verbindungsgang
zwischen Maschinen- und Schalthaus des Walchensee-Kraftwerkes. AEG, Berlin

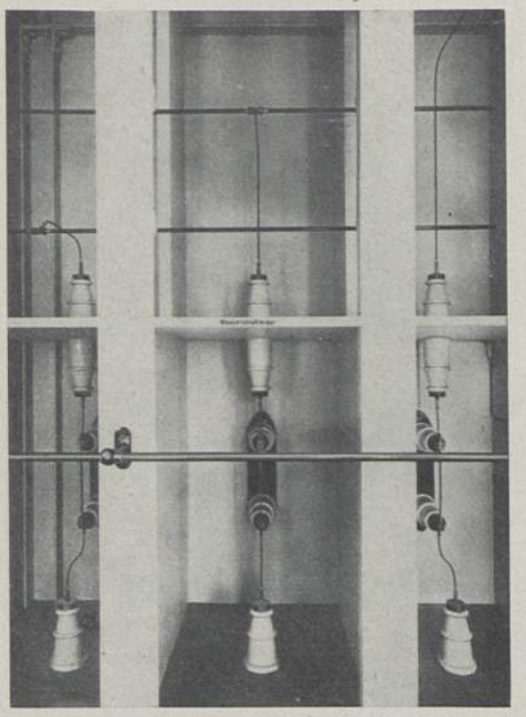
Was in den eben gezeigten Schaltungsschemen sehr einfach und übersichtlich erscheint, gewinnt nun in der wirklichen Ausführung doch noch ein erheblich anderes Aussehen. Erstens muß man berücksichtigen, daß jede der dort gezeigten einfachen Leitungen ja tatsächlich drei Drehstromleitungen versinnbildlicht. Diese Leitungen mit Spannungsdifferenzen bis zu 110 000 Volt sind in solcher Entfernung von allem leitenden Mauerwerk und voneinander zu führen, daß keine Überschläge der Spannung mehr möglich sind. Sie sind aber auch gegen jede Möglichkeit, daß Menschen mit ihnen in Berührung kommen, sorgfältigst zu sichern. Wie das bei den praktischen Ausführungen geschieht, zeigt beispielsweise Bild 953. Die drei Leitungen befinden sich dabei in entsprechend großen Kanälen des in Beton aufgeführten Schalthauses. Infolge dieser Anforderungen werden die Schalthäuser recht umfangreich und stehen den Maschinenhäusern häufig an Größe nicht nach.




952. Querschnitt durch das Schalthaus und Maschinenhaus der Drehstromseite des Walchensee-Kraftwerkes
Vgl. Tafel X, 1

Dazu kommt weiter der Umstand, daß die zugehörigen Apparate, wie Ölschalter, Trennschalter, und schließlich die Transformatoren sehr achtunggebietende Abmessungen besitzen, wie die Bilder in Abschnitt 32 auf Seite 423 bis 426 und Tafel XXV sattsam dartun. Bild 949 zeigt einen Gang im Sammelschienengeschoß des Kraftwerkes Fortuna II, Bild 954 den Mittelgang im 110 000-Volt-Schalthaus dieses Werkes.

Zu erörtern bleibt noch die Bedienung der Öl- und Trennschalter. Sie kann entweder durch elektromotorischen Antrieb oder durch einen Gestängeantrieb erfolgen. In jedem Falle aber geschieht sie durch einen Fernantrieb, d. h. die bedienende Person ist so weit von den Apparaten entfernt und derartig durch starke, feuersichere Wände getrennt, daß jede Gefährdung durch die Hochspannung ausgeschlossen ist. Bild 948 zeigt den Bedienungsgang im Ölschaltergeschoß des Kraftwerkes Fortuna I und läßt diese Art der Fernbedienung erkennen.

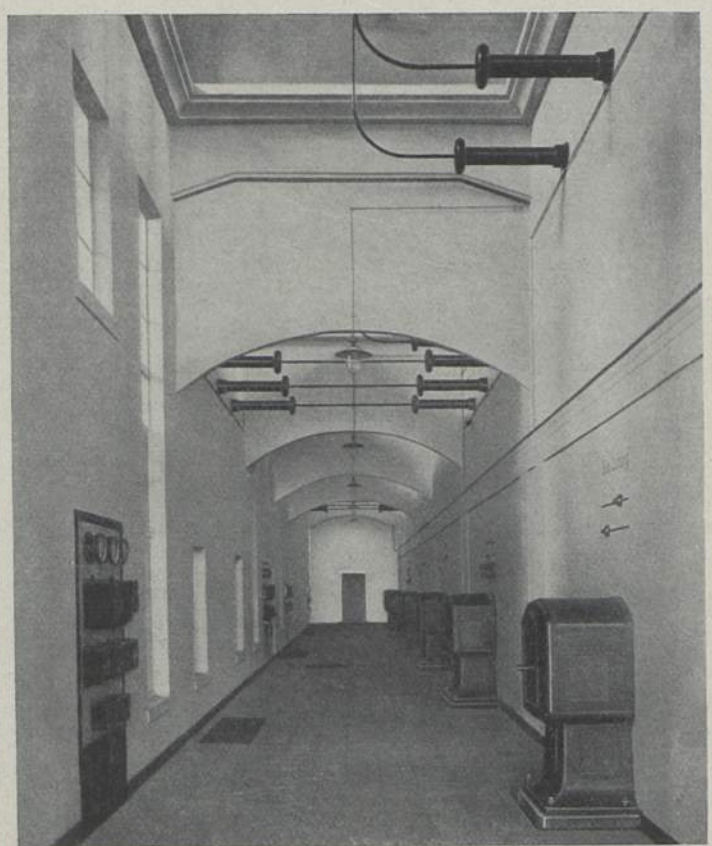


953. Stütz- und Durchführungsisolatoren
für Trennschalter und Sammelschienen (40 000 Volt) im Fernkraftwerk Hirschfelde. AEG, Berlin

Bevor weiter auf die Einzelheiten der modernen Großkraftwerke eingegangen wird, möchten wir nochmals auf das in Abschnitt 26, S. 145—148, ausführlich besprochene Walchenseewerk zurückkommen, das mit seinen 168 000 Pferdestärken zurzeit als das größte deutsche Wasserkraftwerk anzusprechen ist und nur von wenigen amerikanischen Werken übertroffen wird. Welche Bedeutung diese bewundernswerte Schöpfung besitzt, geht aus folgender Betrachtung hervor:

Rechnet man, daß sich mit besten Maschinen und Kesseln die Pferdekraftstunde mit einem halben Kilogramm guter Steinkohle erzeugen läßt, so erspart dies Werk, volle Belastung angenommen, der deutschen Energiewirtschaft stündlich 85 Tonnen Kohle, und das Jahr, zu 8000 Stunden gerechnet, ergibt eine jährliche Kohlenersparnis von 680 000 Tonnen, die 34 000 große Güterwagen füllen würden.

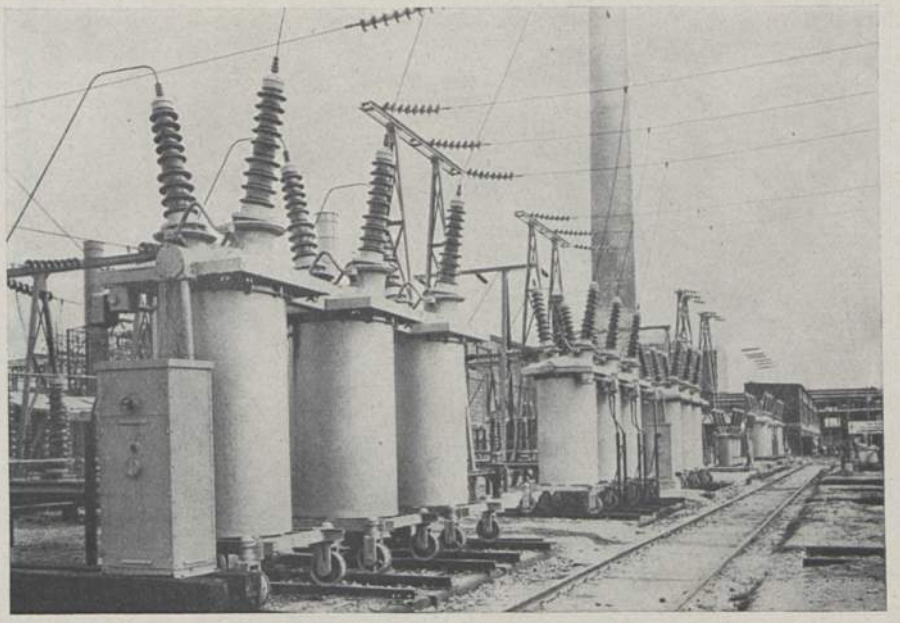
Bild 952 zeigt einen Querschnitt durch das Werk (vgl. Tafel X, 1). Rechts steht das Krafthaus, an das sich nach links der Schalttafelraum anschließt. Ganz links befindet sich das Schalthaus, welches ungefähr die gleichen Abmessungen wie das Maschinenhaus hat. In ihm sind die Transformatoren, Trennschalter und Ölschalter untergebracht, und vom ihm gehen die 110 000-Volt-Leitungen des Bayernringes und der Reichsbahn aus. Die Verbindung zwischen den Maschinen des Krafthauses und den Apparaten des Schalthauses erfolgt durch Hochspannungskabel, die in einem unterirdischen Gang verlegt sind (Bild 951). Das eigentliche Hirn des ganzen Werkes bildet der in dem Anbau des Krafthauses gelegene Kommandoraum, der die gesamten Meßinstrumente und Fernschalter enthält. Bild 2 auf Tafel X gibt einen Blick auf die Meßinstrumententafeln des Kommandoraumes und zeigt links die Drehstromseite und rechts die Einphasenseite. Die Meßinstrumente sind auf senkrechten Tafeln angeordnet, vor denen sich die Schaltpulte mit den Fernschaltern befinden. Bild 950 gibt einen Blick auf die Rückseite dieser Tafeln und läßt erkennen, daß keinerlei Hochspannung, weder Maschinenspannung noch Transformatorspannung hierher gelangt. Die zu messende Energie wird den Meßinstrumenten bereits durch Meßwandler (vgl. Seite 474) entsprechend reduziert zugeführt, und die Betätigung der Schalter erfolgt auf elektrischem Wege durch Strom von gewöhnlicher Lichtspannung. In der Kommandostelle arbeitet der diensttuende Ingenieur etwa wie der Generalstabsoffizier einer Armee. Hier empfängt er telephonisch die Energieanforderungen von den verschiedenen Stellen des bereits genannten Bayernringes, der sich weit bis nach Franken hinein erstreckt. Von hier gibt er telephonisch die Befehle für das Anlassen oder Stillsetzen von Turbinen in das Krafthaus, und hier betätigt er Druckknöpfe und winzige Installationsschalter, worauf im Schalthause Motoren zu laufen beginnen, die Trennschalter bewegen und die Verbindungen herstellen oder unterbrechen. Ein kurzer Telephonanruf von München, und schon fünf Minuten später flutet eine Zusatzenergie von Zehntausenden von Pferdestärken durch die Aluminiumseile nach dem Norden.



954. Mittelgang im 110 000-Volt-Schalthaus des Kraftwerkes Fortuna II

Durch die an der rechten Gangseite stehenden Schaltkästen werden die Hochspannungsschalter mit Hilfe von Niederspannungsmotoren betätigt. Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

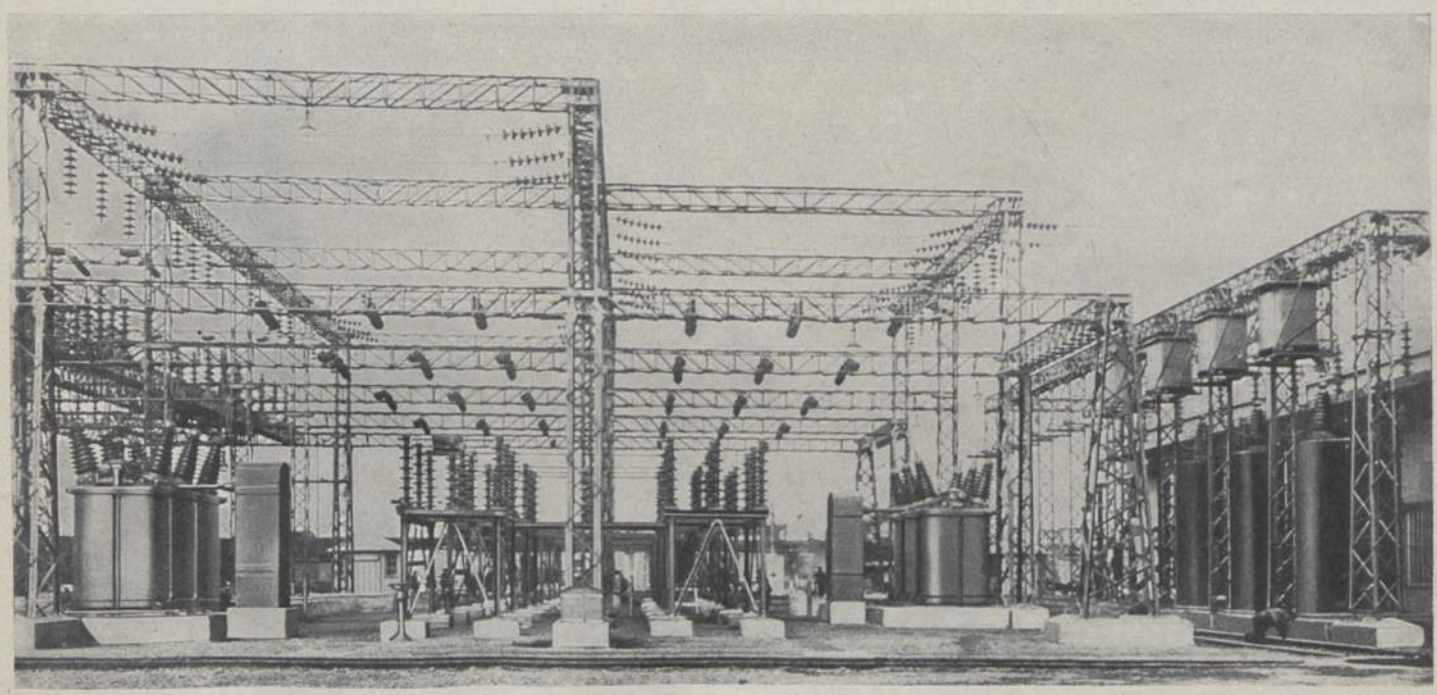
Die Energie, welche die Großkraftwerke an den Orten natürlicher Energievorkommen erzeugen und mit 110 000 Volt über das Land verbreiten, muß in den verschiedenen Verbrauchsgebieten schließlich bis auf die Verbrauchsspannung hinuntertransformiert werden. Das erfolgt in mehreren Stufen. Die Tafel XXII zeigt ein solches Verteilungssystem von einem 30 000-Volt-Kraftwerk aus. Beim 110 000-Volt-Werk schiebt sich eine neue Etappe ein, das Umspannwerk, das den mit 110 000 Volt ankommenden Fernstrom zunächst einmal für ein kleineres, aber immer noch Städte und Dörfer umfassendes Versorgungsgebiet auf 30- bis 20 000 Volt hinuntertransformiert. Wir haben bei der Betrachtung der Großkraftwerke gesehen, welche bedeutenden Räume und Baulichkeiten die Apparate und Leitungen für die heut gebräuchlichen Höchstspannungen beanspruchen. Für die Großkraftwerke ließ sich das nicht vermeiden. Für die Umspannwerke ist man dagegen auf eine Verbilligungsmöglichkeit verfallen, die zunächst paradox klingt und am besten durch die Bilder 955 und 956 erläutert wird. Man spart sich nämlich das ganze Schalthausgebäude und führt das Umspannwerk als Freiluftstation aus. Bild 955 zeigt die von den Siemens-Schuckertwerken aufgeführte Freiluftstation Böhlen der Sächsischen Werke A. G.



955. Freiluftschaltanlage Böhlen für 110 000 Volt
der Sächsischen Werke A.-G. 110 000-Volt-Dreikessel-Ölschalterkessel mit eingebauten Wandlern für Strom- und Spannungsmessung. Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin

Im Vordergrunde sind die charakteristischen Ölschalter mit ihren Hochspannungsisolatoren zu sehen. Die Idee der Freiluftstationen wurde durchführbar, weil die gesamten, dafür benötigten Apparate wie Ölschalter und Transformatoren bereits an sich und aus ganz anderen Gründen vollkommen wetterfest gekapselt werden und die übrigen Teile, wie Trennschalter und Isolatoren, ja ohnedies einem Freiluftbetrieb angepaßt sind. Man benötigt daher nur einen verhältnismäßig kleinen Bau, der die Kommandostelle mit den Schalttafeln und Fernsteuerungen enthält, und von dem aus die im Freien stehenden Apparate betätigt werden.

Von dem Umspannwerk zweigen dann die lokalen Leitungen ab, die etwa noch 20 000 bis 30 000 Volt führen, und verteilen die Energie über Land auf die einzelnen Dörfer und Flecken. Dort findet wiederum eine Umspannung statt. Gewöhnlich wird auf 3000 Volt hinuntertransformiert. Transformatorenstationen dieser Art zeigt die Tafel XXII (12), sie sind heute auf dem Lande eine allgemein bekannte Erscheinung. Man verläßt hier das Prinzip der Freiluftstation und wählt geschlossene Betonhäuser geringen Umfanges von meist turmartiger Ausführung. Für diese Transformatorenstationen ist eine ständige Bedienung nicht mehr erforderlich. Sie sind zwar gewöhnlich



956. Freiluftstation Wien-Nord

noch mit Ölschaltern auf beiden Seiten des Transformators ausgerüstet. Normalerweise aber liegen ihre Schaltungen fest, und nur bei schweren Störungen müssen die Ölschalter in Funktion treten und die kranke Leitung ausschalten. Von diesen Transformatorenhäusern zweigt dann, wie bereits in einem früheren Kapitel geschildert, das 3000-Volt-Netz der einzelnen Ortschaft ab, das an geeigneten Straßenkreuzungen die Transformatoren enthält, welche die letzte Umformung vornehmen und Strom von Verbrauchsspannung in das Ortsnetz liefern. In größeren Orten sind diese Stationen in den Anschlagsäulen untergebracht, oder man gibt den Stationsgehäusen wenigstens die Form dieser Säulen. In Dörfern und einfachen Landflecken verlegt man aus Billigkeitsgründen gewöhnlich auch das Niederspannungsnetz als Freileitung und setzt diese Transformatoren einfach auf an den Leitungsmasten angebrachte Podeste, so daß man hier noch einmal zur Freiluftstation zurückkehrt.

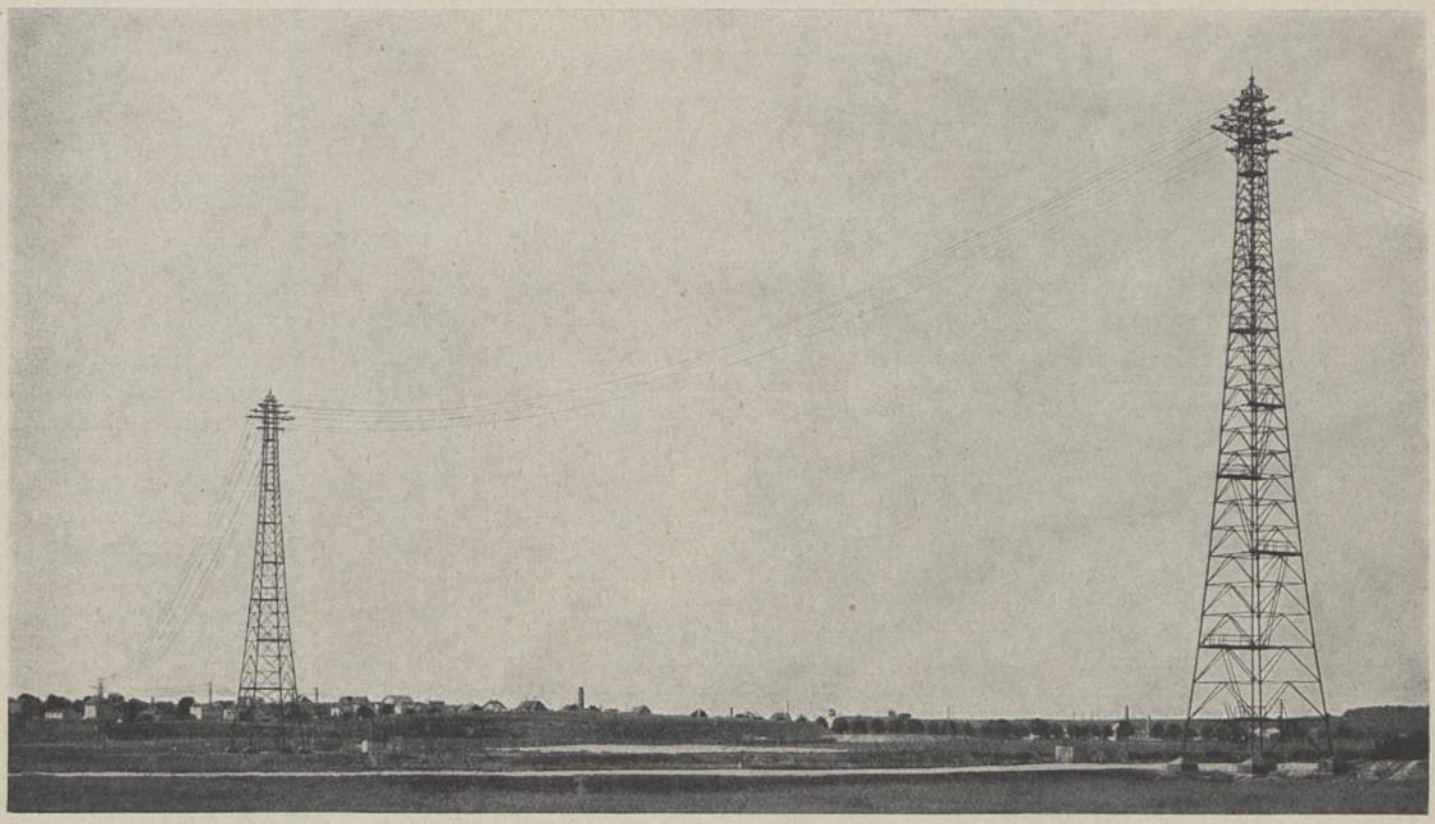
957. Dr. phil. Dr.-Ing. E. h. Georg Klingenberg
der Schöpfer des neuen Großkraftwerkes in Rummelsburg bei Berlin

Die Hochspannungsfernleitung, die zum erstenmal vor 37 Jahren zwischen Frankfurt und Lauffen in die Erscheinung trat, durchzieht die Länder heut in Längen von vielen Tausenden von Kilometern. Längst hat sich auch der Bauer mit ihr abgefunden und schätzt sie als die Zubringerin von Licht und Kraft, die es ihm gestatten, seinen Betrieb angenehmer und wirtschaftlicher zu führen. Für die großen Überlandleitungen mit 110 000 Volt werden dabei ausnahmslos eiserne Gittermaste benutzt, welche die drei Leitungen an Quertraversen und hängenden Isolatorketten in hinreichender Höhe über das Gelände hinwegführen. Die Aufstellung dieser Masten erfolgt in verschiedener Weise. Bisweilen werden sie fertig zur Baustelle gefahren und in einem Stücke aufgerichtet. Bisweilen, namentlich bei sehr hohen Masten, werden sie schußweise aufgestellt. Man errichtet erst den unteren Mastteil, an dem gleich ein hölzerner Windenbaum befestigt ist, hißt dann an diesem Baum die obere Masthälfte empor und vernietet sie mit der unteren. Besonders hohe Masten werden bei Flußüberkreuzungen notwendig, da sich die Leitungen hier in einer solchen Höhe befinden müssen, daß sie noch hinreichend weit von den höchsten Spitzen und Masten der Wasserfahrzeuge abbleiben. So zeigt Bild 959 die Masten der Travekreuzung bei Lübeck. Die Masten, an denen die Golpaer Leitung die Elbe bei Wittenberg übersetzt, sind 70 Meter hoch. Bisweilen erleichtern freilich bergige Ufer den Flußübergang und gestatten es, mit verhältnismäßig niedrigen Ufermasten auszukommen. Ein gutes Beispiel dafür gibt die Rheinkreuzung bei Andernach, deren Abspannung durch die Bilder 958 und 960 veranschaulicht wird. Die Entfernung zwischen den beiden Ufermasten beträgt hier 739 Meter, und aus Festigkeitsgründen mußte man den Leitungsseilen einen recht bedeutenden Durchhang geben. Trotzdem bleiben die Seile an ihren tiefsten Stellen noch 44 Meter über dem Rheinmittelwasser, so daß die Schiffahrt sicher nicht behelligt wird. Bemerkenswert ist es, daß selbst bei so großen Spannweiten ein Zusammenschlagen der Seile im Sturmwind, das natürlich einen schweren Kurzschluß bedeuten würde, zuverlässig vermieden wird.

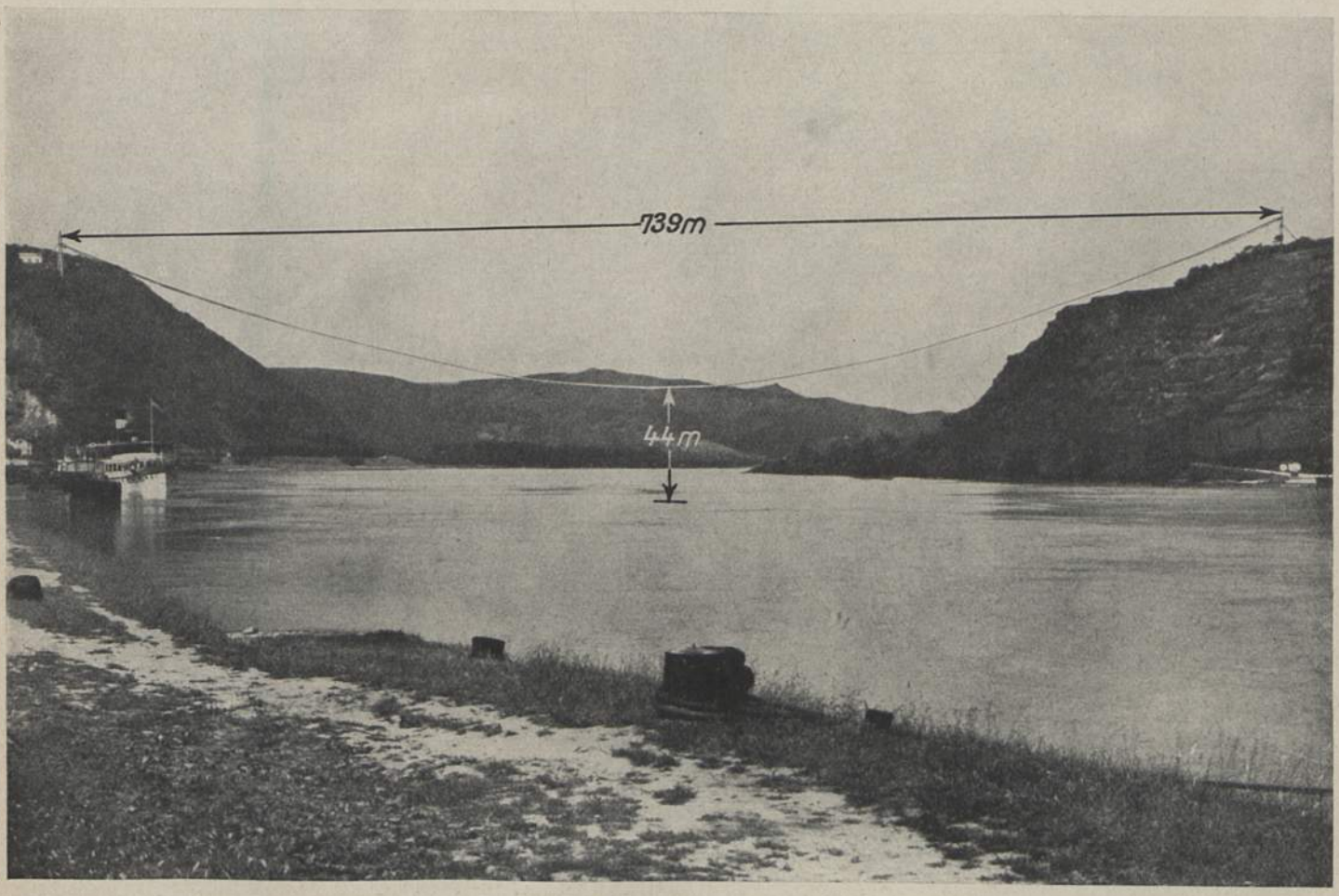
Gegen die Gewalt der Elemente, gegen atmosphärische Störungen und Blitzschläge und gegen gelegentlich in Form der gefürchteten Wanderwellen auftretende Überspannungen weiß die Starkstromtechnik heute ihre Überlandleitungen vorzüglich zu schützen. Wiederholt haben sie Wirbelstürmen widerstanden, welche die stärksten Bäume entwurzelten. Ein Kapitel für sich bilden dagegen die böswilligen Angriffe von Menschenhand. Zum Glück schützt sich aber jede Hochspannungsleitung in hohem Maße selber. Das mußten schon vor 25 Jahren zu ihrem Leidwesen die afrikanischen Eingeborenen erfahren, als man die ersten Hochspannungsleitungen von den südafrikanischen Kraftwerken zu den Goldminen spannte. Der blanke, starke Kupferdraht war ja das gegebene Rohmaterial für Schmuckstücke wie Hals- und Armbänder. Mehr als ein Hottentotte und Klippkaffer geriet dabei in die Drähte und verbrannte bis zur Unkenntlichkeit, bevor er noch recht wußte, was geschah. Heute weiß der schwärzeste Neger, daß es nicht gut ist, einer Hochspannungsleitung zu nahe zu kommen, und auch in Europa haben einige wenige warnende Fälle bewirkt, daß Übermut und Zerstörungswut sich andere Objekte als gerade diese Leitungen aussuchen.

958. Ufermasten der Rheinkreuzung bei Andernach

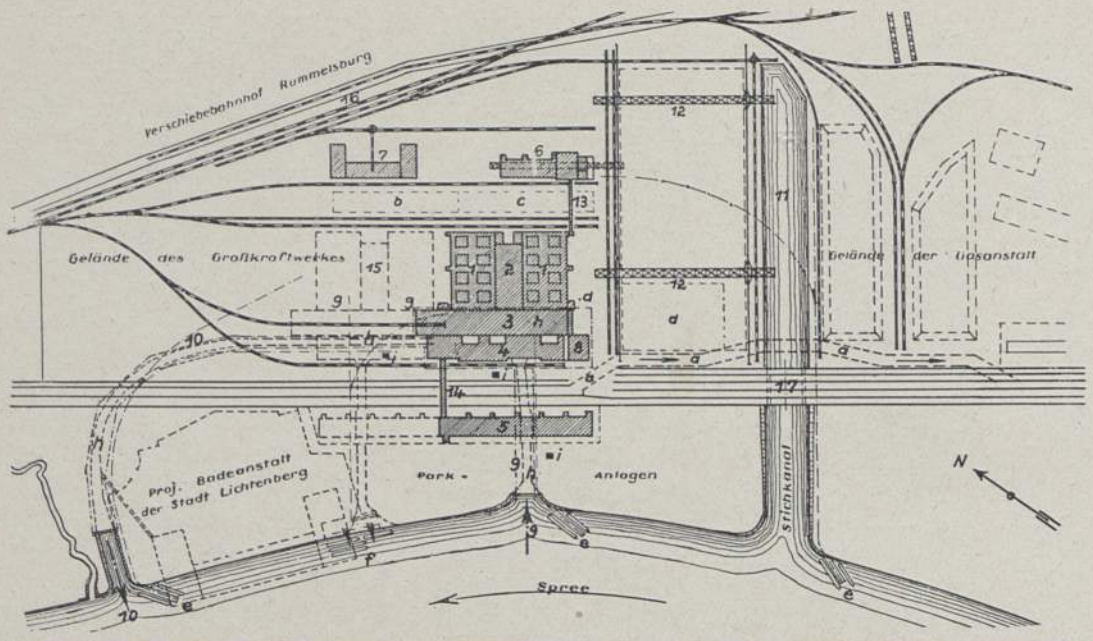
Zusammen mit den gewaltigen Kraftwerkshäusern, die sich heut überall erheben, wo natürliche Energievorräte lagern, vervollständigen diese Überlandleitungen das Bild unseres



959. Übersetzung der Trave in der Nähe von Lübeck mit einer Hochspannungsleitung
Die Leitung überschreitet den Fluß in rund 70 Metern Höhe, um die Schiffahrt nicht zu behindern




960. Rheinkreuzung bei Andernach
Die hohen Uferberge gestatten es, eine Entfernung von 739 Metern zu überbrücken. An der tiefsten Stelle bleibt die Leitung dabei noch 44 Meter über dem Wasserspiegel. Ausführung der Siemens-Schuckertwerke A.-G., Berlin




961. Bauplan des Großkraftwerkes Klingenberg in Rummelsburg bei Berlin

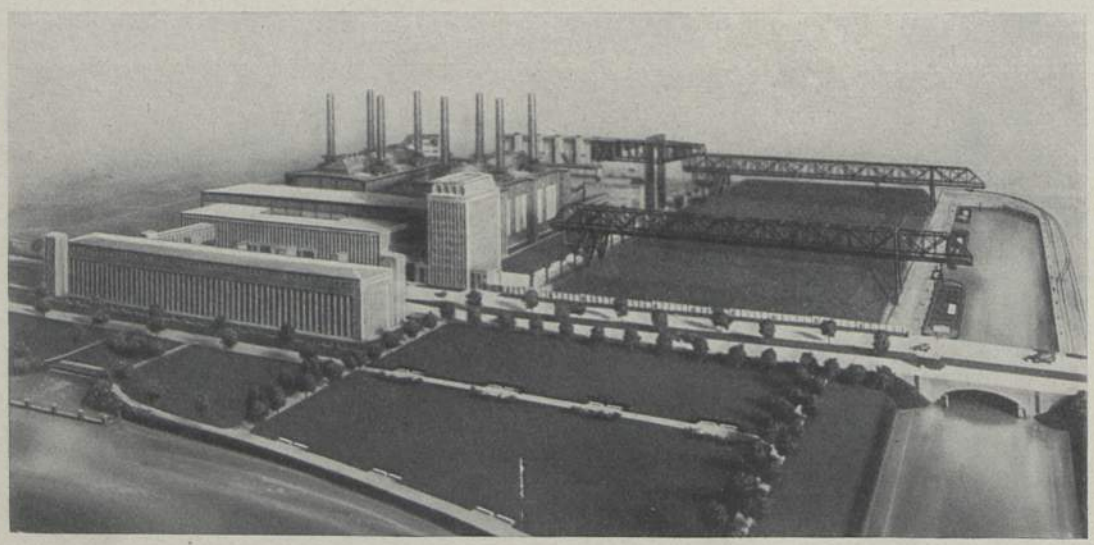
Bauwerke: 1 Kesselhäuser, 2 Vorwärmeanlage, 3 Turbinenhaus, 4 Anbau für Pumpen-, Siebe-, Transformatoren-, 6000-Volt-Anlage, Betätigung und Umformer, 5 30 000-Volt-Schalthaus, 6 Kohlenmahlanlage, 7 Werkstatt und Lager, 8 Wohlfahrts- und Bürogebäude, 9 Kühlwasser-Einlauf, 10 Kühlwasser-Auslauf, 11 Stichkanal für Kohlenanfuhr, 12 Kohlenlager, 13 Verbindungsbrücke für Kohlenstaubleitungen usw., 14 Verbindungsbrücke für Kabel, 15 vorgesehene Erweiterung, 16 Anschlußgleise, 17 Brücke. Baustelleneinrichtung: a provisorische Straßenumlegung, b Lager für Kesselteile, c Lager für Eisenkonstruktion n, d Baustofflager für Hochbau, e Verladebrücken für Bodenabfuhr, f Löschstelle für Baumaterial, g Baustofflager für Tiefbau, h Gebiet der Wasserspiegelsenkung, i Pumpstationen zu h

elektrischen Zeitalters. Wie wird die Weiterentwicklung vonstatten gehen? Einstweilen ist die Technik dabei, nicht nur diese Energievorkommen restlos auszunutzen, sondern auch noch weiter in den Lauf der Dinge einzugreifen, wie es bereits beim Walchenseewerk geschah. Schon ist ja das nächste gewaltige Projekt des Rhein-Main-Donau-Kanals bis zur Ausführung gediehen. Da wird der Lech nicht mehr wie bisher in die Donau, sondern in die Scheitelhaltung des geplanten Kanals fließen, nachdem er die Donau selbst auf einer hohen Kanalbrücke überschritten hat. Seine Wasser werden nicht mehr zum Schwarzen Meere eilen, sondern durch den Kanal, den Main und den Rhein zur Nordsee fließen. An den Stufen des neuen Kanals aber werden 30 neue Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von rund 200 000 Pferdestärken entstehen, für welche die Wasserkraft erst durch die erwähnten Umleitungen geschaffen wird. Das ist der nächste bereits abzusehende Schritt. Aber der Energiehunger wird weitergehen, und die Starkstromtechnik bietet die Mittel, ihn zu stillen.

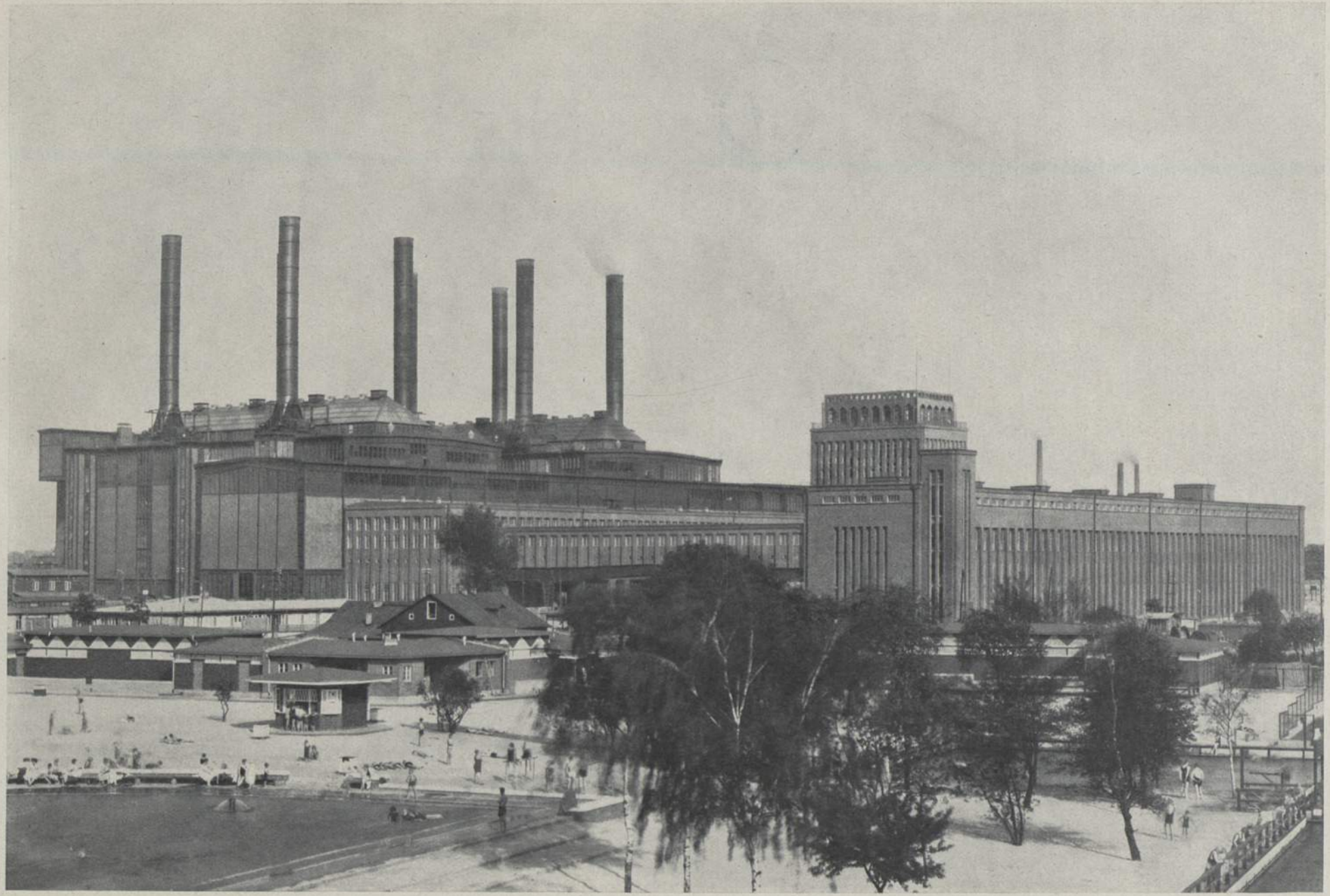
Betrachtet man diese Riesenprojekte, so möchte es fast scheinen, als ob die Zeit der im Versorgungsgebiete selbst gelegenen Kraftwerke endgültig vorüber sei. Viel umkämpft wurde daher auch das Projekt des Berliner Magistrats, in nächster Nähe von Berlin, bei Rummelsburg an der Spree ein Großkraftwerk zu errichten, das nun naturgemäß auf die Verfeuerung westfälischer und schlesischer Steinkohle angewiesen ist, die auf dem Wasserwege dorthin gelangt. Es wurde nicht ganz ohne Grund dagegen geltend gemacht, daß ein Kraftwerk, welches der Erzeugung von 200 000 Kilowatt dient, unter allen Umständen eine gewisse Rauch- und Rußmenge erzeugt, die dem Berliner Weichbilde nicht unbedingt zuträglich ist. Auf der anderen Seite wuchs aber der Energiehunger der Reichshauptstadt so gewaltig, daß sich die Stadtverwaltung, die ja auf den Ausbau der Fernkraftwerke im günstigen Falle nur einen mittelbaren Einfluß hat, zu diesem Schritt entschloß. Wie richtig er letzten Endes doch war, geht am besten aus der Tatsache hervor, daß das neue Kraftwerk „Klingenberg" trotz seiner wahrhaft gigantischen Abmessungen, kaum ein Jahr nach seiner Eröffnung, schon wieder zu klein war. Berlin hätte eine Zeit schlimmsten Energiemangels durchmachen müssen, wenn die Stadt diesen Bau nicht aus eigener Initiative und rechtzeitig ausgeführt hätte.

Das neue Kraftwerk, dessen Lageplan Bild 961 veranschaulicht, ist die letzte Schöpfung des leider zu früh verstorbenen Professors Klingenberg von der AEG. Seine Planung war ein in jeder Beziehung vollendetes Meisterstück. Durch eine bis in alle Einzelheiten durchdachte Wärmewirtschaft findet eine so hohe Ausnutzung der hier verfeuerten hochwertigen Kohle statt, daß das Werk auch wirtschaftlich den Fernkraftwerken vollkommen ebenbürtig ist.

Der Plan Bild 961 zeigt die Anlage des Werkes von der Spree her in den Etappen: Schalthaus, Turbinen- und Generatorenhaus, Kesselhaus und Kühlanlagen.



962. Modellbild des Großkraftwerkes Klingenberg in Rummelsburg bei Berlin



963. Das Großkraftwerk Klingenberg der Berliner Städtischen Elektrizitätswerke A.-G. in Rummelsburg bei Berlin
Erbaut 15. September 1925 bis 14. Mai 1927 von der AEG, Berlin

Bild 962 stellt das Modell des Werkes, von der Spreeseite gesehen, dar. Rechts im Bilde geht von der Spree ein Stichkanal ab, durch den die Kohlenschiffe unmittelbar unter die Verladebühnen gelangen, welche die Kohlen zum Brecherhaus bringen. Auf der linken Seite sind die vorstehend genannten drei Häuser hintereinander sichtbar. Der Auslaß ganz links im Bilde führt die gewaltigen Mengen des warmen Kondenswassers in die Spree ab und hat zu dem Plan angeregt, hier eine natürliche Warmbadeanstalt entstehen zu lassen. Bild 963 zeigt das Werk nach seiner Vollendung von der Seite dieses Warmbades her gesehen.

Nur die Zukunft wird die Entscheidung fällen können, ob das Kraftwerk Klingenberg eine vereinzelte Erscheinung bleiben, oder ob es Nachfolger erhalten wird. Die Pläne der Elektrotechnik gehen heute schon weit über die Grenzen der einzelnen Staaten hinaus. Man träumt von einer europäischen Elektrizitätswirtschaft. Von einem europäischen Hochspannungsnetz, das, mit etwa einer halben Million Volt betrieben, die überschüssigen Wasserkräfte Skandinaviens, die hoch in die Millionen gehenden Wasser-Pferdestärken der Balkanhalbinsel bis in das Herz Europas leitet. Man hofft auf eine Zeit, in der kein Tropfen Kraftwasser mehr ungenutzt zu Tale läuft. Aber auch dann wird man immer noch zur Kohle greifen müssen, um den riesenhaften Energiebedarf des industrialisierten europäischen Erdteiles zu befriedigen. Auf unabsehbare Zeit werden Dampfkraftwerke neben den Wasserkraftwerken bestehen müssen. Nur die Frage muß entschieden werden, ob man sie grundsätzlich dorthin baut, wo man die Kohlen findet, oder bisweilen auch an Stellen eines besonders hohen Energieverbrauches.

Stürmisch geht die Entwicklung voran. Vielleicht nur noch wenige Jahre trennen uns vom Zusammenschluß des westfälischen mit dem sächsischen und bayerischen Netz. Vielleicht, daß dann der Gedanke des Fernkraftwerkes sich restlos durchsetzt und in den großen Städten nur noch Umspannwerke stehen.

POLITECHNIKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA WROCŁAWSKA

# Stichwörter-Verzeichnis

(Die mit * versehenen Zahlen geben die Seiten an, auf denen die zum Stichwort gehörenden Abbildungen sich befinden; die römischen Zahlen verweisen auf die Tafeln)


Aachen, 142.
Abdichtung bei der Dampfturbine, 260, 264, 275; 260*, 262*, 274*.
„ bei der Kolbendampfmaschine, 248—250; 243*.
Absoluter Druck, 280.
Absperrventil, 309; 309*.
Abteufpumpen, 488; 484*.
Abwurfwagen, 10; 9*.
Accumulatoren-Fabrik A.-G., siehe: AFA.
Achsenregler, siehe: Flachregler.
Achsialturbine, 122.
AEG, 54, 261, 385, 416, 424, 425, 427, 435, 439, 447, 449, 485, 490, 500, 507, 523, 526.
Aerodynamo, 109; 103*.
AFA, 405, 406.
Agricola, Georgius, 46.
Ägypten, Talsperre in, 138.
Akkumulatoren, 387, 388, 401—413; 401*—407*.
Aktions-(Dampf-)Turbine, 258—261, 265; 255*—259*.
Aktions-(Wasser-)Turbine, 122.
Alban, Dr. Ernst, 196, 204.
Albert, Bergrat, 20.
Albion Mill, 190.
Allan-Umsteuerung, 232.
Allgemeine Elektricitätsgesellschaft, siehe: AEG.
Alliance, Compagnie d', 369, 376.
Alliancemaschine, 369—371; 373*.
Aluminium-Gewinnung, 512.
Amme, Giesecke & Konegen, 492.
Ampère, André Marie, 365, 366; 367*.
Ampere (elektrische Maßeinheit), 472.
Amperemeter, siehe: Strommesser.
Amperestundenzähler, 476, 477.
Andrehen von Gasmaschinen, 338.
Andrehvorrichtung für die Kolbendampfmaschine, 228; 219*.
Anker, siehe: Rotor.
Ankerschlupf, 396, 419.
Anlaßwiderstand, 396, 397; 396*.
Antrieb, Anwendungen des elektrischen, 478—509; 478*—505*.
Anwendungsgebiete des Starkstroms, 478—513.
Aeolipile, 159, 256; 156*.
Arago, 160, 161.
Arbeit, elektrische, 472.
„ Maßeinheit der, 96.
Archimedes, 33.
Architronito, 160; 157*.
Aristoteles, 38, 158, 162.
Arkwright, Richard, 190.
Arolsen, 144.
Aschenfall, 281; 278*, 279*; XIX.
Aschenscheider, elektromagnetischer, 498; 495*.
Asel, 144.
Assuan, Talsperre von, 138, 139; 141*, 142*.
Asynchronmotor, 419.
Atmos-Kessel, 293; 292*.
Atmosphäre (Maßeinheit des Dampf- und Gasdruckes), 278.
Atmosphärische Dampfmaschine, 167—175; 167*—173*.
„ Gasmaschine, 325—328; 322*, 323*.
Auer von Wellsbach, Dr. Karl Freiherr, 446; 445*.
Auer-Konzern, 449.
Aufkirchen, Wasserkraftwerk, 125, 149; 150*; X.
Auflagerschuh für Drahtseile, 21; 23*.
Aufnehmer, 244, 245; 230*.
Aufzüge, 75—84; 41*, 75*—84*.
„ mit Druckwasserantrieb, 77, 78; 78*.
„ mit elektrischem Antrieb, 78—86; 79*—84*.
„ mit Handantrieb, 76; 75*—77*.
„ mit Transmissionsantrieb, 76.
„ Paternoster-, 86, 87; 85*, 87*.
„ Steuerung, 77, 81—84, 86; 83*, 84*.
Augst-Wyhlen a. Rhein, Wasserkraftwerk, 150.
Aumund-Kipper, 6; 4*.
Außenpolmaschine, 375.
Ausgleichscheiben der Parsons-Turbine, 264; 261*.
Ausklinksteuerung, siehe: Ventilsteuerung.
Ausrüstung des Dampfkessels, 306—315; 306*—314*.
Austin-Talsperre in Pennsylvanien, 137.

Babcock & Wilcox Dampfkesselwerke A.-G., 291.
Backofen, elektrischer, 510; 506*.
Badenwerk, 149, 150, 152; 127*, 150* bis 152*.
Bagger, 12, 13; 14*, 15*.
Bajonettrahmen, 248; 242*.
Balancier, 171—173, 186, 188, 189, 191, 194, 196, 245; 170*, 171*, 177* bis 179*, 182*, 184* 231*; XII, XIII.
Bandförderanlage, siehe: Förderband.
Barmen, 140.
Barnett, 332.
Batterie, galvanische, 371, 401.
Batteriekessel, 284; 280*.
Bauer, Georg, siehe: Agricola.
Bayernring, siehe: Bayernwerk.
Bayernwerk, 145, 148, 149, 520, 522; 133*, 148*—150*; X.
Beaufort, 109.
Becherförderer, siehe: Becherwerk.
Becherwerk, 12—15; 12*, 13*, 16*, 17*.
Beck, Theodor, 38, 154, 175, 177.
Beharrungsregler, 231; 219*.
Beighton, Henry, 172.
Belani, 118.
Belleville-Kessel, 295; 293*.
Beleuchtung, Arten der elektrischen, 457; 454*.
„ biologische Einflüsse der elektrischen, 457; 456*.
„ elektrische, 381—389, 444—459; 383*—387*, 444*—459*.
Beleuchtungskörper, 457; 454*.
Benardos-Lichtbogenschweißung, 513; 510*.
Benson-Kessel, 293, 294.
Benz, Carl, 323.
Benzin, 342, 343, 355, 356.
Benzol, 342, 343, 355, 356.
Berchtesgaden, 133.
Bergius, 298, 343.
Bergmann & Co., 385.
Berich, 144.
Berlin, Rohrpostnetz, 68; 66*.
Berliner Actiengesellschaft für Eisengießerei und Maschinenfabrikation (früher J. C. Freund & Co.), 201.
Berliner Elektrizitätswerke A.-G., 386, 387, 400, 514, 516; 391*, 398*, 404*.
Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft vorm. L. Schwartzkopff, 204.
Berliner Städtische Elektrizitätswerke A.-G., siehe: Bewag.
Beuth, P. Ch. W., 201; 188*.
Bewag, 253, 516; 253*, 254*, 398*; XV.
Biegemaschine für Kesselbleche, 287; 285*.
Birmingham, Kanalpumpwerk zu, 186.

Black, Prof. Dr., 177.
Blechschere, 490; 487*.
Bleiakkumulatoren, 387, 401—410, 412, 413; 402*—406*.
Bleichert & Co., Adolf, 19, 25.
Bleikabel, 441, 442.
Blindleistung, 393, 419; 393*.
Blockdrucklager, 275; 275*.
Blockschere, 490; 486*.
Blockstraße, 490; 482*, 483*.
Blockzentrale, 386; 391*.
Blohm & Voß, 52, 357.
Blomquist, 293.
Bober, 143.
Bockmaschine, 204; 192*.
Bockmühle, 106; 101*.
Bogenlampe, 380—382, 445, 453—455; 383*, 450*.
Bogenlampenkohle, 382.
Bohrmaschine, 478; 479*.
Bolometer, 444.
Bolton, Werner v., 447.
Börne, 190.
Borsig, Albert, 204.
„ Friedrich August, 120, 201, 204; 190*.
„ Fr. A., alte Fabrikanlage, 201; 191*.
Bosch-Zündkerze, 335; 333*.
Boulton, Matthew, 184, 185, 187, 188, 190, 193, 194; 176*.
Boulton & Watt, 188, 193, 194.
Branca, Giovannni, 161, 256.
Bratspieß, 160; 157*.
Braunkohlen-Fernkraftwerke, 516, 517, 520—522; 514*; XXVI.
Braunkohlenteer, 355.
Braunkohlenteeröl, 343, 355.
Bremer, 454.
Bremsberg-Anlage, 8, 9; 6*.
Brennstoffbereitung für die Gasmaschine, 338—344; 336*—340*.
Brennstoffe für den Dampfkessel, 296—298.
„ für den Diesel-Motor, 355, 356.
Briefbahn in München, 72, 73; 70*.
Bringhausen, 144.
Brown, Boveri & Cie. A.-G., 423, 425.
Brücke, siehe: Kranbrücke.
Brush, Charles F., 402, 404, 405.
Bückling, Bergassessor, 198, 199.
Bügeleisen, elektrisches, 510; 506*.
Bügelmaschine, 201, 204; 189*.
Bühnen-Beleuchtung, 458, 459; 457*.
Büllinghausen b. Arolsen, 144.
Bunker, 14—16; 17*.
Busch, Wilhelm, 94.

Calley, John, 170.
Caus, Salomon de, 102, 160.
Cheverton, 322.
Chinka, 17.
Choisy, 38.
Clausthal, 138.
Clerk, 324.
Collmann, Kolbenstange nach, 249; 243*.
Collmann-Steuerung, 223; 212*.
Compoundmaschine, siehe: Verbundmaschine.
Corliß, George Henry, 218.
Corliß-Steuerung, 218, 220, 230; 205*.
Corliß & Nightingale, 220.
Cornwall, Kastenkunst in, 164.
Cornwall-Kessel, 285; 281*.
Cornwall-Maschine, 186; 178*.
Coulomb (elektrische Maßeinheit), 472.
Croton, Talsperre im, 139.
Curtis-Rad(-Turbine), 259, 261, 265, 268; 256*, 257*, 270*.

Daimler, Gottlieb, 328, 335.
Dampfdom, 284; 278*.
Dampfes, Überhitzung des, 238, 240, 241, 244, 245, 255, 256, 270, 291, 292, 294, 308, 309; XVIII, XIX.
„ Wirtschaftlichkeit gespannten, 279, 280.
Dampfhammer, 197; 184*—187*.
Dampfkessel, 277—318.
„ Ausrüstung, 306—315; 306* bis 314*.
„ Bauarten, 280—296; 277* bis 295*; XVIII, XIX.
„ Bedienungsvorschriften, 315, 316.
„ Brennstoffe, 296—298.
„ Explosion, 317, 318; 315*.
„ Feuerungen, 298—304; 296* bis 304*; XVIII, XIX.
„ Wasserreinigungsanlagen, 307, 308; 310*.
„ Zuganlagen, 304—306; 305*; XIX.
Dampfkesseln, Allgemeine polizeiliche Bestimmungen über die Anlegung von Land-, 294.
Dampfmaschine, siehe: Kolbendampfmaschine.
Dampfmühle, 190.
Dampfpfeife, 312; 311*.
Dampfpumpe von Savery, 164—166; 164*, 165*.
Dampfrad von Branca, 161, 256; 160*.
Dampframme, 197; 186*.
Dampfsammler, 291.
Dampfschaufel, siehe: Löffelbagger.
Dampfspeicher von Ruths, 295, 296; 294*, 295*.
Dampfspringbrunnen von Worcester, 162; 162*.
Dampfturbine, 183, 253—276; 255* bis 275*.
„ Abdichtung, 260, 264, 275; 260*, 262*, 274*.
„ Bauteile, 273—276; 270* bis 275*.
„ Gegendruckturbine, 269.
„ Gleichdruck- oder Aktionsturbine, 258—261, 265; 255*—259*.
„ Kondensationsanlage, 271; 267*.
„ Laufräder, 262, 263, 265, 274; 256*, 257*, 264*, 270*; XVI, XVII.
„ Laufschaufeln, 274, 275; 271*, 272*.
„ Leiträder, 274; 270*, 273*.
„ Mehrgehäuseturbine, 264—266; 262*—264*; XVII.
„ Nutzeffekt, 256, 258, 318; 317*.
„ Radialturbine, 271; 266*.
Dampfturbine, Regeleinrichtungen, 271 bis 273; 268*, 269*.
„ Überdruck- oder Reaktionsturbine, 261—265, 273; 260*, 261*.
„ Wärmestromdiagramm, 318; 317*.
„ Zweidruckturbine, 270; 266*.
„ Zwischendampfverwertung, 269.
Dauerbrandbogenlampe, 454; 450*.
Davy, Humphry, 365, 366.
Davyscher Lichtbogen, 379; 383*.
Deasaguliers, 310.
Decken-Laufkran, 48; 45*.
Demag, 52, 53, 490.
Deutsch, Felix; 390*.
Deutsche Edison-Gesellschaft, 385, 386.
Deutsche Maschinenfabrik A.-G., siehe: Demag.
Deutschlands Wasserkraftwerke, 144—153; 143*—152*; IX, X.
Deutz A.-G., Gasmotorenfabrik, 328.
Diagramme der atmosphärischen Gasmaschine, 328; 323*.
„ der Kolbendampfmaschine, 208—213, 217, 241; 195*, 196*, 230*.
„ der Lenoir-Maschine, 323; 320*.
„ der Oechelhäuser-Maschine, 347; 341*.
„ des Viertakt-Diesel-Motors, 354; 349*.
„ des Viertakt-Gasmotors, 329; 324*, 325*.
„ des Zweitakt-Diesel-Motors, 356; 350*.
Dichtungsringe für Kolbendampfmaschinen, 248; 243*.
Dick, Prof. Dr., 176, 177.
Diesel, Dr. Rudolf, 350, 351; 346*.
Diesel-Motor, 350—358; 347*—357*.
„ Arbeitsvorgänge im Viertakt-Motor, 354; 349*.
„ Arbeitsvorgänge im Zweitakt-Motor, 356; 350*.
„ Brennstoffe, 355, 356.
„ Doppeltkolbenmotor, 356; 351*.
„ kompressorloser, 357; 352*, 354*.
„ Regeleinrichtungen, 354.
„ Wärmestromdiagramm, 356; 349*.
Dieterich, G., 17.
Differential-Bogenlampe, 380, 381, 454; 384*, 450*.
Differential-Flaschenzug, 35, 36; 36*.
Dinnendahl, Franz, 200.
Dolivo-Dobrowolski, Michael v., 397, 398; 396*.
Donau, 149, 526.
Doppelschluß-Gleichstromdynamo, 378; 381*.
Doppelschluß-Gleichstrommotor, 463.
Doppelstrom-Spindel für Dampfturbinen, 265; 264*; XVII.
Doppel-T-Anker, 370; 374*.
Doppeltkolbenmotor, 356; 351*.
Doppelt-Viertakt-Motor, 349; 344*, 345*.
Dowson, 339, 340.
Drähte, isolierte, 439.
Drahtseil, 20; 23*.
„ Auflagerschuh, 21; 23*.
„ Kupplung, 20; 23*.
Drahtseilbahn, siehe: Seilbahn.

Drehbank, 491; 489*, 491*.
Dreheisenmeßwerk, 468; 465*.
Drehfeld, elektromagnetisches, 394, 395, 418, 419, 463, 464; 394*.
Drehfeld-Meßinstrument, 470, 471; 469*.
Drehkran, 47, 49, 52; 41*, 42*; IV.
Drehrost-Generatoren, 341; 338*, 339*.
Drehspul-Meßinstrument, 469, 470; 467*.
Drehstrom, 400, 418, 464, 465.
„ Prinzip, 393—395; 394*.
Drehstrom-Generator, 397, 398; 397*.
„ Bau, 413—426; 409*—421*; XXIII, XXIV.
Drehstrom-Induktionsmotor, 416, 418 bis 420, 463, 464; 397*, 409*, 460*—462*.
„ Prinzip, 395—397; 395*, 396*.
Drehstrom-Nebenschlußmotor, 464; 460*, 461*.
Drehstromofen, 512; 507*—509*.
Drehstrom-Reihenschlußmotor, 463, 464; 460*—462*.
Dreieckschaltung, 395; 395*.
Dreifach-Expansionsmaschine, siehe: Verbundmaschine.
Dreifach-Turbine, 125; 125*.
Dreigehäuseturbine, siehe: Mehrgehäuseturbine.
Dreileiterschaltung, 389; 392*.
Dreilochwicklung, 418; 412*.
Dreiphasenstrom, siehe: Drehstrom.
Dreyer, Rosenkranz & Droop, 211.
Drillingsdampfmaschine, siehe: Verbundmaschine.
Drillingsturbine, 125, 152; 127*.
Drosselklappe, 193, 230; 180*.
Drosselspule, 390, 392.
Druckgas-Bereitung, 339, 340.
Druckrohrleitung für Wasserturbinen, 131, 132, 148; 131*, 133*, 134*, 152*; X.
Druckstufenturbine, 260; 258*—260*; XVI.
D-Schieber, 214; 198*.
Dücker, Bergassessor Freiherr von, 18, 19.
Durchführungsisolator, 438, 521; 434*, 522*.
Düren, 142.
Dürr-Kessel, 291; 290*.
Dynamomaschine, 371—379, 381, 395 bis 398, 413—426; 376*, 377*, 379*, 381*, 382*, 392*, 397*, 409*—421*; XXIII, XXIV.
„ Bau, 413—426; 409*—421*; XXIII, XXIV.

Ebene, schiefe, 35; 34*.
Ebonit, 439.
Economiser, siehe: Vorwärmer.
Edelgasleuchtröhren, 455, 456.
Eder-Talsperre, 144; 146*; IX.
Edison, Thomas Alva, 381, 382—384, 410, 413, 445, 446, 468, 503; 387*.
Edison-Akkumulator, 410—413; 407*.
Edwards, 245.
Effektbogenlampe, 454; 450*.
Egells, 201.
Egestorff, Georg, 204.
Eguzon a. d. Creuse, Kraftwerk, 134*.
Einanker-Umformer, 400; 398*, 399*.
Einblaseventil, 355; 348*.
Einlaufbauwerk, 131, 146; 133*.
Einphasen-Repulsionsmotor, 465, 466; 462*—464*.
Einphasenstrom, 465.
Einphasen-Wechselstromzähler, 477; 475*, 476*.
Einspritz-Kondensation, 172, 233, 234; 170*, 171*, 222*; XIV.
Eisenkörper, aktiver, 416, 417, 425; 409*, 419*; XXIII, XXIV.
Eisen-Nickel-Akkumulator, 410—413; 407*.
Eisschuß, 130.
Eitting, Wasserkraftwerk, 125, 149; 150*; X.
Elektrizität in Berg- und Hüttenwesen, 478 bis 490; 478*—487*.
„ im Haushalt, 509, 510; 506*.
„ in Industrie und Landwirtschaft, 490—502; 488*—499*.
„ in der Schiffahrt, 502—509; 500*—505*.
Elektrizitätsausstellung in München, erste deutsche, 384.
„ in Paris, erste internationale, 381, 383.
Elektrizitätsmenge (Maßeinheit), 472.
Elektrizitätszähler, siehe: Meßinstrumente.
„ von Edison, 383.
Elektro-Dynamometer, 470, 475; 468*.
Elektrofilter, 498, 499; 497*.
Elektrogenerator, 369—379, 395—398, 413—426; 372*—379*, 392*, 409*—421*; XXIII, XXIV.
„ Bau, 413—426; 409*—421*; XXIII, XXIV.
„ Prinzip, 368; 371*.
Elektro-Hängebahn, 27, 28, 31, 57; 30*.
Elektromagnete, 367, 370.
Elektromotor, 369, 395—397, 459—467; 372*, 396*, 460*—464*.
„ Bau, 413—426; 409*—421*; XXIII, XXIV.
„ Prinzip, 368; 371*.
„ von Ritchie, 369; 372*.
Elektroofen, 511, 512; 507*—509*.
Elektrostahlofen, 511; 507*.
Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt a. Main, internationale, 397; 397*.
Elektrowerke A.-G., 516.
Elemente, galvanische, 365.
Energie, die technische Beherrschunng der elektrischen, 401—477.
Energie-Gesetz, 93.
Energiekurven von Temperaturstrahlern, 444, 445; 444*.
Ennepe-Tal b. Radevormwald, Talsperre im, 141.
Entladungserscheinungen in verdünnter Luft, elektrische, 455; 453*.
Erdgas, 339.
Erdnußöl, 355.
Erdöl, 342.
Ericsson, 102, 103.
Eschbachtal, Talsperre im, 140.
Escher, Wyß & Cie., 274.
Evans, Oliver, 196.
Expansionskraft des Dampfes, 182, 191, 196, 208.
Expansionsmaschine, 183, 191, 208, 215; 195*.
Expansionsschieber, 218, 220; 203*, 206*.
Explosion eines Drehstrom-Generators, 420, 421; 413*.
„ von Dampfkesseln, 317, 318; 315*.
Exzenter, 216, 217; 203*.
Eyth, Max, 200.

Fahrstuhl, siehe: Aufzüge.
Fangvorrichtung für Aufzüge, 80; 82*.
Farad (elektrische Maßeinheit), 472.
Faraday, Michael, 365—367; 367*.
Faserstoffkabel, 438, 439, 441.
Faure, Camille, 402, 404.
Feldbahn, 7, 8; 5*.
Feldmagnete, 370, 377, 379.
Felten & Guilleaume, 20.
Fernleitungsnetz, mittel- und ostdeutsches, 516; 514*.
Ferraris, 394, 470, 471.
Feuerbrücke, 281, 282, 297; 278*, 279*.
Feuermaschine, siehe: atmosphärische Dampfmaschine.
Feuerrad von Branca, 161; 160*.
Feuertür, 281; 278*.
Feuerungen für Dampfkessel, 298—304; 296*—304*; XVIII, XIX.
Feuerzüge, 282; 279*—283*, 288*; XVIII, XIX.
Fiat-Elektro-Ofen, 512; 508*.
Finksche Regelung für Wasserturbinen, 129; 128*.
Finsing, Wasser-Kraftwerk, 149; 150*; X.
Fischer, 298, 343.
Fischtran, 355.
Flachregler, 230, 231; 219*.
Flachringmaschine, 376; 379*.
Flachschieber, siehe: Muschelschieber.
Flammrohrkessel, 285; 281*.
Flaschenzug, 35, 36, 96; 36*.
Fliehkraftregler, siehe: Schwungkugelregler.
Flügelfeinspinnmaschinen, 492; 492*.
Flüssigkeitsanlasser, 397.
Flüssigkeitswärme, 278, 279, 320.
Flüssigkeitswiderstand, 397.
Flutlichtbeleuchtung, 458; 458*.
Flutwerke, 153, 154; 153*.
Fontana, Domenico, 39.
Forbach im Schwarzwald, Kraftwerk, 128, 150, 152; 127*, 150*, 152*.
Förderband, 10, 11, 74, 497; 8*—11*, 71*, 496*.
Förderer, stetige, 2—32.
Förderhaspel, 480; 479*.
Fördermaschinen, 481—485; 480*, 481*.
Forschungsinstitut für die direkte Ausnutzung der Sonnen-Energie, 103.
Fortuna I und II (bei Köln), Kraftwerke, 522; 519*, 522*.
Fortuny-Kuppel, 459; 457*.
Foucault, 373.
Foucault-Ströme, siehe: Wirbelströme.
Fourneyron-Turbine, 121, 122; 117*.
Fowler, John, 252.
Francis-Turbine, 121, 122, 124, 129, 148, 150; 117*—119*, 121*, 128*, 149*.

Frankfurt a. Main, internationale elektrotechnische Ausstellung, 397; 397*.
Franklin, Benjamin, 184.
Freifallsteuerung, siehe: Ventilsteuerung.
Freiluftstation, 523, 524; 523*.
Freistrahl-Turbine, 122, 125, 152; 120*, 126*, 127*, 130*.
Freund, G. Ch., 201.
Friedrich der Große, 118—120, 198, 199.
Friedrich Wilhelm IV., 120.
Frischdampf-Abdampf-Turbine, 270; 266*.
Fuchs, 283, 305; 278*, 305*.
Fulton, 194.
Fundament, 247, 248; 242*.

Gabelrahmen, 248; 242*.
Galloway-Rohre, 286; 281*.
Galvani, Luigi, 365.
Galvanoplastik, 369.
Galvanoskop, 469.
Gardiner, John, 181.
Gas- und Ölmaschine, 319—362.
Gasmaschine, 319—350, 360—362; 319* bis 345*, 358*—360*.
„ atmosphärische, 325—328; 322*, 323*.
„ Brennstoffbereitung, 338—344; 336*—340*.
„ Doppelt-Viertakt-Motor, 349; 344*, 345*.
„ Gichtgasmaschinen, 344.
„ Großgasmaschinen, 346—349; 341*—345*.
„ Kühlung des Zylinders, 333; 329*.
„ von Lenoir, 323; 319*, 320*.
„ Nutzeffekt der, 157, 334; 333*.
„ von Oechelhäuser, 346, 347; 341*.
„ Regeleinrichtungen, 333, 336, 338; 326*, 334*, 335*.
„ Steuerung, 332, 333; 326*, 329*, 330*.
„ Viertakt-Motor, 328 bis 330; 324*—331*.
„ Wärmestromdiagramm, 334, 333*.
„ Zündvorrichtung, 334, 335; 332*, 333*.
„ Zweitakt-Motor, 347, 348; 342*, 343*.
Gasmotor, siehe: Gasmaschine.
Gasmotorenfabrik Deutz A.-G., 328.
Gasöle, 342, 355.
Gasturbine, 360, 361; 358*—360*; XXI.
Gear, 430, 438.
Gegendruckturbine, 269.
Gegenstrom-Spindel für Dampfturbinen, 265; 266*; XVII.
Gehänge für Seilbahnen, 22; 26*, 27*.
Geitel, 182.
Gemünd (Eifel), Urft-Talsperre bei, 141; 143*.
General-Electric-Company, 449.
Generatoren für Gaserzeugung, 339—341; 336*—339*.
„ siehe auch: Elektrogeneratoren.
Gercke, Oberingenieur, 358.
Gerinne, künstliches, 116.
Geschwindigkeitsstufen bei der Dampfturbine, 259, 260.
Gesetz der elektromagnetischen Induktion, 368, 392; 371*.
„ von der Erhaltung der Energie, 93.
„ Ohmsches, 390, 469, 470, 472.
Getreideheber, siehe: Becherwerk und Luftheber.
Gevelsberg, 140.
Gezeiten-Kraftwerke, 153, 154; 153*.
Gichtgasmaschinen, 344.
Gießen, 144.
Gießkran, 488; 487*.
Giffard, 306.
Glaskolbenblasmaschine, 451*.
Gleichdruck-(Dampf-)turbine, 258—261, 265; 255*—259*.
Gleichdruck-(Wasser-)turbine, 122.
Gleichrichter, siehe: Kommutator.
Gleichstrom, 379, 388—390, 400, 417.
„ pulsierender, 369, 370.
Gleichstrom-Dampfmaschine, 225, 238; 216*, 217*.
Gleichstromdynamo, 373, 374, 377—379, 397; 376*, 377*, 379*, 381*, 411*.
Gleichstrom-Elektromotor, 460, 463, 483.
Gleichstrom-Hauptschlußmotor, 460, 483.
Gleichstrommotorzähler, 477; 475*.
Gleno-Talsperre bei Bergamo, 138; 140*.
Gliederband-Förderer, 11.
Gliederkessel, 295; 293*.
Glimmlampen, 455, 456; 454*.
Glühkopf-Motor, 357, 358; 356*, 357*.
Glühlampe, elektrische, 382, 445—453; 386*, 445*—449*, 451*.
Göbel, Heinrich, 387*.
Goldenberg, Kraftwerk, 261, 425, 432; 410*; XVI.
Golpa-Zschornewitz, Kraftwerk, 236, 254, 516, 520, 521; 229*, 514*—518*; XXVI.
Gooch, 232.
Göpel, 39, 42, 44—46, 99, 155; 41*, 92*, 155*.
Goethe, J. W. v., 200.
Göttingen, 144.
Goudron, 342.
Gramme, Zénobe Théophile, 376.
Grimm, Jacob, 156.
Großgasmaschinen, 346—349; 341*—345*.
Großkraftwerk der Gegenwart, 514—528.
Großraumkessel, 284, 288, 302.
Grubenlokomotive, 357, 479, 480; 355*, 479*.
Grubenventilator, 485; 481*.
Grundabläße, 137.
Grundschieber, 218; 203*.
Guericke, Otto v., 163; XI.
Gummibeutel, 334.
Gummikabel, 439.
Gurtförderer, siehe: Förderband.
Guttapercha, 438.

Hagen, 140.
Hakenspiel, 507; 504*.
Halbkugelversuch von Otto v. Gericke, 163; XI.
Halbtorkran, 49; V.
Hamburgische Elektrizitätswerke, 357.
Hammerkran, 52.
Hammermaschine, 204; 192*.
Hammerwippkran, 52; V.
Handaufzüge, 76; 75*—77*.
Handkran, 48; 44*.
Hanffstengel, G. v., 31.
Hängebahn, 27, 28, 31, 57; 30*.
Hannoversche Maschinenbau-Aktiengesellschaft, siehe: Hanomag.
Hanomag, 204.
Harkort, Friedrich, 201.
Hartlieb, Johann, 18.
Harz, Talsperren im, 138.
Hauptschluß-Gleichstromdynamo, 377, 378; 381*.
Hauptschlußmotor, 460, 462, 463, 465, 483.
Hebel, 32, 33; 32*—34*.
Hebezeuge, 32—59.
„ Antrieb, 45, 47, 48.
„ elektrische, 57; 57*, 58*.
„ Geschichte der, 37—47; 37* bis 43*.
Hefner-Alteneck, Friedrich v., 370, 380, 445, 454; 385*.
Hefnerkerze, 380, 445.
Heimbach a. d. Ruhr, 141, 142.
Heinitz, Minister v., 199.
Heißdampfmaschine, 238, 240, 241, 244, 245.
Heißeisensäge, 490; 486*.
Heizer, Bedienungsvorschriften für den, 315, 316.
Heizkissen, elektrisches, 510; 506*.
Heizrohrkessel, 286; 283*, 284*.
Helios-Elektrizitäts-Gesellschaft, Köln, 57.
Helmholtz, 366.
Helminghausen a. d. Diemel, Talsperre bei, 144.
Helmont, van, 163.
Hemfurt a. d. Eder, Talsperre bei, 144; 146*; IX.
Henning, Veit Balthasar, 99.
Henry (elektrische Maßeinheit), 472.
Henschel, Karl Anton, 204.
Henschel-Jonval-Turbine, 121, 122; 117*.
Henschel & Sohn, 204.
Herbringshauser Tal, Sperre im, 140.
Herodot, 37, 92.
Heron von Alexandria, 38, 158, 168, 256.
Heronsball, 162; 158*.
Hertz, Heinrich, 366; 367*.
Hertz (elektrische Maßeinheit), 472.
Herzhausen, 144.
Hessen, Landgraf Karl von, 167, 175.
Hettstedt, Wasserhaltungsmaschine zu, 199; XII.
Heusinger von Waldegg, 232.
Hirn, Gustav Adolf, 238.
Hirschfelde, Kraftwerk, 521; 516*, 522*.
Hitzdrahtinstrument, 471, 473; 470*.
Hobelmaschine, 491; 488*.
Hochbagger, siehe: Bagger.
Hochbunkeranlagen, 299, 300; XIX.
Hochdruckdampfmaschine, 196; 193*, 207*.
Hochofen-Schrägaufzug, 488; 482*.
Hochspannungs-Fernübertragung von Lauffen a. N., 398; 397*.
Hochspannungsleitungen, 524; 524*, 525*.
Hodgson, 19.
Hoffmann, Karl, 374.

Hohlseile, 432, 433.
Holzhausen, Friedrich, 200.
Holzwarth, 360.
Holzwarth, Gas Turbine Co. of America, 360.
Homfray, Samuel, 199, 200.
Hooke, Dr., 170.
Hopkinson, 389.
Hoppe, 201.
Hornblower, Jonathan, 197, 213, 222, 245.
Horse Power, siehe: Pferdestärke.
Howaldt-Abdichtung, 250; 243*.
Howd, 121.
Hulett-Kran, 56; 55*.
Humphries, 197.
Huygens, 167, 325.

Ilgner-Rad, 484, 490; 481*.
Ilgner-Umformer, 490; 482*, 483*.
Iller, 149.
Illumination, 458; 458*, 459*.
Ilsank b. Berchtesgaden, 133; 137*.
Indikator, 210—212, 329; 197*.
Induktion, Gesetz der elektromagnetischen, 368, 392; 371*.
Induktionsmotor, siehe: Drehstrom-Induktionsmotor.
Induktions-Ofen, 511; 507*.
Induktivität, 472.
Injektor, 306, 307; 307*.
Inn, 149.
Innenkondensation, 238, 240.
Innenpolmaschine, 375, 376, 387; 377*, 391*.
Innertal, Talsperre bei, 153.
Intze, Prof. Otto, 139, 140.
Ionisieren der Luft, 434.
Isar, 145, 146, 148.
„ Kraftwerke a. d. mittleren, 148, 149; 150*; X.
Isolatoren, 436—438, 521; 429*, 434*, 522*.
Isolierstoffe, 374, 416, 426, 430, 436, 438.

Jablochkoffsche Kerze, 380; 385*.
Jacobus, Marianus, siehe: Taccola.
Jakobi, Prof., 368.
Jedlicka, Prof., 368.
Jonval-Turbine, Henschel-, 121, 122; 117*.
Juckes, 301.
Junkers, Prof., 346, 356.

Kabel, 438—444; 435*—443*.
Kabelkran, 50; V.
Kachlet, 149.
Käfigwicklung, 396, 397, 467; 395*.
Kalorie (Erklärung), 97.
Kaltschweißung, 513; 513*.
Kalziumkarbid-Ofen, 512; 509*.
Kammerer, Prof. Dr.-Ing. Eh., 32, 47, 59.
Kammlager, 275; 273*.
Kapazität, elektrische, 407, 408, 472.
Kaplan-Turbine, 122, 125; 119*.
Karbid-Ofen, 512; 509*.
Kardan-Gelenk, 99.
Karl von Hessen, Landgraf, 167, 175.
Karl August von Sachsen-Weimar, Herzog, 200.
Kaskadenkondensator, siehe: Einspritzkondensation.
Kaskadenschaltung, 485.
Kastenkunst, 163, 164; 163*.
Katapult-Feuerung, 301; 298*.
Katarakt, 174; 171*.
Katzbach, 143.
Kausch, Dr. Oskar, 103.
Kautschuk, 438, 439.
Kerntransformator, 427; 422*.
Kesselberg, 145, 146, 148.
Kesselschüsse, 287; 286*.
Kesselspeisepumpe, 306; 306*.
Kesseltrommel, nahtlose, 293; 291*.
Kesselturbine, 125; 122*, 124*.
Kettenrost, siehe: Wanderrost.
Kiesfalle, 131; 131*.
Kilowatt, (elektr. Maßeinheit), 264, 265, 472.
Kilowattstunde, 472.
Kilowattstundenzähler, 476, 477.
Kippbühne, 6; 5*.
Kippmulde, 21, 22; 26*, 27*.
Kirchhoff, 373.
Kirschbaumwasen a. d. Murg, Talsperre, 150.
Klingeltransformator, 427.
Klingenberg, Dr. phil., Dr.-Ing. Eh. Georg, 298, 526; 524*.
„ Kraftwerk in Berlin-Rummelsburg, 266, 526, 527; 263*, 301*, 526*, 527*.
Knüppelstraße, 490; 482*, 483*.
Kochelsee, 145, 148; 149*.
Kofferkessel, 280; 277*, 278*.
Kohle, Verflüssigung der, 298.
„ Vollkommenheit der Verbrennung der, 296, 317.
„ Vorräte an weißer, 113, 114.
Kohlenfaden, 382, 446.
Kohlenfadenlampe, 382, 388, 389, 445, 446; 386*, 447*.
Kohlenstaubfeuerung, 300, 302, 304; 301*, 304*.
Kohlenwage, automatische, 316; XIX.
Kohleringdichtung, 275; 274*.
Kolbendampfmaschine, 155—252.
„ Abdichtung, 248—250; 243*.
„ atmosphärische, 167—175; 167* bis 173*.
„ Bauteile, 247—251; 242*—245*.
„ Diagramme, 208—213, 217, 241; 195*, 196*, 230*.
„ doppelwirkende, 192, 206; 195*.
„ einfachwirkende, 186; 178*.
„ Entwicklung nach 1800, 194 bis 206; 182*—193*; XII, XIII.
„ mit Expansion, 183, 191, 208, 215; 195*.
„ Geschichte, 158—192; 156* bis 181*; XI.
„ Gleichstrom, 225, 238; 216*, 217*.
„ grundsätzlicher Bau der modernen, 206—212; 195*—197*; XIV.
„ Heißdampfmaschine, 238, 240, 241, 244, 245.
„ Hochdruck, 196; 193*, 207*.
„ Kondensationsanlagen, 233 bis 236; 222*—227*; XIV.
Kolbendampfmaschine, liegende, 204, 240; 195*, 208*, 214*, 217*, 233*—238*; XIII—XV.
„ Niederdruck, 186, 193, 210.
„ Nutzeffekt, 157, 318; 316*.
„ ortsbewegliche, 251, 252; 246*, 247*, 251*.
„ oszillierende, 204; 193*.
„ Regeleinrichtungen, 226 bis 231; 219*.
„ stehende, 204, 240; 189*, 192*, 205*, 239*, 240*.
„ Steuerung, 212—226; 198* bis 217*.
„ Umsteuerung, 231, 232; 221*, 222*.
„ mit Verbundanordnung, 196, 230, 238, 241, 245—247; 205*, 231*—239*; XIV.
„ Wärmestrom-Diagramm, 318; 317*.
„ Watts Lebenswerk, 175 bis 194; 174*, 177*—180*.
„ Wirkungsgrad, 207.
„ Zwischendampfverwertung, 244, 245; XIV.
Kolbenschieber, 221; 207*.
Kolbenstange nach Collmann, 249; 243*.
Kollektor, siehe: Kommutator.
Kommutator, 370, 371, 374, 376, 463, 464; 374*, 375*, 461*—464*.
Kondensationsanlagen für Dampfturbinen, 271; 267*.
„ für Kolbendampfmaschinen, 233 bis 236; 222*—227*; XIV.
Kondensator, 182, 210; 174*, 177*.
Kondensatorpumpe, siehe: Luftpumpe.
Koepe-Fördermaschine, 482, 485; 481*.
Körting, Gebr., 348.
Kosinus φ, 392, 397, 419, 475; 393*, 394*.
Kraftfeld, homogenes magnetisches, 367, 368; 371*.
Kraftlinienfluß beim Ringanker, 376; 378*.
„ beim Trommelanker, 376; 378*.
„ eines Stabmagneten, 366, 367; 368*.
„ eines stromdurchflossenen Leiters, 367; 369*.
„ eines stromdurchflossenen Solenoides, 367; 370*.
„ zwischen Rotor und Stator, 418; 412*.
Kraftmaschinen, 89—362.
Kraftübertragung zu den Verbrauchernetzen, elektrische, 393, 523, 524; XXII.
Kraftwagen-Kran, 48; 46*.
Kraftwerk der Gegenwart, Groß-, 514—528.
Kraftwerke, elektrische, 386—389, 393, 514—528; 391*, 514*— 527*; XXII, XXVI.
Kraftwirkung des Dampfes bei der Dampfturbine, 256, 257.
„ des Dampfes bei der Kolbendampfmaschine, 206 bis 210; 195*, 196*.
„ des Windes auf den Windmühlflügel, 106; 101*.

Kranbrücke, 49, 50; V.
Krane, 4, 36—59; 41*, 44*—56*, 59*; IV, V.
„ Antrieb, 57—59; 58*.
„ Befestigung der Last, 54; 51*.
„ Laufkatze, 48, 50, 52, 56, 58, 59; 58*, 59*; V.
„ Tragvorrichtung, 54—57; 50*, 52* bis 56*.
Krankatze, siehe: Laufkatze.
Krantor zu Danzig, 47; 42*, 43*.
Kratzer, 9; 7*.
Kreiselwipper, 7; 5*.
Krummrohrkessel, 291.
Krupp, Friedr., 268, 350, 351.
Kühltürme, 236; 225*—229*.
Kühlung des Kolbens, 348; 342*.
„ bei Transformatoren, 432; 425*.
„ des Zylinders bei Gasmaschinen, 333; 329*.
Kümpelpresse, 287, 293.
Kupferakkumulator, 410.
Kupila, 38; 40*.
Kupplung für Drahtseile, 20; 23*.
Kurbelgetriebe, 189, 206, 250; 195*, 245*.
Kurbelwinde, 34; 33*, 41*.
Kurzschlußvorrichtung, 397, 417.

Labyrinth-Dichtung, 250, 264, 275; 243*, 274*.
Lade-Elektromagnet für Krane, 56, 57; 56*.
Lademaschine für Koksöfen, 497; 496*.
Ladewinden, 506, 507; 504*.
Lahmeyer A.-G., 385.
Langen, Eugen, 325, 326; 321*.
Lanz, Heinrich, 252.
Lastenförderung, 1—87.
Laufenburg a. Rhein, Wasserkraftwerk, 150.
Läufer, siehe: Rotor.
Lauffen a. Neckar, 398; 397*.
Laufkatze, 48, 50, 52, 56, 58, 59; 58*, 59*; V.
Laufräder der Dampfturbine, 262, 263, 265, 274; 256*, 257*, 264*, 270*; XVI, XVII.
„ der Wasserturbine, 121, 122, 125, 126, 128; 118*, 126*.
Laufschaufeln der Dampfturbine, 274, 275; 271*, 272*.
„ der Gasturbine, 361; 360*.
„ der Wasserturbine, 125, 126, 128; 118*, 119*, 126*, 128*.
Laufwerk, 132.
Lauta, Kraftwerk, 517; 514*.
Laval, Gustaf Patrik de, 258.
Laval-Turbine, 258—260; 255*.
Lebon, 322.
Lech, 149.
Leerlaufkanal, 130, 131, 137; 131*, 145*, 146*.
Leerschuß, siehe: Leerlaufkanal.
Leerschütz, 131; 132*.
Leibniz, 168, 169.
Leistung des elektrischen Stromes, 389, 472, 475.
„ Maßeinheit der, 97.
Leistungsmesser für elektrische Ströme, 475 bis 477; 473*—476*.
Leiträder der Dampfturbine, 274; 270*, 273*.
„ der Wasserturbine, 121, 122, 129; 116*, 117*, 128*, 129*.
Leitschaufeln der Wasserturbine, 129; 128*.
Leitungs-Hohlseile, 432, 433.
Leitungsmaterial für Starkstrom, 435, 436.
Leitzach, Kraftwerk, 149.
Lennep, 140.
Lenoir, Gasmaschine v., 323; 319*, 320*.
Lentz-Dichtung, 250; 244*.
Lentz-Steuerung, 224, 231; 213*.
Lenz, 373.
Leonard-Ilgner-Schaltung, 484, 490, 495; 480*.
Leonardo da Vinci, 39, 159, 160.
Leuchtdrahtmaterial, 446.
Leuchtgas, 338, 339.
Leuchtöl, 343.
Leupold, Jacob, 47, 99, 117.
Lichtbogen, elektrischer, 379, 380; 383*.
Lichtbogen-Ofen, 511, 512; 508*, 509*.
Lichtbogen-Schweißung, 513; 510*, 512*, 513*.
Lichtmühle, 102; 97*.
Linde, Prof., 350.
List, Friedrich, 516.
Litzenschnur, 439, 443; 443*.
Livingstone, 113.
Lochanker, 377; 380*.
Löffelbagger, 12, 13; 15*.
Lokomobile, 251, 252; 246*, 247*, 249*, 251*, 284*.
Lokomotiv-Kran, 48; 46*.
Lokomotivwinde, 35; 36*.
Lore, 4; 5*.
Luftheber, 12; 13*; I.
Luftpumpe, 180—182, 187, 210, 235; 174*, 177*, 267*; XII, XIV.
Lumen, 445, 450.
Lumineszenzstrahler, 455.
Lürmann, 344.
Lux, 445.

Mac Naught, John, 210.
Maffei, J. A., 204, 269.
Magnesiumoxyd, 446.
Magnetelektrische Maschinen, 369—371; 372*—375*, 378*.
Magnetismus, remanenter, 372.
Mamroth, Dr. Paul, 390*.
MAN, 350, 351, 357.
Man, Wasserrad auf der Insel, 116; 112*.
Mannloch, 284.
Manometer, 314, 315; 311*.
Manteltransformator, 433; 422*, 427*, 428*.
Marburg, 144.
Marcotty-Feuerung, 297.
Marcuse, Prof. Dr. Adolph, 105.
Marklissa a. Queis, Talsperre bei, 143; 144*, 145*.
Marly, Wasserwerke von, 117, 118; 111*.
Martigny, Wasserkraftwerk bei, 153.
Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg, siehe: MAN.
Maßeinheit der Arbeit, 96.
„ des Dampf- und Gasdruckes, 278.
„ der Leistung, 97.
Maßeinheit der Wärme-Energie, 97.
Maßeinheiten, elektrische, 472.
Massiv-Stützer, 437; 432*.
Masut, 342, 355.
Matschoß, Prof. Conrad, 92, 163, 168, 173, 174, 189, 198, 220, 245.
Maudslay, Henry, 196.
Mauer a. Bober, Talsperre bei, 143; 146*.
Maxwell, James Clerk, 366; 367*.
Maybach, Wilhelm, 328.
Mayer, Dr. Julius Robert, 93, 94, 97; 91*.
Meadi bei Kairo, 103; VI.
Mehrfach-Walzenkessel, 284; 280*.
Mehrfach-Wasserturbine, 125.
Mehrgehäuse-Dampfturbine, 264—266; 262*—264*; XVII.
Mehrphasenstrom, siehe: Wechselstrom.
Melkmaschine, 502; 498*.
Merckel, Curt, 37.
Meß-Funkenstrecke, 438; 432*.
Meßinstrumente, elektrische, 467—477; 465*—476*.
Meßwandler, siehe: Strom- und Spannungswandler.
Metallabdichtung, 250; 243*.
Metalldrahtlampe, 446—453; 447* bis 449*, 451*.
Meterkilogramm, siehe: Maßeinheit der Arbeit.
Metzger, 402.
Meyer, Expansionsschieber von J., 218; 203*.
Meyer, Hermann, 374, 375, 381.
Mikanit, 426, 438; 409*.
Miller, Oskar v., 145, 384, 398.
Million, 332.
Minden, 144.
Mischventil, 336; 334*.
Mittelland-Kanal, 144.
Moabit, Kraftwerk der Bewag, 247, 253; 253*, 254*; XV.
Moehne-Talsperre bei Soest i. W., 142; 144*.
Molybdändraht, 452.
Moore-Licht, 455, 456; 453*.
Motor, siehe: Elektromotor und Gas- und Ölmaschine.
Motorschleife, 500, 501; 498*, 499*.
Motorwechselstrombogenlampe, 454; 450*.
Mouchot, 102.
Mühleberg a. d. Aar, Kraftwerk, 123*.
Muldenkipper, siehe: Lore.
Müller, Adolf, 405.
Multizellular-Spannungsmesser, 473.
München, Briefbahn, 72, 73; 70*.
„ erste deutsche Elektrizitätsausstellung in, 384.
Murdock, William, 187, 188, 194, 196, 204, 214, 322; 181*.
Murg-Kraftwerk, 128, 150, 152; 127*, 150*, 151*, 152*.
Muschelschieber, 196, 214—218; 199*, 201*—203*.
Muskelkraft des Menschen, 98.
Muskelkraftmaschinen, 91—96, 98, 99; 92*—95*.
Muskel-, Wind- und Wasserkraftmaschinen, Talsperren, 91—154.

Nähmaschinen, 494; 490*.
Naphtha, 342.
Naphthalin, 343.
Naphthalin-Maschine, 343; 340*.
Nasmyth, James, 197.
Nebenschlußbogenlampe, 454; 450*.
Nebenschluß-Gleichstromdynamo, 378; 381*.
Nebenschlußmotor, 460, 462, 465; 460*, 461*.
Neiße, Glatzer, 143.
Nernst, Dr. Walter, 446; 445*.
Nernst-Lampe, 446, 447; 446*.
Neu-Berich, 144.
Neu-Bringhausen, 144.
Neuhof, Kraftwerk, 357.
New York, 139.
New Yorker East-River-Kraftwerk, 254.
Newcomen, Thomas, 170—173.
Niagarafälle, 113, 125, 128; 104*; VII.
Nicholson, 47.
Niederdruckdampfmaschine, 186, 193, 210.
Niederwerbe, 144.
Nieten der Kesselbleche, 287; 286*, 287*.
Nietmaschine, hydraulische, 287; 287*.
„Nordstern", Rohrpostanlage der Versicherungs-Gesellschaft, 64, 66; 64*, 65*.
Normalkerze, siehe: Hefnerkerze.
Nutenanker, 377; 380*.
Nutzeffekt der Dampfturbine, 256, 258, 318; 317*.
„ der Gasmaschine, 157, 334; 333*.
„ der Kolbendampfmaschine, 157, 318; 316*.
„ der Maschine, 97.
„ der Ölmaschine, 157.
„ der Wasserräder, 116.
„ der Wasserturbine, 120, 122, 126.

Obelisk, 38; 38*.
„ Julia in Rom, Aufstellung des, 39, 40, 42—45; III.
Oberflächen-Kondensation, 172, 180, 233, 234, 271; 174*, 177*, 223*.
Oberföhring, 148; 150*; X.
Obernach-Kraftwerk, 146, 149; 148*.
Oberschöneweide, Hochspannungszentrale, 514.
Oberwassergraben, 130; 132*, 135*.
Oechelhäuser, Wilhelm v., 346.
Oechelhäuser-Maschine, 346, 347; 341*.
Oberteich im Harz, 138.
Ofentransformator, 433; 427*, 428*.
Ohm, 373.
Ohm (elektr. Maßeinheit), 472.
Ohmsches Gesetz, 390, 469, 470, 472.
Öl für Transformatoren, 430.
Ölabscheider, 235; 224*; XIV.
Ölmaschine, 341, 344, 350—358, 361, 362; 340*, 346*—357*, 361*.
„ Nutzeffekt der, 157.
Ölmotor, siehe: Diesel-Motor und Gasmaschine.
Ölschalter, 433, 434, 435; 428*.
Ölturbine, 360, 361; 361*.
Omine in Japan, Kraftwerk, 123*.
Oersted, Hans Christian, 365; 365*.
Osmiumlampe, 446; 447*.
Osram-Konzern, 449.
Osramlampe, 448—450, 452, 453; 447*—449*.
Oszillierende Dampfmaschine, 204; 193*.
Otto, Nikolaus August, 325—332; 321*.

Pacinotti, Antonio, 375.
Palmöl, 355.
Panama-Kanal, 12, 13.
Panzertal, Talsperre im, 140.
Papierkabel, 439, 441.
Papin, Dionysius, 166—170, 257, 310, 325; 166*.
Papinscher Topf, 166, 167; 167*.
Pappus, 38.
Paraffin, 342.
Paraffinöl, 355.
Parallelogramm, Watts, 192; 179*, 180*.
Paris, erste internationale Elektrizitätsausstellung, 381, 383.
„ Weltausstellung, 325, 328.
Parsons, Charles Algernon, 262.
Parsons-Turbine, 262—264; 260*, 261*.
Pasadena bei Los Angeles, Straußenfarm, 103; VI.
Passau, 149.
Paternosteraufzüge, 86, 87; 85*, 87*.
Pathfinder-Talsperre im Staat Wyoming (U. S. A.), 139.
Pelton-Rad(-Turbine), 121, 122, 125, 126, 128, 129, 152, 153; 120*, 126*, 130*.
Penn, John, 196.
Perpetuum, mobile, 94.
Petroleum, 342, 343.
Pferdegöpel, siehe: Göpel.
Pferdestärke, 97.
„ effektive, 212.
„ indizierte, 212.
Pfrombach, Wasserkraftwerk, 149; 150*.
Phasenverschiebung, 392—394, 419, 465, 475; 393*, 394*.
Photometer, 445.
Phylae, Nilinsel, 139; 142*.
Physikalisch-technische Reichsanstalt, 477.
Pickard, James, 189.
Picota, 38; 40*.
Pinner, Felix, 384.
Pirani, M. v., 450.
Plandrehbank, 491; 489*.
Planetengetriebe, 180, 189; 179*.
Planrost, 298; 296*.
Planté, 401, 402, 404—407.
Platinfadenlampe, 382.
Pleuelstange, 206.
Poggendorff, 93.
Polizeiliche Bestimmungen über die Anlegung von Landdampfkesseln, allgemeine, 294.
Polrad, siehe: Rotor.
Poncelet, 116.
Porta, Giambattista della, 160.
Porter-Regler, 230; 219*.
Potter, Humphrey, 172.
Preßlufthammer, 287; 287*.
Preßspan, 374.
Primärspannung, 392, 393.
Primärspule, 390, 392, 393, 474; 393*, 422*.
Primärwicklung, siehe: Primärspule.
Pringsheim, Hugo, 384.
Probierhahn, 312; 311*.
Proell-Packung, 250; 244*.
Propellerturbine, 122.
Prüffeld für Isolatoren, 438; 431*, 433*.
„ für Transformatoren, 433.
Prüfhahn, 312; 311*.
Prüfstand, 422; 414*.
Pulvermaschine von Papin, 167, 325; 320*.
Pumpenanlage, 485; 485*.
Punktschweißmaschine, 513; 511*.
Puppling, Wasserkraftwerk bei, 148, 149.
Püsterich, 160; 161*.
Pyramide des Cheops, 37.

Quadrantelektrometer, 473; 470*.
Quantitätsregelung für Dampfturbinen, 272, 273; 268*, 269*.
Quarzlampe, siehe Quecksilber-Dampflampe.
Quecksilberdampflampe, 455; 452*.
Queis, 143.

Rad an der Welle, 34; 33*.
Radial-(Dampf-)Turbine, 271; 266*.
Radial-(Wasser-)Turbine, 122.
Radovanovic-Steuerung, 224; 212*.
Rammelli, 99.
Ramseye, David, 161.
Rateau-Dampfspeicher, 295.
Rateau-Grubenventilator, 485; 481*.
Rathenau, Emil, 384—386, 398; 388*.
„ Erich, 389*.
„ Walter, 389*.
Rauchkanal, 282; 278*.
Raumünzach, 152, 153.
Reaktions-(Dampf-)Turbine, 261—265, 273; 260*, 261*.
Reaktions-(Wasser-)Turbine, 121.
Receiver, siehe: Aufnehmer.
Rechenputzmaschine, 130; 132*.
Reden, Freiherr v., 199.
Reflektoren, 457; 454*.
Regeleinrichtungen für Dampfturbinen, 271 bis 273; 268*, 269*.
„ für Diesel-Motoren, 354.
„ für Gasmaschinen, 333, 336, 338; 326*, 334*, 335*.
„ für Kolbendampfmaschinen, 226 bis 231; 219.
„ für Wasserturbinen, 128—130; 129*, 130*; X.
Reichenbach, Georg v., 133, 134, 196.
Reichenhall, 133.
Reichsanstalt, Physikalisch-technische, 477.
Reichssammelschiene, 517.
Reihenschlußmotor, 463; 460*—462*.
Reklame-Beleuchtung, 457, 458; 456*, 458*, 459*.
Rempen, Wasser-Kraftwerk, 153.
Remscheid, 140.
Repulsionsmotor, 465, 466; 462*—464*.
Retortenkohle, 382.
Reuleaux, 92, 168, 244, 322.
Reversier-Walzwerk, 490; 482*, 483*.
Reversier-Walzwerkmotor, 490; 486*.
Revolverdrehbank, 491; 491*.
Rhein, Schiffsmühlen im, 114; VIII.
„ Wasserkraftwerke am, 150.
Rheinfall bei Schaffhausen, 113; 105*.
Rheinfelden, Wasserkraftwerk, 150, 414.

Rheinisch-Westfälische Elektrizitäts-Werke, 261, 433.
Rhein-Main-Donau-Kanal, 526.
Rhone, 153.
Richards, 211.
Rider, Expansionsschieber von, 220; 206*.
Riedler, Prof., 120, 251.
Riese, 18; 21*.
Ringanker, 376; 377*, 378*.
Ringmagnet, 367; 371*.
Ritchie-Motor, 369.
Ritter, Johann Wilhelm, 401.
Rizinusöl, 355.
Robinson, Dr. John, 177, 178, 184.
Roebuck, Dr., 181, 182, 184, 185.
Rochas, Beau de, 330.
Röchling-Rodenhauser-Ofen, 511; 507*.
Rohöl, 355.
Rohölmotor, siehe: Diesel-Motor.
Rohr- und Seilpost, 60—74.
Rohrpost, 60—73; 60*—68*.
„ Berliner, 68—72; 66*, 68*, 69*.
„ Büchsen, 61, 63, 64, 69; 61*, 62*.
„ Fördergeschwindigkeit, 63, 71.
„ Weiche, 71, 72; 69*.
„ Zettel-, 67, 68; 66*, 67*.
Rohrventil, siehe: Ventile.
Rolle, feste, 33; 33*, 40*.
„ lose, 34; 33*.
Rollenförderer, 10; 8*.
Roentgen, Gerhard Moritz, 246.
Roosevelt-Talsperre in Arizona (U. S. A.), 139.
Root-Kessel, 295; 293*.
Rosenheim a. Inn, 133, 134.
Rosenkranz, 211.
Rost, 281; 278*, 279*, 282*.
Rostbeschickungsvorrichtungen, 298—304; 296*—304*; XVIII, XIX.
Rotor, 370, 374—377, 396, 416—419, 422—425, 463, 464, 466; 374*, 377*, 409*, 411*, 412*, 415*, 416*, 420*, 460*; XXIII.
„ Bau, 416, 417, 422—425; 409*, 411*, 415*—417*, 420*; XXIII.
„ der Dampfturbine, 262; 273*; XVI, XVII.
Rousseau, J. J., 365.
Rückkühlwerke, siehe: Kühltürme.
Rudermaschine, 506, 507; 505*.
Rundfunk, 408.
Rundhorizont, 459; 457*.
Rutherford, 96.
Ruths-Dampfspeicher, 295, 296; 294*, 295*.

Saalach, Kraftwerk, 149.
Sachsen-Weimar, Herzog Karl August v., 200.
Sackpackmaschine, automatische, 492; 490*.
Sambesi, Viktoria-Fall des, 113; 106*, 107*.
Sankey-Diagramm, siehe: Wärmestrom-diagramm.
Sanssouci, Springbrunnen, 118—120; 115*.
Sauggas-Bereitung, 340, 341; 336*—339*.
Saugrohr-Krümmer, 124.
Saugzuganlage, 305, 306; 305*; XIX.
Savery, Thomas, 164, 165, 168, 169.
Schaduf, 38; 39*.
Schäffer & Budenberg, 211.
Schaffhausen, Rheinfall bei, 113; 105*.
Schaltbilder von Kraftwerken, 520, 521; 516*, 517*.
Schaltungsschema für Gleichstromdynamo, 378; 381*.
Schaufelbagger, siehe: Löffelbagger.
Schaufeln, siehe: Lauf- und Leitschaufeln.
Schaufelrad-Bagger, 13; 15*.
Schaufelsalat bei der Dampfturbine, 274; 271*.
Schaukel-Becherwerk, 14, 15; 16*, 17*.
Scheinleistung, 393, 419; 393*.
Scheinwerfer, elektrische, 502, 505; 505*.
Scherenkran, 50, 53; 48*.
Schermaschine, 502; 499*.
Schichau, F., 204.
Schiebersteuerung der Kolbendampfmaschine, 214—218; 198*—208*.
Schieß A.-G., 491.
Schiffsdynamoanlage, 504, 505; 500* bis 503*.
Schiffsinstallationen, 505; 503*.
Schiffsmühlen, 114; 108*, 109*; VIII.
Schlaffseil-Ausrückung für Aufzüge, 81.
Schleiden, 142.
Schlepper, 9; 7*.
Schleuderstand, 422; 414*.
Schlitzmaschine, siehe: Schrämmaschine.
Schluchsee-Werk, 153.
Schlupf des Ankers, 396, 419.
Schmelzsicherung, 383; 387*.
Schmidt, Ing. Wilhelm, 241.
Schneckenförderer, 9; 7*.
Schneckengetriebe, 35; 36*.
Schnellschluß-Einrichtung für die Dampfturbine, 273; 269*.
Scholz, 375.
Schöpfwerke, 163, 164; 163*.
Schornstein, 304, 305; 305*.
Schöttler, 332.
Schrägaufzug, 488; 482*.
Schrägrostfeuerung, 298, 299; 297*.
Schrämmaschine, 479; 478*.
Schraube, 35; 34*.
Schraubwinde, 35; 35*.
Schuckert, 376.
Schuckertwerke, 385.
Schürplatte, 281; 279*.
Schüttelrinne, 9, 10, 479; 7*.
Schüttelrutsche, siehe: Schüttelrinne.
Schütz, 130, 131; 131*; IX.
Schwamkrug-Turbine, 121, 122; 120*.
Schwartzkopff, Louis, 204.
Schwarzenbach-Kraftwerk, siehe: Forbach.
Schwarzenbach-Talsperre, 152; 150*, 151*.
Schwebebahn, 16.
Schweißung, elektrische, 512, 513; 510* bis 513*.
Schweiz, Wasserkraftwerke in der, 153.
Schwenkkran, 48; 44*.
Schweröle, 342.
Schwerölmotor, siehe: Diesel-Motor.
Schwimmkran, 53; 49*, 59*; V.
Schwoerer, 240, 241.
Schwungkugelregler, 128, 193, 230, 333; 129*, 180*, 219*.
Schwungrad, 226, 228, 332.
Seewer, 129.
Seilbahn-Anlage des Gaswerks Berlin-Tegel, 24; 29*, 30*.
Seilbahnen, 16—31; 18*—31*; II.
„ Antrieb, 21; 25*.
„ Fahrzeuge für, 21—23; 26*.
„ Gehänge, 22; 26*, 27*.
„ Geschichte der, 17—20; 18*—22*.
„ Schrägbrücke, 25; II.
„ Starrgleis, 23, 27.
„ Tragseil, 20—23; 23*.
„ Wagenkupplung, 22, 23; 27*.
„ Weichen, 23, 24; 28*.
„ Winkelstelle, 23; 28*.
„ Zugseil, 21—23; 25*.
Seil-Schrägbrücke, 25; II.
Seilpost, 73, 74; 69*—73*.
Seil-Schwebebahn, siehe: Seilbahn.
Sektionskessel, 290; 290*.
Sekundärspannung, 392, 393.
Sekundärspule, 390, 392, 393, 474; 393*, 422*.
Sekundärwicklung, siehe: Sekundärspule.
Selbstentladewagen, 5, 6; 3*, 4*.
Selbstgreifer, 54, 56; 52*—55*.
Sengbachtal, Talsperre im, 140.
Severn-Fluß, Flutwerk am, 154; 153*.
Shannon-Fluß, 125.
Shoshone-Fall des Snake-Flusses, 113.
Shula, 17.
Shuman, 103.
Sicherheitsregler für die Dampfturbine, 273; 269*.
Sicherheitsventil, 310—312; 308*, 309*, 311*.
Siebnen, Wasserkraftwerk, 153.
Siemens, Werner, 78, 79, 370—373, 375, 385, 438, 477.
„ Wilhelm v., 447, 446*.
Siemens-Schuckertwerke, 418, 422, 425, 432, 433, 449, 464, 477, 480, 485, 491.
Siemens & Halske, 371, 375, 382, 385, 414.
Sinsteden, Wilhelm Joseph, 401.
Slaby, Prof., 386.
Slawianoff-Lichtbogenschweißung, 513; 512*.
Small, 184.
Smeaton, John, 174.
Smith, Dr., 177.
Snake-Fluß, Shoshone-Fall des, 113.
Soest i. W., Talsperre bei, 142; 144*.
Soffittenlampe, 453; 447*.
Soho, Fabrik in, 184.
Solaröle, 342.
Solenoides, Kraftlinienfluß eines stromdurchflossenen, 367; 370*.
Solinger Talsperre, 140; 143*.
Sombart, 92.
Sonnenenergie, 99, 102.
Sonnenkraftmaschinen, 99, 102—105; 97* bis 99*; VI.
Southern, John, 210.
Spaltverluste bei Dampfturbinen, 262, 263; 260*.

Spannung, elektrische, 388, 389, 392, 472.
Spannungsmesser, 469—471, 474; 466*. 467*.
„ elektrostatischer, 473.
Spannungswandler, 474; 471*.
Speiseventil, 307; 311*.
Sperradgetriebe, 168; 168*.
Sperrmauer, 136—138; 138*, 141*, 143*, 145*, 151*; IX.
Sperrwehr, siehe: Stauwehr.
Spiralturbine, 125, 148, 150; 123*, 149*.
Spiritus, 342, 343.
Springbrunnen in Sanssouci, 118—120; 115*.
Stabmagneten, Kraftlinienfluß eines, 366, 367; 368*.
Stadt-Rohrpostanlagen, 60, 68—72; 66*, 68*, 69*.
Stadtzentrale, 386.
Ständer, siehe: Stator.
Standortanzeiger für Aufzüge, 80; 81*.
Starkstrom, Anwendungsgebiete, 478—513.
Starkstrom, Der elektrische, 363—528.
Starkstromtechnik, Entwicklung der, 365 bis 400.
Starrgleis für Seilbahnen, 23, 27.
Stator, 396, 417, 418, 425, 426, 463, 464, 466; 409*, 412*, 417*; XXIV.
„ Bau, 417, 425, 426; 409*, 417*; XXIV.
Staudamm, siehe: Sperrmauer.
Stauwehr, 130, 136.
Steilrohrkessel, 291, 292; XVIII.
Steinkohlenteer, 343, 355.
Steinkohlenteeröl, 343, 355.
Steinmüller, L. & C., 291, 301; XVIII.
Steinmüller-Kessel, 291, 292; XVIII.
Steinschraube, 248; 242*.
Stephenson, Georg, 194, 196, 231.
Stern, Dr. Georg, 433, 434.
Sternschaltung, 395, 396, 430; 395*, 396*.
Stetige Förderer, 2—32.
Steuerbaum, 172; 171*.
Steuerung der Gasmaschine, 332, 333; 326*, 329*, 330*.
„ der Kolbendampfmaschine, 212 bis 226; 198*—217*.
Stielhammer, 197; 183*, 184*.
Stöhrer, Emil, 369.
Stollmühle, 144.
Stopfbüchsen, 249, 250; 243*, 244*.
Stoßmaschine (Hobelmaschine), 491; 488*.
„ für Koksofen, 497; 496*.
Strahlkondensator, siehe: Einspritzkondensation.
Straßenlokomotive, 252; 251*.
Streichwehr, 131.
Strommesser, 469—471, 474; 466*—468*.
Stromstärke, 389, 392, 472.
Stromwandler, 474; 471*.
Stromwärme, Ausnutzung der elektrischen, 510—513; 507*—513*.
Stumpf, Prof. Dr.-Ing. Ch. J., 214, 224, 225.
Stumpfschweißmaschine, 512, 513; 510*, 511*.
Stumpf-Steuerung, 224; 215*.
Suez-Kanal, 13.
Sulzer-Steuerung, 223; 210*.
Swan, J. W., 503.
Synchronmotor, 419, 463.

Taccola (Marianus Jacobus), 18, 39.
Tafelschere, 490; 487*.
Tailfer, 301.
Talsperren, 134—144; 138*—147*.
Tandem-Anordnung, siehe: Verbundmaschine.
Tantaldrahtlampe, 447, 448; 447*.
Tassenkrone, 401; 401*.
Teer, 343, 355.
Teeröl, 343, 355, 356.
Tellerventil, siehe: Ventile.
Temperaturstrahler, 444, 445; 444*.
Temperierbad, elektrisches, 510; 506*.
Tenbrink-Feuerung, 299; 297*.
Tesla, 394, 395.
Theaterzentrale, 392*.
Thermosäule, 444.
Thompson-Indikator, 211; 197*.
Thomson, Elihu, 465.
Thoriumoxyd, 446.
Tiefbagger, siehe: Bagger.
Tiefofenkran, 488; 483*.
Tigler, 488; 487*.
Töging, Kraftwerk, 149, 418; 411*.
Torkran, 49; V.
Torricelli, 163.
Tosbecken, 130.
Tourenzahlen von Dampfturbinen, 256, 258, 266, 268, 420.
„ von Elektrogeneratoren, 420.
„ von Gasmaschinen, 334, 354, 357, 359, 420.
„ von Kolbendampfmaschinen, 256.
„ von Wasserturbinen, 128, 420.
Tragseil, 20—23; 23*.
Transformator, 390, 392, 393, 426 bis 433, 463, 474; 393*, 422* bis 428*; XXV.
„ Bau, 426—433; 422*—428*; XXV.
„ Prinzip, 390, 392, 393; 393*.
Transformatorenöle, 430.
Trattendorf, Kraftwerk, 517, 520; 226*, 227*, 514*, 518*.
Treibseil, siehe: Zugseil.
Trennschalter, 438, 520, 522; 434*, 518*.
Treppenrost, 299, 301; 296*; XVIII, XX.
Tretrad, 46, 47, 99; 40*—42*, 93* bis 95*; IV.
Trevithick, Richard, 196, 251, 287, 288.
Trichterwagen, 5; 4*.
Trick-Muschelschieber, 217; 203*.
Trick-Umsteuerung, 232.
Trio-Knüppelstraße, 490; 482*, 483*.
Trockenbagger, siehe: Bagger.
Trogförderer, 11; 11*.
Trommelanker, 370, 376, 418, 464; 374*, 376*, 378*, 380*, 411*.
Tudor-Platte, 404.
Turbine, siehe: Wasser- und Dampfturbine.
Turbo-Lokomotive, 268, 269; 265*.
Türsicherung für Aufzüge, 79; 81*.
Tyndall, 94.

Überdruck des Dampfes, 280.
Überdruck- (Dampf-) Turbine, 261—265, 273; 260*, 261*.
Überdruck- (Wasser-) Turbine, 121.
Überfälle bei Sperrmauern, 137; 143*.
Überfallwehr, 131, 131*.
Überhitzung des Dampfes, 238, 240, 241, 244, 245, 255, 256, 270, 291, 292, 294, 308, 309; XVIII, XIX.
Umformer, 400; 398*, 399*.
Umkehr-Blockstraße, 490; 482*, 483*.
Umkehr-Walzenzugmaschine, 247; 238*.
Umlaufstollen, siehe: Leerlaufkanal.
Umsteuerung bei der Kolbendampfmaschine, 231, 232; 221*, 222*.
Universalwalzwerk, 490; 486*.
Unterschubfeuerung, 301; 299*.
Unterwassergraben, 130; 135*.
Unterwindanlage, 305, 306.
Urfeld, 146; 133*.
Urft-Talsperre b. Gemünd (Eifel), 141; 143*.

Vater, Prof. Dr. Richard, 96.
Ventilation bei Elektromaschinen, 414, 423 bis 425.
„ bei Transformatoren, 427.
Ventilator, Gruben-, 485; 481*.
Ventile, 213, 214, 222; 198*, 209*; XIV.
Ventilsteuerung, 221—224; 209*—215*.
Verantius, Faustus, 18, 154.
Verbrennung der Kohle, Vollkommenheit der, 296, 317.
Verbundmaschine, 196, 230, 238, 241, 245 bis 247; 205*, 231*—239*; XIV.
Verdampfungswärme, 278, 279, 320.
Verflüssigung der Kohle, 298.
Vergaser, 342.
Verlegung von Kabeln, 443; 442*.
Verpuffungs-Maschine, 325.
Verschlußschieber, 137; 139*.
Versuchsfeld für Isolatoren, 438; 431*, 433*.
Vierfach-Expansionsmaschine, siehe: Verbundmaschine.
Viertakt-Motor, 328—330; 324*, 325* bis 331*, 349*.
Viktoria-Fall des Sambesi, 113; 106*, 107*.
Vitruvius Pollio, Marcus, 38, 92, 110, 159.
Volckmar, 402, 404.
Volldruckmaschine, 208, 215; 195*.
Volt (elektrische Maßeinheit), 472.
Volta, Allessandro, 365.
Volta-Säule, 365.
Voltmeter, siehe: Spannungsmesser.
Vorschriften für den Heizer, Bedienungs-, 315, 316.
Vorschub-Treppenrost, 301; XX.
Vorwärmer, 308; XIX.
Vulkanfiber, 374.

Waddel-Enz-Akkumulator, 410.
Wagenkipper, 6, 497; 4*.
Wagenkupplung bei Seilbahnen, 22, 23; 27*.
Waggi-Talsperre, 153.
Walchensee-Kraftwerk, 131, 145, 148, 414, 424, 522; 133*, 148*, 149*, 520*, 521*; X.
Waldecker Talsperre, 144.
Walzenkessel, 284, 285; 280*.

Wanderrost, 301, 302; 302*, 303*; XIX.
Wärme-Energie, Maßeinheit der, 97.
Wärmestromdiagramm der Dampfturbine, 318; 317*.
„ des Diesel-Motors, 356; 349*.
„ der Gasmaschine, 334; 333*.
„ der Kolbendampfmaschine, 318; 317*.
Wasser als Energiequelle, 110, 112.
Wasserhaltungsanlage, 485; 485*.
Wasserhaltungsmaschine, 171, 199, 201, 245; 171*, 173*, 231*; XII.
Wasserkehrrad, 46; 41*.
Wasserkraft in der Natur, Vorräte an, 113, 114.
Wasserkraftmaschinen, 109—134; 108*—137*; VIII.
„ Geschichte, 109, 110; 108*, 109*, 111*, 112*; VIII.
Wasserkraftwerke, Baden, 149, 150, 152; 127*, 150*—152*.
„ Bayern, 145, 148, 149; 133*, 148*—150*; X.
„ Deutschland, 144—153; 143* bis 152*; IX, X.
„ an der mittleren Isar, 148, 149; 150*; X.
„ an den Niagarafällen, 113, 125, 128; 104*; VII.
„ am Rhein, 150.
„ Schweiz, 153.
Wasserrad, 114, 116, 117, 125, 163; 110*—112*, 163*.
Wasserreinigungsanlagen für Dampfkessel, 307, 308; 310*.
Wasserrohrkessel, 288, 290; 288*—290*, 300; XIX.
Wassersäulenmaschine, 133, 134; 136*, 137*.
Wasserschloß, 131, 146, 148—150; 131*, 133*, 152*; X.
Wasserstandanzeiger, 312—314; 312*, 313*.
Wasserturbine, 120—132; 116*—130*.
„ Bauarten, 121—126.
„ Druckrohrleitung, 131, 132, 148; 131*, 133*, 134*, 152*; X.
„ Durchgangsdrehzahl, 128.
„ Laufräder, 121, 122, 125, 126, 128; 118*, 126*.
„ Leiträder, 121, 122, 129; 116*, 117*, 128*, 129*.
„ Nutzeffekt, 120, 122, 126.
Wasserturbine, Regeleinrichtungen, 128 bis 130; 129*, 130*; X.
„ Schaufeln, 125, 126, 128; 118*, 119*, 126*, 128*.
„ Umdrehungszahlen, 128, 420.
„ Wasserschloß, 131, 146, 148 bis 150; 131*, 133*, 152*; X.
„ Weg des Wassers, 122; 118*.
„ Zuleitungs-Einrichtungen, 131 bis 132; 131*—134*; X.
Watt, James, 97, 158, 175—194, 197, 256, 257; 175*.
Watt (elektr. Maßeinheit), 472.
Watt-Regler, siehe: Schwungkugelregler.
Webstuhlmotor, 493; 492*, 493*.
Wechselstrom, 370, 379, 388, 390, 392, 394, 395, 417, 465, 475; 394*.
Wechselstromdynamo, 370, 375, 379, 393; 376*.
Wechselstromübertragung zu den örtlichen Verbrauchernetzen, 393, 523, 524; XXII.
Wechselstromzähler, 477; 475*, 476*.
Weiche für Rohrpost, 71, 72; 69*.
„ für Seilbahnen, 23, 24; 28*.
Weicheisen-Meßinstrument, 468, 469; 465*, 466*.
Weichpackung, 249, 250; 243*.
Weißer Kohle, Vorräte an, 113, 114.
Weltausstellung zu Paris, 325, 328.
Werkkanal, 130, 148, 149; 150*; X.
Welle, 250; 245*.
Westlake-Kolbenblasmaschine, 451*.
Widerstand, elektrischer, 381, 454, 470, 472.
„ induktiver, siehe: Drosselspule.
Wilkinson, John, 185, 186.
Windkraftmaschinen, 105—109; 100*—103*.
„ Regeleinrichtungen, 109; 103*.
Windmotor, 107—109; 102*, 103*.
Windmühle, 106, 107; 100*, 101*.
„ holländische, 107; 100*.
Windstärke, 109.
Windturbine, siehe: Windmotor.
Winkelstelle für Seilbahnen, 23; 28*.
Winkeltorkran, 49; V.
Wipperfürth, 140.
Wirbelströme, 373, 396, 422, 425, 427, 428, 465.
Wirkleistung, 393; 393*.
Wirkungsgrad des Diesel-Motors, 334.
„ der Gasmaschine, 320, 351.
„ der Kolbendampfmaschine, 207.
„ der Maschine, mechanischer, 212.
„ der Maschine, thermischer, 212.
Wirtschaftlichkeit gespannten Dampfes, 279, 280.
Wöhlert, 201.
Wolf, R., 252.
Wolframbandlampe, 453; 447*.
Wolframdrähte, 448, 449; 447*.
Wolframdrahtlampe, 448—450, 452, 453; 447*—449*.
Wolframnitra-Soffittenlampe, 453; 447*.
Woolf, Arthur, 196, 245.
Worcester, Edward Somerset, Marquess of, 162; 161*.
Wupper-Talsperre, 140.
Wurffeuerungen, 300; 298*, 299*.
Wybe, Adam, 18.

Zahnradgetriebe, 34; 34*.
Zahnradvorgelege bei der Dampfturbine, 266; 265*.
Zahnradwinde, 35; 35*.
Zangenkran, 488; 483*.
Zehn Gebote für den Heizer, 315, 316.
Zeitungsrotationsmaschine, 493; 494*, 495*.
Zellerfeld, 138.
Zentrifugalregler, siehe: Schwungkugelregler.
Zerener-Lichtbogenschweißung, 513; 510*.
Zettelrohrpost, 67, 68; 66*, 67*.
Ziegenberg-Akkumulator, 410.
Zinkakkumulator, 410.
Zirkoniumoxyd, 446.
Zoelly-Turbine, 268, 274; 259*.
Zug, künstlicher, 305, 306; 305*; XIX.
„ natürlicher, 304, 305; 305*.
Zugseil, 21—23; 25*.
Zündkerze, 335; 333*.
Zündvorrichtung der Gasmaschine, 334, 335; 332*, 333*.
Zweidruckturbine, 270; 266*.
Zweifach-Expansionsmaschine, siehe: Verbundmaschine.
Zweiflammrohrkessel, 286; 282*.
Zweigehäuseturbine, siehe: Mehrgehäuseturbine.
Zweitakt-Motor, 347, 348; 342*, 343*, 350*.
Zwillings-Anordnung, s. Verbundmaschine.
Zwillingsturbine, 125; 124*, 125*.
Zwischendampfverwertung bei der Dampfturbine, 269.
„ bei der Kolbendampfmaschine, 244, 245; XIV.
Zylinderinduktor, 369—371; 375*.

# Verzeichnis der Tafeln


I. Getreideheber mit Saugluftbetrieb . . . . . vor Seite 1
II. Seilbahnen in mannigfaltiger Verwendung . . . . . nach „ 24
III. Versetzung des altägyptischen Obelisken Julia in Rom unter Papst Sixtus V. im Jahre 1586 „ „ 32
IV. Alter Hafen-Drehkran mit Tretradantrieb . . . . . „ „ 40
V. Die Anpassung des Krans an Arbeitsart und Arbeitsort . . . . . „ „ 48
VI. Ausnützung der Sonnenwärme zur Krafterzeugung . . . . . „ „ 96
VII. Der Niagarafall und seine Kraftwerke . . . . . „ „ 104
VIII. Alte Schiffsmühlen im Rhein . . . . . „ „ 112
IX. Die Edertalsperre bei Hemfurt . . . . . „ „ 136
X. Das Bayernwerk . . . . . „ „ 152
XI. Der Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke beweist zu Regensburg (1654) die Stärke des Luftdrucks . . . . . „ „ 160
XII. Die erste in Deutschland gebaute Dampfmaschine Wattscher Konstruktion . . . . . „ „ 192
XIII. Dampfmaschinen einst und jetzt . . . . . „ „ 200
XIV. Schnitt durch eine moderne Heißdampf-Verbundmaschine mit Kondensation und Einrichtung für Zwischendampfentnahme . . . . . „ „ 232
XV. Ehemaliger Maschinensaal mit liegenden Maschinen des Kraftwerks Moabit der Berliner Städtischen Elektrizitätswerke A.-G. . . . . „ „ 240
XVI. Druckstufenturbine des Kraftwerks Goldenberg der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitäts-Werke . . . . . „ „ 256
XVII. Dreigehäuse-Turbine für 16 000 bis 20 000 Kilowatt bei 3000 Touren . . . . . „ „ 264
XVIII. Steilrohrkessel . . . . . „ „ 280
XIX. Moderne Hochleistungskessel-Anlage . . . . . „ „ 296
XX. Vorschub-Treppenrost . . . . . „ „ 304
XXI. Stehende Versuchs-Gasturbine für 1000 Pferdestärken bei 3000 Touren . . . . . „ „ 360
XXII. Wechselstromübertragung vom Kraftwerk über Umspannwerke zu den örtlichen Verbrauchernetzen . . . . . „ „ 392
XXIII. Wie der Rotor eines großen Drehstromgenerators entsteht . . . . . „ „ 412
XIV. Statorbau im Dynamowerk der Siemens-Schuckertwerke, Berlin . . . . . „ „ 416
XXV. Transformatorenbau . . . . . „ „ 424
XXVI. Das Großkraftwerk Golpa-Zschornewitz aus der Vogelschau . . . . . „ „ 520

# Das Weltreich der Technik

## BAND I

## Der Verkehr im Draht und im Äther

Aus dem Inhalt:

Der erste optische und erste elektrische Telegraph – Der älteste Morseapparat – Mehrfach-Telegraphie – Schnell-Telegraphie Untersee-Telegraphie – Das Weltkabelnetz – Der Bau der Kabel – Telegraphische Bildübertragung – Fernschreiber Fernseher – Fernmelder – Klingelleitungen – Leuchtsignale Wohnungssicherung – Die ersten Fernsprecher – Neuzeitliches Fernsprechamt – Fernsprechautomat – Lautsprecher – Drahtlose Telegraphie – Atherwellen – Marconi-Sender und Empfänger – Detektor – Antennen – Telefunken-Großsendestelle Nauen – Transradio – Rundfunk – Notzeichen Drahtloses Fernsprechen – Fernsehen

Der Band umfaßt 315 Seiten Text, enthält 561 Abbildungen und 23 z. T. farbige Tafeln und kostet in Ganzleinen 30 Mark

# Das Weltreich der Technik

## BAND II

## Der Verkehr auf dem Land

Aus dem Inhalt:

Wegebau – Der Wagen – Die Laufmaschine – Das Fahrrad Das Hochrad – Die ersten Daimler-Wagen – Erfindung der Luftreifen – Kraftrad – Fahrrad mit Hilfsmotor – Fern-eisenbahn – Eisenbahnbrücken – Gebirgsdurchstiche – Kanal-tunnel – Das Gleis – Drehscheibe – Lokomotive – Bremsen Bahnhöfe – Signale – Stellwerk-Häuser – Bergbahnen Stadtschnellbahn – Selbsttätige Signalanlagen – Die erste elektrische Straßenbahn – Stromführung im Wagen – Unfälle Straßenbahnhöfe – Schnellstraßenbahn

Der Band umfaßt 501 Seiten Text, enthält 825 Abbildungen und 28 z. T. farbige Tafeln und kostet in Ganzleinen 30 Mark

# Das Weltreich der Technik

## BAND III

## Der Verkehr auf dem Wasser und in der Luft

Aus dem Inhalt:

Flüsse und Kanäle – Sperrwerke – Schleusen – Schiffshebewerke – Schleppen – Kanalnetze – Häfen – Die ältesten Wasserfahrzeuge – Segelschiff-Arten – Dampfschiffahrt – Wie ein Schiff entsteht – Stapellauf – Schwimmdock – Trockendock – Ausrüstung des Schiffs – Kessel und Maschine – Ölfeuerung – Turbine – Dieselmotor – Anker – Schiffsreisen – Vermessung – Schiffshebungen – Steuerruder – Magnetkompaß – Fernlenkboot – Seekarten – Lotsen – Leuchtfeuer – Feuerschiffe – Bojen – Der Ballon – Der Fallschirm – Das lenkbare Luftschiff – Das Flugzeug – Der Sieg des Drachenflugzeugs – Bewegung des Vogelflügels – Überfliegung des Ärmelkanals – Flugzeugmotor – Riesenflugzeuge – Funkentelegraphie – Segelflug.

Der Band umfaßt 522 Seiten Text, enthält 798 Abbildungen und 30 z. T. farbige Tafeln und kostet in Ganzleinen 36 Mark

Gedruckt
im Ullsteinhaus
Berlin

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
3489104/1