

Biblioteka
Politechniki Wrocławskiej

Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej



100100247487

Elektrische Zugförderung

von

E. E. Seefehlner

Biblioteka
Politechniki Wrocławskiej

L 897 m

T/12

L 997 m

Elektrische Zugförderung

Handbuch für Theorie und Anwendung
der elektrischen Zugkraft auf Eisenbahnen

Unter Mitwirkung von Ing. H. H. Peter-Zürich
für „Zahnbahnen und Drahtseilbahnen“

Von

Dr.-Ing. E. E. Seefehlner
Wien

Mit 652 Abbildungen im Text
und auf einer Tafel



Berlin
Verlag von Julius Springer
1922

Alle Rechte,
insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.
Copyright 1922 by Julius Springer in Berlin.



354126 L/1

akc. 2586/48

Vorwort.

Die gegenseitige Abgeschlossenheit der verschiedenen technischen Gebiete bildet ein arges Hindernis für den Fortschritt der Technik. Die Denkungsarten der Berufskreise verschiedener Fachgebiete sind oft ohne ausreichende Berührungs punkte und stehen einander meist fremd gegenüber.

Diese Sachlage ist besonders für die Elektrotechnik kennzeichnend, die, in ihrem Siegeslauf ihre eigenen Wege gehend, alle anderen Fachgebiete nach ihren eigenen Zielen umgestaltet hat. Sie bildet gewissermaßen eine Welt, ein Reich für sich. Diese Art konnte überall dort zum Ziele führen, wo die bestandenen Betriebsmethoden im Wettbewerb mit der elektrischen Betriebskraft nicht standhalten konnten. Diese Sachlage lag z. B. bei den Straßenbahnen mit früher animalischer Zugkraft vor. Helfend stand der Elektrotechnik im Kampf um dieses Gebiet auch der Umstand zur Seite, daß wegen Minderwertigkeit des Pferdebetriebes und der damaligen Rückständigkeit des Städtewesens überhaupt die Straßenbahn netze noch keine nennenswerte Ausdehnung aufwiesen.

Diese Betrachtungen gewähren Einblick in die Ursachen, die der Einführung des elektrischen Betriebes bei den Vollbahnen überall im Wege stehen. Bei der mit vollem Rechte im Interesse der Betriebssicherheit zähe festgehaltenen Beständigkeit in der Eisenbahntechnik muß die Elektrotechnik hier andere Wege einschlagen um zum Ziele zu gelangen. Die der neuen Betriebskraft entsprechende Umgestaltung des Eisenbahnwesens kann wegen der Größe dieses Fachgebietes vorerst aus finanziellen und auch technischen Gründen nicht erwartet werden. Dieses Ziel steht in zweiter Reihe; zunächst muß die Elektrotechnik die Fragen der Zugförderung auf konservativer Grundlage schrittweise zu lösen trachten. Hierzu ist es nötig, sich die Denkweise der Eisenbahntechniker anzueignen und die Elektrotechnik nicht als Selbstzweck, sondern als Mittel zum Zweck zu behandeln. Es ist auch nötig, das Wesen der Straßen- und Lokalbahntechnik voll zu beherrschen, um erkennen zu können, was auf die Vollbahntechnik nicht übertragen werden darf.

In Amerika, wo die elektrische Zugförderung auch der Vollbahnen schon auf bedeutende Ausführungen hinweisen kann, hat man diese Sachlage erkannt und findet es für zweckdienlich, Spezialingenieure in diesem Sinne heranzubilden.

Die deutschen Hochschulen behandeln zwar die „elektrischen Bahnen“, aber, soweit meine Kenntnis reicht, unter ausgesprochener Bevorzugung des elektrotechnischen Standpunktes und geringer Beachtung der eisenbahntechnischen Beziehungen. Bei der knapp bemessenen Zeit der Studierenden, dem ungeheuren Umfang der Elektrotechnik und des ebenfalls zu bewältigenden Maschinenbauwesens, schließlich der verhältnismäßig geringen Zahl der Studierenden, die sich bisher dem elektrischen Bahnwesen zuwandten, mußte man sich mit dieser Sachlage abfinden.

Die in die Praxis tretenden Ingenieure müssen daher die Grundzüge dieses Sondergebietes erst in ihrer praktischen Tätigkeit und durch diese erwerben.

Den solcherart mühevollen Weg zur Beherrschung dieses Gegenstandes unter weitgehendster Preisgabe der gesammelten Erfahrungen zu kürzen und den Gegenstand in der angedeuteten eisenbahntechnischen Einstellung zu behandeln, hat sich der Verfasser — seit mehr als zwei Jahrzehnten in der Praxis des elektrischen Bahnwesens stehend — mit dem gegenwärtigen „Handbuch“ zur Aufgabe gemacht, wobei der Umstand mitbestimmend war, daß die „Elektrische Zugförderung der Eisenbahnen“ in der deutschen Literatur bislang von keinem Verfasser in Gänze und auf einheitlicher Grundlage behandelt wurde. Es liegen Arbeiten nur über einzelne Sondergebiete vor.

Der Verfasser setzt in Übereinstimmung mit der üblichen Organisation des Elektro-Bahningenieurtums voraus, daß dem elektrischen Bahningenieur die Grundzüge der Elektrotechnik geläufig sind und daß er, ohne sich mit Berechnung, Entwurf und Erzeugung elektrischer Maschinen und Apparate zu befassen, deren Eigenschaften so weit beherrscht, daß er dann an Hand der hier gegebenen Anleitungen und Überlegungen die richtige Wahl treffen kann.

Die Zugförderung ist der Lebenszweck der Eisenbahn, sie bildet daher den wichtigsten Dienstzweig des Betriebes. Im Dampfbetrieb befaßt sich der technische Dienst der Zugförderung nur mit dem für den Transport dienenden beweglichen Inventar, indem die Kraft zur Zugbewegung im Zuge selbst erzeugt und verbraucht wird.

Vom Selbstfahrerbetrieb abgesehen, wird beim elektrischen Betrieb die Zugkraft in ortsfesten Anlagen erzeugt, mittels geeigneten Leitungen dem in Bewegung befindlichen Triebfahrzeug zugeführt. Die fachwissenschaftliche Behandlung der elektrischen Zugförderung darf sich daher nicht auf die Behandlung der Fahrzeuge, namentlich der Triebfahrzeuge beschränken, sie hat vielmehr auch die Stromerzeugung und insbesondere die Stromzufuhr in den Bereich ihrer Betrachtungen zu ziehen.

Die Stromerzeugung bildet ein für sich abgeschlossenes großes Arbeitsgebiet und kann es nicht Sache des Bahningenieurs sein, sich auch mit allen Kleinfragen des Kraftwerkbaues und -Betriebes zu befassen; es ist daher diesem Gebiete ein geringer Raum gewidmet und finden lediglich diejenigen Grundsätze kurze Erörterung, die dem Bahningenieur bekannt sein müssen, um für den Entwurf der Stromerzeugung die Richtlinien zu geben und grundsätzliche Entscheidungen zu treffen.

Ohne bei der Behandlung des Stoffes die technisch wissenschaftliche Grundlage zu verlassen, ist der mathematische Apparat weitmöglichst eingeschränkt. Dagegen ist durch systematische Sammlung des Quellenmaterials dafür gesorgt, daß diejenigen, die sich mit einer besonderen Frage oder mit einem bestimmten Gebiet des elektrischen Eisenbahnwesens eingehender befassen wollen — als es im Rahmen eines das ganze Fachgebiet umfassenden Werkes ohne Einbuße an Übersichtlichkeit des Stoffes möglich ist — unschwer das in Betracht kommende Schrifttum im „Handbuch“ nachgewiesen vorfinden.

Bei dem Umstand, daß der Verfasser vorwiegend im Gebiete der vormaligen österreich-ungarischen Monarchie tätig war, läßt sich eine gewisse Einstellung der Betrachtungen auf die in diesem Lande herrschenden technischen Verhältnisse nicht vermeiden. Mit Rücksicht auf die Mannigfaltigkeit der gestellten Anforderungen und die bekanntermaßen eisenbahntechnisch schwierigen Verhältnisse in diesem Lande dürfte dieser Umstand den Wert des Handbuchs nicht beeinträchtigen.

In der Art der Behandlung des Stoffes wird die kritische Betrachtung der Beschreibung gegenüber grundsätzlich bevorzugt, indem auf diese Weise eher zur Ingenieurmäßigen, jede Aufgabe nach ihrem Wesen individuell erfassenden Denkungsart angeregt wird.

Der technischen Denkungsart hat der Verfasser durch Pflege der bildlichen Darstellung der mathematischen Zusammenhänge Rechnung zu tragen getrachtet,

und aus diesem Gesichtspunkt auch die nomographischen Rechenverfahren von M. d'Ocagne in geometrischer Behandlung zur Lösung selbst verwickelter Berechnungen in ausgedehntem Maße benutzt.

Die im Auslande insbesondere in der Schweiz gewonnenen Erfahrungen im Sondergebiete der Bergbahnen sollen durch die Mitarbeit eines langjährigen Spezialisten in diesem Fache, Ing. H. H. Peter, Zürich, volle Berücksichtigung finden. Herrn Ing. Peter sei auch hier für seine Bereitwilligkeit an den betreffenden Kapiteln des Werkes mitzuarbeiten, wärmstens gedankt.

Das mühevolle Lesen der Korrekturen besorgte in dankenswerter Weise Dr. Techn. Alfred Winkler, Wien. Dr. Winkler beteiligte sich auch an der Bearbeitung des Kapitels betreffend die Gesetze der Erwärmung der Triebmaschinen.

Denjenigen Firmen der elektrischen Industrie, die durch Ueberlassung von Informationen und Abbildungen die Arbeit der Verfasser gefördert haben, und der Verlagsbuchhandlung Julius Springer, die durch verständnisvolles Eingehen auf die vielfach ungewöhnliche Fassung des Werkes und durch gediegene Ausstattung den Verfasser in der Erreichung seines Ziels unterstützt hat, sei auch hier der aufrichtige Dank ausgesprochen.

Wien, im Dezember 1921.

Dr. Ing. Seefehlner.

Inhaltsverzeichnis.

Allgemeines.

Richtlinien der Eisenbahntechnik.

Seite

Erster Teil.

Systeme der elektrischen Zugförderung	3
---	---

Allgemeine Kennzeichnung der verschiedenen Bahnarten.

A. Reibungsbahnen.

1. Industriebahnen	4
2. Straßenbahnen	5
3. Lokalbahnen	6
4. Stadtbahnen	8
5. Vollbahnen	11

B. Spezialbahnen.

6. Zahnbahnen	16
7. Standseilbahnen	17
8. Schwebeseilbahnen	19
9. Gleislose Bahnen	19

C. Fahrzeuge mit eigener Kraftquelle.

10. Benzin- (Benzol-, Rohöl-) elektrische Fahrzeuge	20
11. Speicherfahrzeuge	21
12. Umformerlokomotiven	22

Zweiter Teil.

Stromerzeugung.

1. Technisch-wirtschaftliche Grundlagen	23
2. Art der Belastung	26
3. Milderung der Spitzen	27
4. Kurzschlüsse	27
5. Mittel für ein elastisches Verhalten	28
6. Quecksilberdampf-Gleichrichter	32
7. Selbsttätige Umformerwerke	33
8. Periodenumformer	36
9. Wirtschaftliche Bedeutung des Ausgleiches der Belastung. Pufferung	37
10. Resonanzerscheinungen	39
11. Schaltungsregeln	39
12. Schutzeinrichtungen	41
13. Einpolige Erdung	41
14. Strombezug aus bahnfremden Werken	42

Dritter Teil.

Die Leitungsanlage.

Fern- und Speiseleitungen	43
-------------------------------------	----

Die Arbeitsleitung (Fahrleitung).

A. Theorie und Berechnung.

I. Elektrische Eigenschaften, Festwerte, Berechnung der Leitungsanlage.

1. Gang der Rechnung	44
2. Elektrische Kennwerte der Leitungsanlage	45

II. Die Stromverteilung.	Seite
1. Allgemeines	50
2. Berechnung der Stromverteilung	51
III. Fernwirkungen der Stromzuführung für die Zugförderung.	
1. Fernwirkungen	56
2. Statische Induktion	57
3. Elektrodynamische Wirkungen	57
4. Elektromagnetische Induktion	58
IV. Mechanische Eigenschaften.	
1. Allgemeines. Systeme	59
2. Der Längsschnitt (Durchhangberechnung).	
Grundgleichungen	61
Zeichnerisches Rechenverfahren zur Lösung der allgemeinen Zustandsgleichung .	67
Änderung des Leitungsgewichtes	69
Zahlenbeispiele	71
Schiefe Spannfelder	74
Messung des Durchhangs	77
Wahl des Durchhangs für das Tragseil	77
Unterschied in der Belastung benachbarter Spannfelder	79
3. Lageplan der Fahrleitung für Rollenstromabnehmer	81
4. Lageplan der Fahrleitung für Bügelstromabnehmer	82
5. Das Spannwerk	85
Gerade Bahn	85
Krümmungen	85
6. Berechnung der Stützpunkte	86
Mauerhaken, Rosetten	86
Armausleger	86
Maste	86
V. Der Leitungsbau.	B. Leitungsbau.
1. Zweck der Fahrleitung	88
a) Die Oberleitung	89
b) Die Stromschiene	89
c) Die Unterleitung	89
2. Die selbsttragende Fahrleitung	90
Der Arbeitsdraht	90
Querschnittsformen	90
Das Klemmwerk	92
Isolatoren und Isolatorhalter	94
Tragwerk und Stützpunkte	98
Doppelpolige (Drehstrom-) Fahrleitungen	101
Fahrleitungen in Stollen und Tunnels	102
3. Fahrleitungen mit Vielfachaufhängung	103
Das Einfachkettenwerk	107
Das Verbundkettenwerk	110
Das Doppelkettenwerk	112
Kettenwerk System Paul	112
Draht- und Seilverbinder	112
Die Isolatoren	114
Streckentrennung, Schaltung, Blitzschutz	119
4. Fahrleitung mit Stromschiene	120
Die Isolatoren	122
5. Die Unterleitung	125
6. Die Rückleitung	125

Vierter Teil.

Die Fahrzeuge.

Bewegungsgesetze der Züge.

I. Bahnwiderstände.	
1. Der Reibungswiderstand	130
2. Der Luftwiderstand	131

	Seite
3. Der Hebungswiderstand	131
4. Der Krümmungswiderstand	132
5. Die Beschleunigung	132
6. Wirkung der umlaufenden Massen	142
7. Ermittelung des Fahrwiderstandes für Straßenbahnfahrzeuge	143
8. Ermittelung des Fahrwiderstandes mit veränderlichen Werten	144
9. Erfahrungszahlen und -formeln für die Fahrwiderstände	144
10. Schlußfolgerungen für den Lokomotivbau	145
II. Die Zugkraft am Radumfang.	
1. Die Reibungsgrenze	146
2. Die Form des Radreifens	148
3. Der Achsdruck	151
4. Rechentafeln zur Gewichtsbestimmung	151
5. Das Gewicht ausgeführter Lokomotiven	154
6. Die Fahrlinien. Belastungstafeln	155
7. Haltezeiten der Züge	163
8. Fahrgeschwindigkeiten der Zugförderung	163
Die elektrische Ausrüstung der Fahrzeuge.	
III. Der Bahnmotor.	
1. Die Kennlinien des Bahnmotors	166
2. Die Abhängigkeit von der Klemmenspannung	168
3. Die Regelung der Geschwindigkeit	169
4. Das Anlassen	169
5. Parallelbetrieb	171
6. Vergleich mit der Dampflokomotive	173
7. Arten des Einphasenkollektormotors	173
8. Die Stromwendung	174
9. Der doppeltgespeiste Reihenschlußmotor	175
10. Der Reihenschlußmotor	177
11. Gegenüberstellung des Wechselstrom- und Gleichstrommotors	179
12. Gleichstrombetrieb mit Wechselstromeinrichtungen	180
IV. Die elektrodynamische Bremsung.	
1. Arten der elektrodynamischen Bremsung	181
2. Die unmittelbare Kurzschlußbremsung	181
3. Die gemischte Bremsung	183
4. Die mittelbare elektromagnetische Bremsung	183
5. Die Berechnung der Bremswiderstände	183
6. Bremsschaltungen	185
7. Die elektromagnetische Solenoidbremse	187
8. Berechnung der Solenoidbremse	188
9. Schaltung der Solenoidbremse	189
10. Die Scheibenbremsen	190
11. Die Schienenbremsen	191
12. Die Nutzbremsung	192
13. Die Nutzbremsung mit Gleichstrommotoren	193
14. Die Nutzbremsung mit Drehstrominduktionsmotoren	194
15. Die Nutzbremsung mit Wechselstromkollektormotoren	195
16. Vergleich der Wirkungsweise der Nutzbremsung bei Gleich- und Wechselstrom	196
V. Die Bemessung der Motorleistung.	
1. Grundsätze für die Bemessung der Motore	197
2. Berechnung des Stromverbrauches	198
3. Die Erwärmung und die Abkühlung; ihre Gesetze und Berechnung	201
a) Grundgesetze der Erwärmung	201
b) Eigenschaften der Temperaturkurven	205
c) Zeichnerische Rechenbehelfe	207
d) Vereinigung der thermischen und mechanischen Charakteristik	211
e) Wärmetechnische Eigenschaften der Maschinen	213
f) Beispiele	216
VI. Die Bauformen des Bahnmotors. Das Getriebe.	
1. Die Bauformen der Triebmaschine	220
2. Verwendungsgebiete	220

	Seite
3. Der Achsmotor	222
4. Der Vorgelegemotor	224
Der Doppelmotor	229
Gefederte Zahnräder	230
Mechanische Ankerbeanspruchung	233
Die Motor-Aufhängung	234
Die Kühlung	235
5. Der Gestellmotor	236
Die Bauformen des Gestellmotors	237
6. Das Parallelkurbelgetriebe	242
a) Das elementare Kurbelgetriebe	244
b) Die Schlitzkuppelstange	251
c) Das Kurbelgetriebe mit Blindwelle	255
d) Der Zweistangenantrieb mit Blindwelle	258
e) Der Schlitzkuppelrahmen	260
7. Die Schüttelerscheinungen der Kurbelgetriebe. Störungsfreie Getriebeanordnungen	266
8. Konstruktive Vorteile der massenfreien Kurbelgetriebe. Vereinheitlichung der elektrischen Triebmaschine	272
9. Der Gestellmotor für Einzelantrieb	276
10. Stetigkeitsstörungen beim Zahnradgetriebe	277
11. Grundsätzliche Einteilung und Übersicht der Getriebearten	280
VII. Die Steuerung der Fahrzeuge.	
1. Grundgleichung	282
2. Regelarten	283
3. Arten der Steuerung	283
4. Grundsätze der Schaltregeln	284
5. Fahrschalter für unmittelbare Steuerung	286
6. Schaltung der Widerstände	294
7. Mittelbare Steuerungen	295
8. Elektromagnetische Schalter für indirekte Steuerungen	295
9. Die P.C.-Steuerung der General Electric Co.	309
10. Stufenlose Steuerung für Gleichstrom	311
11. Stufenlose Steuerung für Wechselstrom	315
12. Steuerung mit Bürstenverschiebung	316
13. Steuerung mit Zusatztransformator	317
14. Unmittelbare Schaltung	318
15. Die Zahl der Stufen	319
16. Die Bemessung der Widerstände	320
17. Steuerung von Drehstromlokomotiven	321
18. Angaben über ausgeführte Steuerungen	325
VIII. Stromabnehmer.	
1. Allgemeines	329
2. Stromabnehmerarten	330
3. Der Rollenstromabnehmer	330
4. Der (Schleif-) Bügelstromabnehmer	333
5. Der Walzenstromabnehmer	340
6. Stromabnehmer für Unterleitung	341
7. Stromabnehmer für Stromschiene	343
8. Isolation der Stromabnehmer	344
IX. Nebeneinrichtungen.	
1. Die Drosselspule	345
2. Schmelzsicherungen, Höchststromausschalter	345
3. Die Beleuchtung	346
4. Die Heizung	346
5. Kupplungen	347
6. Kabel	347
Bauregeln für Triebfahrzeuge mit Reibungsbetrieb.	
X. Straßenbahntriebwagen.	
1. Bemessung der Wagengröße	349
2. Bauformen	351

	Seite
3. Untergestelle	355
4. Wagen mit Mitteleinstieg	359
5. Gewichtangaben	359
6. Die Schutzvorrichtungen	359
7. Die Bremse	360
XI. Triebwagen für Stadt- (Untergrund-) Bahnen.	
1. Grundlagen für den Entwurf	361
2. Grundriß der Wagen	368
3. Stromzuführung; elektrische Ausrüstung	370
XII. Industrielokomotiven.	
1. Besondere Kennzeichen	371
2. Zweimotorige Ausrüstung	374
3. Motoren außerhalb der Achsen	374
4. Hintereinander-Anordnung der Motoren	375
5. Innenliegende Motoranordnung	375
6. Drehgestell-Lokomotiven	375
7. Verschublokomotiven	376
8. Einrichtung des Führerstandes	377
XIII. Vollbahnlokomotiven.	
1. Benennung der Bauarten auf Grund der Achsfolge	382
2. Maßbestimmungen	383
3. Anordnung der elektrischen Ausrüstung	383
4. Die Mechanik	384
5. Bauformen	387
6. Lokomotiventwürfe	388
7. Der Rahmen	393
8. Die Kühlung	393
9. Anordnung der Bremse	393
10. Baulängen ausgeführter Lokomotiven	394
11. Angaben über ausgeführte Lokomotiven	395
Fünfter Teil.	
Spezialbahnen.	
I. Zahnbahnen	451
1. Allgemeines	451
2. Die Zugkraft	452
3. Der Zahndruck	452
4. Der Auftrieb	453
5. Standsicherheit	454
6. Zahnstangensysteme	459
7. Die Leiterzahnstange	460
8. Zahnstange Abt	461
9. Zahnstange Strub	462
10. Einfache Lamellen-Zahnstange	462
11. Kletterzahnstange Peter	462
12. Arten der Zahnbahnen	464
13. Arten der Triebfahrzeuge	465
14. Antriebsmotoren und Getriebe	468
15. Die Rutschkopplung	469
16. Die Handbremse	469
17. Die Zange	470
18. Die selbsttätige Bremse	470
19. Das Gestell	470
20. Lokomotiven	472
21. Motorwagen	473
22. Triebfahrzeuge der 2. Art	474
23. Lokomotiven für gemischten Betrieb	477
24. Motorwagen der Gruppe 3	477
25. Vollbahnverkehr	479
26. Elektrische Ausrüstung	480
27. Elektrische Nebeneinrichtungen	482

	Seite
28. Vorausberechnung der Lokomotivleistung	483
29. Geschobene Fahrzeuge	485
II. Standseilbahnen	485
1. Allgemeines	486
2. Betriebsarten	486
3. Wasserlast und motorischer Antrieb	487
4. Linienführung und Betriebssysteme	489
5. Oberbausysteme	490
6. Der Längsschnitt (Höhenplan)	491
7. Das theoretische Längenprofil für unveränderliche Zugkraft	491
8. Längsschnitt für sichere Seilführung	494
9. Die Parabalausrundung	495
10. Kettenlinienrausrundung	499
11. Die Leitrollen	501
12. Die Kurvenrollen	502
13. Bauformen der Seilrollen	503
14. Rollwiderstand der Wagen	504
15. Anfahrsbeschleunigung	504
16. Seileitungswiderstand	504
17. Das Seil	507
18. Der Kraftbedarf	512
19. Das Windwerk	515
20. Signaleinrichtungen	521
21. Fahrzeuge	522
III. Schwebeseilbahnen	525
IV. Gleislose Bahnen	529
1. Allgemeines	529
2. Die Fahrleitung; die Stromabnehmer	531
3. Stromsystem; Betriebsspannung	533
4. Fahrzeuge	533
V. Kalarische Fahrzeuge mit elektrischer Kraftübertragung	534
1. Allgemeines	534
2. Grundsätze. Dampfelektrische Lokomotive	535
3. Diesel- und benzin-elektrische Fahrzeuge	536
4. Bauregeln für die fahrbare Triebmaschine	539
5. Bauformen der Triebfahrzeuge	540
6. Die elektrische Ausrüstung	543
VI. Umformerfahrzeuge (Lokomotiven)	546
VII. Speicherfahrzeuge	548

Sechster Teil.**Wirtschaftliche Fragen.**

I. Finanzielle Grundlagen	556
II. Lebensdauer der der Abnutzung unterworfenen Bestandteile	560

Anhang.**Kurzer Abriß der angewandten Nomographie.**

1. Allgemeines	564	7. Das kollineare System mit logarithmischer Skala	568
2. Das rechtwinklige Bezugssystem	564	8. Die Z-Tafel	569
3. Die Nomographie	565	9. Projektive Skalen	571
4. Behelfe der Nomographie	565	10. Verhältnistafel	574
5. Die Summen-Rechentafel	566	11. Die Strahlentafel	575
6. Fluchtlinientafel mit einer krummlinigen Skala	568		
Namenverzeichnis (Verfasser)			577
Sachverzeichnis			581
Ortsverzeichnis			585
Zeitschriftenverzeichnis (Abkürzungen)			588
Verzeichnis der gekürzten Firmennamen			588

Druckfehlerverzeichnis.

(v. o. = von oben, v. u. = von unten, Abs. = Absatz.)

Seite	Zeile	
70	3 v. o.	$\Delta t = \frac{267}{\alpha} \left(\frac{\alpha}{80 \sigma} \right)^2 \left(\gamma_c^2 - \gamma_0^2 \right) 10^{-6}$.
70	1 v. u.	$\Delta t_{z0} = \frac{100 \sigma_{max}}{E \alpha} \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_z} \right)$.
143	—	$\frac{mv^2}{2} = Qwl$.
151	9. Abs.	A statt A_1 .
155	Tabelle	Gewicht kg/PS 90, 79, 70, 58, 49, 45.
172	14 v. u.	lies: $5V = 1\%$ anstatt 10 V.
185	2 v. o.	lies: 27,5 km/h anstatt 30 km/h.
185	3 v. o.	lies: 625 V anstatt 750 V.
185	8 v. o.	lies: 625 V anstatt 750 V.
185	24 v. u.	lies: gilt anstatt gibt.
192	1 u. 2 v. u.	lies: $f(t)$ anstatt $f(T)$.
228	—	in Abb. 228 lies: d anstatt r .
234	8 v. u.	lies: dem Anker , anstatt: der Triebachse.
248	—	richtig: $M = \gamma r \{ [r\varphi \sin^2 \alpha - a \sin \alpha] + [r\varphi \cos^2 \alpha - a \cos \alpha] \}$.
249	—	Bildstock der Abb. 262 mit demjenigen der Abb. 294 S. 270 zu vertauschen.
260	4 v. u.	lies: (Reihe 36 Jahr 1903) anstatt 38 und 1906.
272	6. Abs.	lies: $m_2 = \infty$.
282	10 v. u.	lies: $E_k \approx E$.
312	—	im Text der Abb. 349 lies: Schaltschritt.
344	—	Zeichenerklärung 8 lies: Spannungsteiler.
451	2. Abs., 3 v. o.	lies: $\mu = 1 : 5,55 (180 \text{ kg/t})$ statt $\mu = 1000 : 180 \text{ kg/t}$.
452	9 u. 10 v. u.	Z_q anstatt Z_g und Z_g statt Z_q .
453	—	in Abb. 523 sind die Bezeichnungen h und h' zu vertauschen.
457	—	lies: $z = \frac{G_r}{G_{lok}} \cdot \frac{D_t^2}{d^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$.
517	2 v. u.	lies: $\frac{S_1}{S_2}$ anstatt $\frac{S_2}{S_1}$.

Allgemeines.

Richtlinien der Eisenbahntechnik.

Die Elektrotechnik betrachtet es als ihr hohes Ziel, die Dampflokomotive durch ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug zu ersetzen, nachdem sie aus dem Gebiete der Straßen-, Stadt- und Gebirgsbahnen jede andere Zugkraft verdrängt hat.

Soll dieses Ziel auch wirklich erreicht werden — und es ist heute eine volkswirtschaftliche Notwendigkeit und daher patriotische Pflicht nach diesem Ziele zu streben — so genügt es nicht, auf vorhandenen Schöpfungen der Elektrotechnik in verwandten Gebieten weiterzubauen, weil es bei dem Umfang der vorhandenen und seit langem eingelebten Einrichtungen der Vollbahnen ein vergebliches Beginnen wäre, eine Umgestaltung der Eisenbahntechnik im Sinne der Elektrifizierung anzustreben.

Ein Erfolg kann nur dann winken, wenn der Grundsatz angestrebt wird, die durch Beständigkeit gekennzeichnete eigenartige Technik des Eisenbahnwesens zu erforschen und die Einrichtungen der Elektrotechnik in das bestehende System des Eisenbahnwesens organisch einzufügen.

Einige Beispiele lassen diejenigen Sonderheiten der Eisenbahntechnik im Gegensatz zu anderen Zweigen des Maschinenwesens und der Elektrotechnik erkennen, die als Richtschnur für die elektrischen Einrichtungen für Bahnen überhaupt und für Vollbahnen im besonderen dienen müssen.

Man betrachte zunächst die Verbindung zwischen Rad und Schiene.

In den von den Bahnverwaltungen für Vollbahnen international festgelegten Vorschriften wird bestimmt, daß im Neuzustand zwischen Spurkranz und Schiene — gemessen 10 mm unterhalb der Fahrkante — ein Spielraum von 10 mm vorhanden sein soll. Der für das Eisenbahnwesen grundlegende Bewegungsvorgang ist somit dadurch gekennzeichnet, daß eine starre „streng zwangsläufige“ Verbindung grundsätzlich vermieden wird.

Diesen Grundsatz — sorgfältige Vermeidung starrer, streng zwangsläufiger kinematischer Ketten — sieht man auch sonst verwirklicht, indem es üblich ist, den Schienen eine nachgiebige elastische Bettung zu geben und die einzelnen Längen nicht lückenlos, sondern mit Wärmelücken aneinanderzureihen.

Auch die Verbindung zwischen Radsatz und Fahrzeug ist keine starre, vielmehr ist die Zwischenschaltung geeigneter Federn die Regel.

Ebensowenig erfolgt die Zugbildung durch starre Verbindung der einzelnen Fahrzeuge, vielmehr ist die für diesen Zweck dienende Zug- und Stoßvorrichtung stets mit einer reichlichen Federung versehen. Man ist sich eben vorweg klar darüber, daß eine so genaue Herstellung, insbesondere der Fahrbahn, daß Unregelmäßigkeiten nicht vorkommen, eine praktische Unmöglichkeit ist. Man läßt die Unregelmäßigkeiten also zu, rechnet mit ihnen und richtet sich so ein, daß sie in ihren Wirkungen nicht schädlich sein können.

Unschädlich werden die Störungen, die Stoßwirkungen, dadurch, daß man ihnen Wege bestimmter Länge weist, in denen sie sich mit zulässigen Grenzwerten aufzehren können.

Trotzdem die Eisenbahn ein Verkehrsmittel mit streng begrenzter Fahrbahn ist, ist für ihre Einrichtungen die grundsätzliche Vermeidung starrer Verbindungen in der Bahn der Kraftübertragung und aller Bewegungsvorgänge kennzeichnend.

Die volle Erkenntnis dieses Grundsatzes und dessen Beachtung bei der Wahl des Systems und der Einrichtung der elektrischen Zugförderung ist von großer Bedeutung, wie sich dies aus dieser kurzen Überlegung erkennen läßt.

Es darf behauptet werden, daß der volle Erfolg der elektrischen Zugförderung davon abhängt, ob es sich als möglich erweist, diesem Grundsatz volle Geltung zu verschaffen, und daß viele Mißerfolge in der Geschichte der im Eisenbahnwesen angewandten Elektrotechnik dem Umstand zuzuschreiben sind, daß dieser Grundsatz unbeachtet blieb.

Erster Teil.

Systeme der elektrischen Zugförderung.

Versucht man die möglichen und ausgeführten Systeme der elektrischen Zugförderung auf Grund der elektrischen Eigenschaften systematisch zu gruppieren, so stößt man bei der Mannigfaltigkeit der in Betracht kommenden Gesichtspunkte und deren möglichen Vermischung insofern auf Schwierigkeiten, als es sich zeigt, daß die elektrischen Systeme für bestimmte Bahnarten kein kennzeichnendes Merkmal bilden.

Man kann Unterscheidungen treffen auf Grund der:

Höhe der Spannung	Art der Kraftübertragung	Art der Umformung	Stromart in der Fahrleitung	Art der Stromerzeugung
Niederspannungs-Betriebe (110—330 V.)	direkte Speisung	Drehstrom Gleichstrom	Gleichstrom	ortsfest (Wasser, Dampfkraftwerk)
Mittelpunknungs-Betriebe (500—1000 V.)	indirekte Speisung	Drehstrom Wechselstrom	Wechselstrom { 15 25~ 50	selbstbewegl. Anlage (Benzelektro- und Akkum.-Fahrzeuge, Umformerlokos)
Hochspannungs-Betriebe (2500—16000 V.)			Drehstrom { 15 25~ 50	

Ohne mit dieser Aufzählung alle möglichen Arten erschöpft zu haben, geht aus dieser Aufstellung hervor, welche Unzahl verschiedener Gesichtspunkte vorliegen und wie groß die Zahl der möglichen Kombinationen ist.

Bei den rein praktischen Zielen, die diesem Werke, das nicht das Eisenbahnenwesen in seiner Gesamtheit, sondern nur den allerdings wichtigsten Dienstzweig, die Zugförderung behandelt, gesteckt sind, dürfte eine Gruppierung nach dem eisenbahntechnischen Verwendungszweck die Übersicht am besten fördern, indem sich für gewisse Zwecke bestimmte Kombinationen, und zwar im Zusammenhang mit den für das Bahnwesen kennzeichnenden räumlichen Einschränkungen, die wieder durch die zu lösende Aufgabe gegeben sind, überwiegend durchgesetzt haben.

Eisenbahntechnisch sind zu unterscheiden:

Industriebahnen:

- a) Obertag-Betrieb.
- b) Untertag-Betrieb.

Klein-(Straßen-)Bahnen.

Lokal-(Überland-)Bahnen.

Stadtbahnen.

Vollbahnen.

Spezialbahnen:

Zahnradbahnen.

Standseilbahnen.

Schwebebahnen.

Geleislose Bahnen.

Bahnen mit selbstbeweglicher Krafterzeugung:
 Benzin elektrische Fahrzeuge.
 Akkumulatorenfahrzeuge.
 Umformerlokomotiven.

Die für die hier genannten Gruppen kennzeichnenden Merkmale sind jedoch nicht so scharf ausgeprägt, daß immer eine klar erkennbare Abgrenzung ersichtlich wäre; vielmehr sind die Fälle zahlreich, daß eine eisenbahntechnisch ausgesprochen in eine bestimmte Gruppe gehörige Anlage alle Eigentümlichkeiten einer anderen Gruppe aufweist.

Allgemeine Kennzeichnung der verschiedenen Bahnarten.

A. Reibungsbahnen.

1. Industriebahnen.

Literatur:

- A.E.G. Eine elektrisch betriebene Kohlenbahn auf Sumatra. A.E.G.-Z. 1913. Nr. 7. D.S.K.B.Z. 1913. Chicago freight railway. E.R.J. 1912. Bd. 60. Nr. 14.
- Collischon. Elektrische Lokomotive für 500 mm Spur. E.B.T. 1905. Nr. 18.
- Elektrische Lokomotiven. E.K.B. 1909. H. 19.
- Erb. Neue Industriebahn-Lokomotiven. D. 1908. H. 46.
- Faber. Ein Fall rentabler Güterbeförderung. E.K.B. 1905. H. 35.
- Hermanns. Einiges über elektrische Grubenlokomotiven. G. A. 1919. Nr. 998.
- Hildebrand. Die elektrisch betriebene Streckenförderung der Zeche Minister Achenbach. Glückauf 1906. Ref. E.T.Z. 1907.
- Kasten. Elektrischer Betrieb auf Postbahnhöfen. E.T.Z. 1915. H. 7.
- Klingelhoefer. Lokomotivförderung im Kohlenbergbau unter besonderer Berücksichtigung der elektrischen Lokomotiven. E.T.Z. 1912. H. 46.
- Ohl. Elektrische Lokomotiven im Bergbau. „Der Bergbau“ 1912. H. 18.
- Oesterreicher. Herstellung einer elektrischen Transportbahn in einer Salpeterfabrik in Chile während des Krieges. E.T.Z. 1920. H. 37.
- Passauer. Winke für die Einrichtung untertägiger Streckenförderungen. Verlag S.S.W.
- Philippi. Die elektr. Anlagen des Kgl. Steinkohlenwerkes Zauckerode b. Dresden. E.T.Z. 1917. H. 1.
- Philippi. Elektrische Grubenlokomotiven in Amerika. E.K.B. 1910. H. 9.
- Reinhart. Elektrische Förderbahnen. Z.O.J.A.V. 1911. Nr. 2.
- Riep. Oberleitungslokomotiven für Werkbahnen. E.T.Z. 1913. H. 17.
- Richter. Die elektrische Ausrüstung der Wechselstrom-Grubenlokomotiven der Maffei-Schwarzkopf-Werke. E.T.Z. 1910. H. 51. E.u.M. 1911. H. 14.
- Rüdiger. Der elektrische Abraumbetrieb auf Braunkohlenwerken. „Die Braunkohle“ 1909. Nr. 35.
- Schroedter. Elektrische Eisenerztransportbahnen der Rombacher Hüttenwerke. E.K.B. 1912. H. 35.
- Schroedter. Elektrischer Bahnbetrieb von 2000 V. Spannung (Rombacher Hütte). E.K.B. 1907. H. 29. Ref. Z.V.D.J. 1908. Bd. 52. Nr. 2.
- Soeder. Elektrische Lokomotiven im Berg- und Hüttenbetrieb. „Kohle und Erz“ 1907. H. 25.
- Thomson-Houston. Locomotives électriques de mines et d'usines. 1909. Nr. 163.
- Werther. Die elektrische Schmalspurbahn der Zuckerfabrik Groenendijk in Holland. E.T.Z. 1898. H. 15. Le chemin de fer électrique à écartement de 0,6 m. R.G.E. 1919. Nr. 4, S. 603.

Industriebahnen sind meistens Anlagen beschränkten Umfangs in Privatbetrieb mit Spurweiten von 500, 600, 750 (760), 820, 920, 1000 mm und Oberbausystemen, die Achsdrücke von 1 t bis etwa 4, äußerst 6 t aufweisen. Den kleineren Achsdrücken entsprechen zumeist auch die kleineren Spurweiten. Die für derartige Bahnen in Betracht kommenden Verkehrsleistungen lassen sich in der überwiegenden Zahl der vorkommenden Fälle mit Gleichstrom von 500 bis 600 Volt in der Fahrleitung wirtschaftlich bewältigen. Nachdem weiters bei dieser Stromart und Spannung auch die Fahrzeuge einfach und billig herstellbar sind, beherrscht dieses

System ziemlich allgemein das Gebiet der Industriebahnen selbst dort, wo im verfügbaren Kraftwerk eine andere Stromart erzeugt und daher eine Umformung in Kauf genommen werden muß.

In vereinzelten Fällen, insbesondere wo die verlangten geringen Leistungen eine Umformung als entbehrlich erscheinen lassen bzw. diese unwirtschaftlich wurde, kam Einphasen-Wechselstrom selbst mit $50 \sim$ oder Drehstrom zur Verwendung.

- a) In Obertag-Betrieben bestimmt lediglich die Frage der Zweckmäßigkeit die Betriebsspannung, wogegen
- b) Untertag die Betriebsspannung aus Gründen der persönlichen Sicherheit auf 110 bis 220 Volt herabgesetzt werden muß. Für Wechselstrom werden behördlicherseits die Spannungen niedriger angesetzt als für Gleichstrom.
- c) Eine weitere Einschränkung der Betriebsspannung pflegt in Betrieben mit Akkumulatorfahrzeugen insbesondere dann Platz zu greifen, wenn ein Oberleitungsbetrieb nicht in Betracht kommt, daher diejenige Betriebsspannung gewählt werden kann, die bei gegebener Gewichtsgrenze die größte Kapazität unterzubringen gestattet.

2. Straßenbahnen.

Literatur:

- Bonfiglietti. Elektrische Bahn mit Dreiphasenstrom in Evian les Bains. E.T.Z. 1898. H. 41.
 Bosshart. Straßenbahnen. Sammlung Göschens. Berlin 1920.
 Corsepius. Die elektrischen Bahnen. Verl. Enke, Stuttgart 1910.
 Derrer. Die Einphasenwechselstrom-Straßenbahnen der Provinz Parma. E.K.B. 1911. H. 3.
 Dietl. Das Kleinbahnnetz in der Borinage. E.K.B. 1905. H. 16.
 Kielland. Die elektrischen Straßenbahnen und Vollbahnen in Norwegen. V.T. 1921. Mai/Juni.
 Kyser. Die elektrischen Bahnen und ihre Betriebsmittel. Verl. Vieweg, Braunschweig 1907.
 Müller. Die 50 Perioden-Einphasenwechselstrom-Straßenbahn in St. Avold (Lothr.). E.T.Z. 1911. H. 1.
 Richey. Electric Railway Handbook. Graw-Hill Book Co., New York 1915.
 Simeon. Güterbeförderung auf elektrischen Straßenbahnen. Z.f.K.B 1918, S. 527 und 1919, S. 29.
 Ref. E.T.Z. 1920. H. 51.
 Wiesinger. Kleinbahnen für 50 Perioden-Wechselstrombetrieb. E.K.B. 1911. H. 28.
 Die Große Berliner Straßenbahn und ihre Nebenbahnen. Verl. Julius Springer, Berlin 1911.
 Lugano. Die elektrische Bahn in Lugano mit Drehstrombetrieb. E.T.Z. 1896. H. 13.
 Die städtischen Elektrizitätswerke und Straßenbahnen in Wien. Verl. Gerlach, Wien 1904.
 Städtische Straßenbahnen Wien. Verl. Gerlach, Wien 1913.

Straßenbahnen sind im allgemeinen durch kurze Zugfolge, bis 30 sek., den reinen Motorwagenbetrieb gekennzeichnet und dadurch, daß der Personenverkehr überwiegt. Die Anforderungen an die Betriebssicherheit und Billigkeit des angewendeten Systems sind weitestgehend und müssen alle anderen Gesichtspunkte dagegen zurücktreten.

Das 500 bis 600 Volt-Gleichstrom-Oberleitungssystem erfüllt diese Bedingungen zweifellos so weit, als es nach dem Stande der Elektrotechnik und der Technik überhaupt möglich ist. Nachdem weiter die Beeinflussung benachbarter Schwachstromleitungen und der im Boden verlegten Kabel-, Gas- und Wasserleitungen in unschädlichen Grenzen gehalten werden kann, findet dieses System ganz ausschließlich Verwendung.

Bei kleineren Netzen ist die direkte Stromverteilung möglich und wirtschaftlich bei zentraler Lage des Kraftwerkes bis etwa 50 Wagen und 20 bis 30 Betriebskilometern. (Graz, Triest, Linz, Brünn sind mit direkter Stromverteilung ausgeführt.) Erst bei größerer Ausdehnung muß Drehstromfernleitung und Umformung vorgesehen werden.

Mit Einführung der Wendepolmotore ließ sich die früher insbesondere von den Amerikanern festgehaltene Spannungsgrenze von 600 V auf 750 bis 800 V steigern

ohne Einbuße an Betriebssicherheit. Hierdurch hat sich die Reichweite entsprechend dem Verhältnis der Quadrate der Spannungen erhöht.

In den vereinzelt noch bestehenden Unterleitungsbetrieben, die meist zweipolig fahren, ist man über 500 Volt bei geerdetem Mittelpunkt nicht hinausgegangen.

3. Lokalbahnen (Überlandbahnen).

Literatur:

Gleichstrombahnen.

- Bearce. Amerika und Canada. Summary of High-voltage D. C. Railways. G.E.R. 1920. Nr. 4.
- Törpisch. Die elektrischen Bahnen der Vereinigten Staaten Amerikas. G.A. 1907. Nr. 725.
- Annapolis Short Line. E.K.B. 1915. H. 23.
- Milch. Die Elektrisierung der Arad-Hegyalja-Bahn. E.K.B. 1914. H. 20.
- Herzog. 1500 Volt-Gleichstrombahn im Misoxertal Bellinzona-Mesocco. E.u.M. 1907. H. 49.
- Boesch. Die elektrische Bahn Bellinzona-Mesocco. E.K.B. 1909. H. 1.
- Niethammer. Die Berninabahn. E.u.M. 1910. H. 36.
- Koller. Die Berninabahn. E.K.B. 1911. H. 4 bis 6.
- Boßhard. Die Berninabahn. Schw.B.Z. 1912. Bd. 59 Nr. 6.
- Kummer. Die elektrische Bahn Biasca-Aquarossa. Schw.B.Z. 1911. Bd. 58. Nr. 17. E.T.Z. 1912. H. 22.
- Bourlier. Bethlehem Chile iron mines electrification. G.E.R. 1919.
- Walter. Die elektrische Schmalspurbahn Biel-Täuffelen-Ins. Schw.B.Z. 1918. Bd. 71. Nr. 23.
- Gyaros. Die Elektrisierung der Überetscherbahn bei Bozen in Südtirol mit 1200 V. Gleichstrom. E.K.B. 1914. H. 11.
- Electrical feautures of the Brescia-Salo-Toscolano 1200 V. directcurrent railway. E. W. März 1911.
- Fischer. Die Elektrifizierung der Linien der Budapest Lokalbahnen. E.K.B. 1912. H. 18. E.R.J. 1912. Bd. 39. Nr. 22. L.E. 1912. Bd. 22 Nr. 43.
- Guery. Etude sur la traction électrique par courant continu alimentation des réseaux de tramways et de metropolitains. Extrait de la R.G.E. 1920, Paris.
- Entwicklung der elektrischen Bahnen in den Vereinigten Staaten im Jahre 1914. E.R. Bd. 66. S. 8. Ref. E.T.Z. 1912. H. 25.
- California 1200 Volt D. C. Railway. E.R.J. 1909. Bd. 33. Nr. 16 1909. Bd. 34. Nr. 14.
- Chur-Arosa-Bahn. B.B.C.M. 1916. H. 5.
- Kayser. Die Vorortbahnen in der Umgebung Cölns. S.S.W. E.T.Z. 1906. H. 13.
- Peter. Electrification of the Hershey Cuban Railway. G.E.R. 1920. Nr. 4.
- Europäische Gleichstrombahnen mit höheren Spannungen. Schw.B.Z. März 1913 und Z.Ö.J.A.V. 1913. H. 42.
- Frankfort-Homburg electric ry. L.R.T.J. Juni 1910.
- Die Hohenfurter Lokalbahn. E. u. M. 1914. H. 14.
- Hewett. The Indianapolis & Louisville 1200 V. D. C. Line. G.E.B. 1908.
- Reinhart. The Innsbruck-Hall Ry. L.R.T.J. Aug. 1910.
- New Suburban Electrification in England, Lancashire & Yorkshire Ry. E.R.J. 1916. Bd. 47. Nr. 10. 1200 V. D. C. Line in Holland. E.R.J. 1913. Bd. 41. Nr. 10.
- Viglia. Die elektrische Bahn Lucca-Pescia-Monsummano. E. Aug. 1908.
- Die elektrische Bahn Lugano-Tesserete. Schw.B.Z. 1911. Bd. 56. S. 317. E.K.B. 1911. H. 7.
- Pförr. Der elektrische Betrieb auf den Mailänder Vorortbahnen der Mittelmeer E.B.G. G. A. 1902. Nr. 594. T.H. Sept. 1901.
- Elektr. Überlandbahn Maastricht-Aachen. B.J.E.K.V. 1913.
- Operating with 5000 V. D. C. Ry. (Michigan.) E.R.J. 1915. Bd. 46. Nr. 14. E.T.Z. 1916. H. 2.
- New 2400 V. Lines of Michigan Ry. E.T. 1915. Bd. 11. Nr. 6. E.R.J. 1915 u. 1914.
- The 1200 V. D. C. Interurban Lines of the Milwaukee El. Ry. & Lt. Co. G.E.B. 1910. Nr. 11.
- Zehnder Spörry. Elektrische Bahn Montreux-Berner Oberland. El.Ges.Allioth.
- Eine 2000 V. Gleichstrombahn Nyon St. Cergue La Cure. B.B.C.M. 1918. Nr. 8. Schw.E.T.Z. 1919. H. 3.
- van Nes. Die elektrische Lokalbahn Peggau—Übelbach. E. u. M. 1920. H. 20. — Mansvelt. B.B.C.M. 1920. Nr. 11.
- High Voltage D. C. Equipment of the Pittsburgh and Butler Street Ry. G.E.B. Juni 1914, Juni 1909. E.R.J. 1914. Bd. 43. Nr. 4.
- Löwit. Die Rhein-Haardtbahn, Mannheim—Ludwigshafen—Bad Dürkheim. E.K.B. 1914. H. 21.
- Markt. Die schlesischen Landesbahnen. E.u.M. 1919. H. 27.
- Luder. Die elektrische Solothurn-Bern-Bahn. Schw.B.Z. 1918. Bd. 72. H. 17. Ref. E. u. M. 1919. H. 8.
- Holmgren. Die Elektrisierung der Vorortebahn Stockholm-Sältsjöbaden. E.T.Z. 1914. H. 9.
- Kriziks elektrische Lokalbahn Tabor—Bechyne. Verl. Krizik, Prag 1904.
- Die Tatrabahn. E.K.B. 1914. H. 35.

- Haas. Gleichstrommotoren mit 1650 V. Klemmengspannung der Tatrabahn. E.K.B. 1914. H. 36.
151 Mile 1200 Volt Line in Texas. E.R.J. 1914. Bd. 44. Nr. 1.
- Dittes. Die elektrische Lokalbahn Trient-Malé. Z.Ö.J.A.V. 1909. L.R.T.J. Juni 1910.
- Verona-Caldiero-S. Bonifacio. Eine 1600 V. Gleichstrombahn in Italien. E.K.B. 1914. H. 3.
E.K.B. 1914. H. 9.
- Jullian. La ligne électrique de Villefranche à Bourg-Madame de la Cie du Midi. R.E. 1912.
No. 207. G.C. 1912. No. 1. R.G.C.F. Bd. 35. 1. sem.
- Washington, Baltimore & Annapolis 1200 Volt D. C. Ry. G.E.R. 1910.
- The electrification of the West-Jersey & Seashore Railway. G.E.B. 1908 u. 1907.
- Wood. Electrical Operation of the West-Jersey & Seashore Ry. E.R.J. 1911. Bd. 38. Nr. 1.
- Mit hochgespanntem Gleichstrom betriebene Bahnen. B.J.E.K.V. 1913.

Wechselstrombahnen.

- Roland. Albtalbahn. V.T.W. 1910.
- Linke. Die Wechselstrom-Pufferanlage der Albtalbahn. E.K.B. 1915. H. 16.
- Erie R. R. L.R.T.J. 1905. — The Ry. Engineer. Aug. 1908. Ep. April 1908.
- Körner. Chemins de fer Départementaux à Traction monophasée du Territoire de Belfort. Les chemins de fer d'Intérêt local et les Tramways. Mars 1914.
- Goldberg. Die neue elektrische Eisenbahn Valle-Brembana. V.T.W. 1908.
- Körner. Die elektrische Eisenbahn Bergamo-Brembothal. Ep. 1908.
- Chicago, Lake Shore & South Bend Railway. E.R.J. April 1909, April 1910. Betriebserfahrungen.
E.K.B. Mai 1916. E.R.J. Nov. 1915.
- The Roma Civitta-Castellana single phase railway. E.R.J. Juni 1908.
- The Denver & Interurban 11000 V. railway. E.R.J. Okt. 1909.
- Kleinow. Dreiteiliger Wechselstrom-Triebwagenzug für die elektrische Zugförderung auf den schleissen Gebirgsbahnen. E.K.B. 1915. H. 5.
- Automotrices des chemins de fer du Sud de la France. G.C. Mai 1911.
- Wichert. Die Triebwagenausführungen der Chemin de fer départementaux de la Haute Vienne. E.K.B. 1913. H. 23.
- Einphasen-Wechselstrombahnen in Illinois. E.T.Z. 1908. H. 5. S.R.J. 1907. E.R.J. 1909.
- Lombard-Gerin. Les tramways à courant monophasé haute tension de Lyon à Jons et à Miribel.
G.C. Dec. 1910. E.K.B. 1909. H. 30.
- The Locarno, Pontebrolla-Bignasco single-phase railway. L.R.T.J. Juni 1908. S. Herzog. Schw.E.T.Z.
1907. H. 50.
- O.S.S.W. Die Einphasen-Wechselstrombahn St. Pölten-Mariazell. D.S.K.B.Z. 1912. H. 1. E.K.B. 1912.
H. 15. E.u.M. 1908. H. 50.
- Huldschiner. Elektrische Bahn Martigny-Orsières. Schw.B.Z. 1911.
- Seefehlner. Die Mittenwaldbahn. E.K.B. 1913. H. 6. E.T.Z. 1912. H. 39.
- Nebenbahn Murnau-Oberammergau der Lokalb.-A.-G. München. E.K.B.H. 1909. H. 28. u. Ehnhart,
E.B. 1905. H. 20.
- Ferrovia elettr. à corrente monofase ad alta tensione Napoli-Piedimonte d'Alifi. A.E.G.-Thomson-Houston.
- The Padua-Fusina electric railway. L.R.T.J. Juni 1910.
- Eigenheer. Die Wechselstrombahn Padua-Fusina. E.K.B. 1910. H. 12.
- The first single phase railway in Spain Pamplona-Sanguesa. E.R.J. Mai 1913. E.T.Z. 1913. H. 2.
- Blakmore. The Pittsburgh & Butler street railway. S.R.J. Aug. 1907.
- Richmond & Chesapeake-Bay Railway. R.G.C.F. 1909 u. E.K.B. 1909. H. 8.
- Rotterdam-Haag-Scheveningen Railw. E.R.J. Okt. 1909. E.K.B. Sept. 1910.
- Heyden. Die elektrische Hauptbahn Rotterdam-Haag-Scheveningen. E.T.Z. 1909. H. 18.
- The Rjukan Railway. E.R.J. Okt. 1913.
- Marguerre. Elektrisierung der Rjukanbahn. E.K.B. 1912. H. 34.
- Schenectady-Ballston. G.E.B. 1904.
- Nordmann. Spokane & Inland Empire Railway. E.R.J. Okt. 1909.
- Paz. Die Stubaitalbahn. E.T.Z. 1905. H. 7.
- Seefehlner. Dasselbe. E.K.B. 1905. H. 35.
- Freyer. Die Wechselstrombahn Thamshavn-Lokken in Norwegen. E.K.B. 1909. H. 21.
- The Toledo & Chicago Interurban Railw. G.E.B. Dez. 1906. E.K.B. 1908. H. 6.
- Fodor. Vienna-Pressburg electric railway. L.R.T.J. März 1914.
- Seefehlner. Die elektrische Bahn Wien-Preßburg. E.K.B. 1914. H. 32. E.u.M. 1914. H. 45.
- Drehstrom-Wechselstrom-Umformeranlage für die Wien-Preßburger Bahn. E.K.B. 1915. H. 24.
- Valatin. Die elektrische Bahn Pozsony-Landesgrenze. E.K.B. 1915. H. 3.
- The Visalia fifteen cycle singlephase railway. E.R.J. Jan. 1910.

The Warren Jamestown singlephase railway. S.R.J. Febr. 1906.

Washington Baltimore & Annapolis Railway. E.R.J. März 1910. Febr. 1908.

Kadrnozka. Der Wagenpark für die Einphasen-Wechselstrombahn Wien-Baden. E.T.Z. 1906.
H. 50. E.K.B. 1907. H. 1. E.u.M. 1907. H. 42.

Drehstrombahnen.

Le chemin de fer électrique à récupération de Gergal à Santa-Fé (Espagne). R.G.E. 1917. H. 7.

Die für Lokalbahnunternehmungen zumeist kennzeichnende geringere Verkehrs-dichte mit bis 10 bis 12 Zugspaaren täglich gegenüber bis zu 30 und mehr Zugspaaren stündlich bei Straßenbahnen bewirkt, daß die in den Ausgaben als feste Post auftretende Kapitalstilgung und Verzinsung die Ausgaben verhältnismäßig mehr belastet. Die Herabsetzung des Anlagekapitals ist daher oft für das Zustandekommen entscheidend, wogegen die Bedeutung etwaiger Störungen zufolge der Sparsamkeitsmaßnahmen weniger in Erscheinung tritt.

Dieser Sachlage ist es zuzuschreiben, wenn der Gleichstrom mit 500 bis 600 Volt Spannung bei Lokalbahnen das Feld nicht behaupten konnte. Spannungen von 750, 1000, 1650 und 2000 sind derzeit bereits die Regel, soweit an Gleichstrom überhaupt festgehalten wird. Für das letztere ist neben der Streckenlänge bzw. Entfernung für die Stromzuführung hauptsächlich der Umstand bestimmend, ob die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge groß ist und ob vorwiegend Motorwagenverkehr verlangt wird. In diesen beiden Fällen erweist sich das Gleichstromsystem mit den besagten Spannungswerten als das überlegene, wenigstens was die Anschaffungs-kosten anbelangt.

Höhere Stromwirtschaft läßt sich dagegen mit einem Einphasenwechselstromsystem erzielen, doch verlangt dieses System eher Lokomotiven, um die Steuereinrichtungen und den Transformator gut unterbringen zu können. Je nach den in Betracht kommenden besonderen Aufgaben sind Spannungen von 2500, 6000 und 15000 Volt bei 45, 25 bzw. $15 - 16 \frac{2}{3}$ ~ zur Anwendung gelangt. Die Treibmotoren direkt mit Hochspannung zu speisen, erwies sich als untulich.

4. Stadt-(Vorort-)Bahnen.

Literatur:

Gleichstrombetrieb: Amerika.

Der elektrische Betrieb der Central Argentina. E.T.Z. 1920. H. 9. Z.f.K. Sept. 1920.

Schimpff. Erweiterungen des Bostoner Schnell- und Unterstraßenbahnnetzes. Z.f.K.B. Juni 1914.
Wachsmann. Die Untergrundbahn in Buenos-Aires. E.T.Z. 1914. H. 19.

Zeulmann. Die elektrische Ausrüstung der Untergrundbahn in Buenos-Aires. A.E.G. Mitt. 1921. Nr. 3.
Wenzel. Die Untergrundbahn Buenos-Aires. A.E.G.Z. 1914. H. 11.

Electrification of Montreal Tunnel & Terminal. E.R.J. März 1914.

Gordon. Electrification of the Montreal Tunnel Zone. Proc. 1918. H. 12.

Hruschka. Der neue elektrische Betrieb der New Yorker Stadtbahn. E.T.Z. 1901. H. 42.

Freund. Die New Yorker Untergrundbahn. E.T.Z. 1905. H. 5.

Törpisch. Die elektr. Bahnen der Vereinigten Staaten Amerikas. G.A. 1907. Nr. 725.

Die neuen Untergrundbahnen in New York. E.T.Z. 1911. H. 39. E.T.Z. 1910. H. 45.

Zehme. Die elektrischen Stadtschnellbahnen in den Vereinigten Staaten von N.-A. G.A. 1911. Nr. 824.
Sneyder. Bemerkungen über Personenbeförderung innerhalb der Stadt in den Vereinigten Staaten.

G.A. 1913. Nr. 860.

Musil. Die elektrischen Stadtschnellbahnen der Vereinigten Staaten von N.-A. Organ. 1913, 1915, 1916.

Brugsch. Die Erweiterungen des Schnellbahnnetzes von Groß-New York. D.B.Z. Jan. 1915.

Schimpff. Die geplanten Erweiterungen des Schnellbahnnetzes in Philadelphia. Z.f.K.B. Juli 1915.
Schimpff. Schnellverkehrsfragen in Pittsburg, Pa. E.T.Z. 1912. H. 22.

Deutschland.

Die elektrische Hoch- und Untergrundbahn in Berlin. E.T.Z. 1902. H. 7. Z.f.E. 1902. H. 19.

Manke. Die AEG-Schnellbahn Gesundbrunnen—Köln. V.T. 1921. H. 1.

- Meyer. Die elektrische Zugförderung auf der Vorortbahn Berlin—Groß-Lichterfelde Ost. Z.V.D.I. 1903.
 Reichel. Über die Einführung des elektrischen Zugbetriebes auf den Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. E.K.B. 1907. H. 11.
 Petersen. Der Personenverkehr und die Schnellbahnprojekte in Berlin. D.S.K.B.Z. Sept. 1907.
 Schimpff. Berliner Verkehrsfragen und der Wettbewerb Groß-Berlin. E.K.B. 1910. H. 20.
 Blum. Dasselbe. G.A. 1910. Nr. 802.
 Petersen. Dasselbe. G.A. 1911. Nr. 817.
 Pforr. Betrachtungen zur Elektrisierung der Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. E.K.B. 1912. H. 32.
 Pforr. Projekt über die Einführung des elektrischen Betriebes auf der Berliner Stadt- und Ringbahn. E.T.Z. 1899. H. 46.
 Schimpff. Wirtschaftliche Betrachtungen über Stadt- und Vorortbahnen. Verlag Julius Springer. Berlin 1913.
 Kemman. Derzeitiger Entwicklungsstand der Berliner Hoch- und Untergrundbahn. Z.V.D.E.V. 1911. Nr. 18.
 Gerlach. Die elektrische Untergrundbahn der Stadt Schöneberg. Verlag W. Ernst & S. Berlin 1911.
 Ministerium für öffentl. Arbeiten von Preußen. Denkschrift betreffend die Einrichtung elektrischer Zugförderung auf den Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. E.K.B. 1912. H. 10, H. 16 und H. 49.
 Platzmann. Die städt. Untergrundbahn Berlin-Schöneberg. E.T.Z. 1913. H. 10.
 Przygode. Schnellbahnen oder Schnellstraßenbahnen in Groß-Berlin. E.T.Z. 1914. H. 47.
 Schimpff. Die Gestaltung der Knotenpunkte städtischer Bahnen. Z.f.K.B. Juli 1916.
 Eiselen. Die Nordsüdschnellbahn in Berlin. D.B.Z. Dez. 1916.
 Withöft. Dampf- und elektrischer Betrieb im Großstadtverkehr. Woche. Dez. 1917.
 Ludorf. Die Schwebebahn Barmen-Elberfeld-Vohwinkel. E.T.Z. 1901. H. 26.
 Zehme. Elektrischer Lokomotivbetrieb auf Stadtschnellbahnen. E.T.Z. 1913. H. 22.
 Macholl. Die Profilgestaltung der Untergrundbahnen. E.K.B. 1914. H. 14.
 Zum künftigen Betriebe auf der Berliner Stadt- und Ringbahn. G.A. 1914. Nr. 888.
 Cauer. Zum Schnellbahnverkehr in Groß-Berlin. V.T.W. 1916. Nr. 1.
 Steiner. Deutschlands Hoch- und Untergrundbahnen. Z.O.I.A.V. 1912. Nr. 18.
 Stein. Der Bau der Hamburger Hochbahn. G.A. 1912. Nr. 847. Z.O.I.A.V. 1912. Nr. 24.
 Mahir. Dasselbe. Z.f.K.B. Mai 1912.
 Dietl. Die Hamburger Hochbahn. E.K.B. 1911. H. 21.
 Mattersdorf. Die Betriebseinrichtungen der Hamburger Hochbahn. E.K.B. 1912. H. 16, E.T.Z. 1912. H. 23.

Ungarn.

- Braun. Die elektrischen Stadtbahnen, Straßeneisenbahnen und die Franz Josef Elektrische Untergrundbahn zu Budapest. E.T.Z. 1897. H. 36.

England.

- Aspinall. Erfahrungen auf der Liverpool—Southportbahn. Proc. of Inst. of Mech. Eng. Lond. 1919. S. 423. Ref. E.T.Z. 1910. H. 20. E.u.M. 1909.
 Die neue Untergrundbahn in London. E.A. 1900.
 Die Metropolitain in London. E.T.Z. 1905. H. 5.
 Die Baker Street und Waterloo Untergrundbahn. T.R.W. Bd. 29. 1906. E.T.Z. 1907. H. 49.
 Zur Frage der Wirtschaftlichkeit städtischer Schnellbahnen. G.A. 1908. Nr. 734.
 Wittig. Die Weltstädte und der elektrische Schnellverkehr. Verl. W. Ernst & Sohn. Berlin 1909.
 Musil. Die Verkehrs- und wirtschaftliche Entwicklung der Londoner elektrischen Untergrund schnellbahnen. Z.O.I.A.V. 1911. Nr. 38.
 Kemman. Betriebsverstärkungen auf dem Bahnnetz des Londoner Innenringes seit Einführung der elektrischen Zugkraft. E.K.B. 1912. H. 11.
 Größe, Bevölkerung und Verkehr von Groß-London. T.R.W. Bd. 33. 1913. Ref. E.T.Z. 1912. H. 42.
 Renaud. Einiges über den Londoner Verkehr. Z.f.K.B. Juni 1913.
 Der Verkehr Londons. E.K.B. 1914. H. 5.
 Uytborck. Die Elektrisierung der Melbourner Vorortbahnen. B.I.E.K.V. 1913. E.R. 1920. Bd. 86. Ref. E.u.M. 1920. H. 16.
 Brecht. Die Elektrisierung der Stadt- und Vorortbahnen von Melbourne. E.K.B. 1913. H. 5. T.R.W. Dez. 1912.
 Bearce. Melbourne suburban electrification Australia. G.E.R. 1920. Nr. 8.

Norwegen.

- Braarud. Die Untergrundbahn in Kristiania. E.T.Z. 1914. H. 2.

Frankreich.

- Blum. Mitteilungen über die Pariser Stadtbahn. Z.f.K.B. Juni 1910.
 Dumas. Le chemin de fer électrique souterrain Nord-Sud de Paris. G.C. Dec. 1910.
 Petit. Les installations électriques du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris. Verl. Gauthier-Villars. Paris 1911.
 Suguet. Le métropolitain de Paris. G.C. Apr. 1911.
 Godferneaux. Le chemin de fer métropolitain de Paris. R.G.C.F. Nov. 1912.
 Pariser Vorortbahnen. E.K.B. 1913. H. 26. L.E. Mai 1913. En. Juni 1913. E.T.Z. 1913. H. 23.
 Troske. Die Pariser Stadtbahn. Verl. Julius Springer. Berlin 1905.
 Godferneaux. Le chemin de fer métropolitain de Paris. R.G.C.F. Apr. 1909.
 Die Seine-Unterfahrung durch die Linie IV. der Pariser Untergrundbahn. Schw.B.Z. Dez. 1909.
 E.K.B. 1910. H. 12.
 Kohlfürst. Die großen elektrisch betriebenen Pariser Stadtbahnen. Z.f.E. 1901. H. 25.
 Die Pariser Stadt- und Untergrundbahn. E.K.B. 1910. H. 11. Z.f.K.B. 1910. Nr. 6.
 Quinat. Les installations électriques du chemin de fer métropolitain de Paris. G.C. Nov. 1910.
 Macen. Die Elektrifizierung der Pariser Vorortelinien der franz. Staatsbahnen. B.I.E.K.V. Juli 1914.

Spanien.

- Reinhart. Die Madrider Untergrundbahn. E.K.B. 1920. H. 30.
 Gallego. The Metropolitan railway of Madrid. Beama, Mai 1920. S. 494. Ö.W.O.B.D. 1921. H. 7.
 Der Fahrpark der französischen westlichen Staatsbahn mit neuer Vielfachsteuerung. El. 1915. Bd. 71.
 S. 353. Ref. E.T.Z. 1915. H. 28.

Italien.

- Huldschiner. Über die geplante Mailänder Untergrundbahn. E.N.B. 1921. H. 14.

Wechselstrombetrieb.

- Schimpff. Über den geplanten elektrischen Betrieb der Hamburger Stadtbahn Blankenese-Ohlsdorf. E.T.Z. 1905. H. 25.
 Wichert. Einrichtung und Betrieb der elektrischen Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf. G.A. 1908. Nr. 747.
 Glinski. Die Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf. Z.V.D.I. 1908. S. 1581. Organ. 1911. S. 227.
 Wechmann. Der elektrische Betrieb auf der Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf, kgl. Preuß. Eisenb. Verw. E.T.Z. 1909. H. 41.
 Dietl. London-Brighton & South Coast-Railw. Elektrisierung des Vorortverkehres. E.K.B. 1910. H. 6. E.R.J. Mai 1911. El. Aug. 1912. L.R.T.J. Juni 1910. E.K.B. 1911. H. 18.
 Körner. Die Einführung des elektrischen Betriebes auf der Strecke Heysam—Morecamb—Lancaster der Midlandbahn. E.T.Z. 1909. E.R.J. 1908. Bd. 32. Nr. 5. E.K.B. 1909. H. 7. B.I.E.K.V. 1907. Nr. 5.
 Grimshaw. Operation of the P.R.R. Philadelphia—Paoli electrification. E.R.J. Apr. 1916. Ref.: E.u.M. 1916. H. 13. Ztg.d.V.D.E.V. 1916. Nr. 42.
 Gibbs. Construction and operation details of Philadelphia electrification. E.R.J. Jan. 1916. B. I.E.B.K.V. 1914. E.R.J. Nov. 1915.
 Kübler. Der Drehstrommotor als Eisenbahnmotor. Verl. Julius Springer. Berlin 1902. M.Milch. E.T.Z. 1903. H. 39.

Der Gleichstrom mit Stromschiene 650 bis 850 V. Spannung findet hier in weitaus überwiegendem Umfang Anwendung, weil die Anforderungen bezüglich der Betriebssicherheit noch weitgehender sind als bei Straßenbahnen, das Gewicht der Fahrzeuge eine große Rolle spielt, andererseits mit der Stromschiene sich die erforderlichen Stromstärken bewältigen lassen. Die Fernleitung erfolgt dabei ohne Ausnahmen immer mit Drehstrom.

Es bestehen wenige Anlagen: die Linien Hamburg—Blankenese—Ohlsdorf, London—Brighton und die Heysam-Morecamb-Strecke der Midlandbahn, die mit befriedigendem Erfolg den Einphasen-Wechselstrom 6000 Volt $25\sqrt{3}$ vor etwa zehn Jahren eingeführt haben, hauptsächlich weil es sich hier um Endstrecken von Fernbahnen handelt, für die man grundsätzlich ein System haben wollte, das auch für größere Entfernungen vom Weichbilde der Stadt geeignet ist.

Aus diesem Gesichtspunkte ist neuerdings auch die Vorortelinie Philadelphia-Paoli mit dieser Stromart eingerichtet worden.

5. Vollbahnen.

Literatur:

Allgemeines:

- Armstrong. The engineering problem of electrification. E.R.J. Dez. 1913. E.T.Z. 1914. H. 38.
- Armstrong. Notes on railway electrification. G.E.R. 1916. Nr. 11.
- Armstrong. Advantages of the modern electric locomotive. G.E.R. 1920. Nr. 11.
- Aspinall. Die Zukunft der elektrischen Eisenbahnen in England. Ref. E.T.Z. 1920. H. 9.
- Babcock. Mountain railway electrification. Proc. 1913. H. 9.
- Baecker. Der derzeitige Stand des elektrischen Vollbahnbetriebes. Z.O.I.A.V. 1916. H. 32.
- Baecker. Die Kohlennot und die Elektrisierung der Bahnen. Z.O.I.A.V. Juni 1919.
- Bandow. Das Wechselstrom-Bahnsystem der Bergmannwerke. E.T.Z. 1910. H. 41.
- Brecht. Einiges über die Elektrisierung von Hauptbahnen. E.K.B. 1912. H. 32.
- Brugsch. Die zukünftige elektrische Schnellbahn in Konstantinopel. E.K.B. 1921. H. 31.
- Collum. Die Zukunft der elektrischen Vollbahntraktion in Großbritannien. El. 1919. Bd. 83. Nr. 2166.
- Czeija. Amerikas gegenwärtige Stellungnahme in der Frage Gleich- und Wechselstrom für die Zugförderung. E.u.M. 1914. H. 16.
- Eichberg. Das Einphasenbahnsystem der Union. E.G. 1904.
- Eichberg. Über Einphasenbahnen. Z.f.E. 1904. H. 9.
- Eichberg. Der Stand der elektrischen Vollbahnen mit bes. Berücksichtigung der Einphasenbahnen. Z.V.D.J. 1908. S. 1145.
- Eichberg. Über die Entwicklung des Einphasen-Bahnsystems. E.T.Z. 1908. H. 24.
- Electrification-Developments of the future. E.R.J. Jan. 1916.
- Frischmuth. Über die Einführung des elektr. Zugbetriebes auf Vollbahnen. E.K.B. 1908. H. 30.
- Gleichenmann. Bayerische Staatsbahnen. Denkschrift über die Einführung des elektrischen Betriebes auf den bayer. Staatsseisenbahnen. E.K.B. 1908. H. 14. E.T.Z. 1910. H. 15. E.u.M. 1914. H. 17.
- Hershey. Unevaluated factors in electrification. E.R.J. March 1916.
- Herzog. Vollbahnbetrieb mit einphasigem Wechselstrom. E.B. 1904. H. 1.
- Hewett. The development of electric traction. G.E.R. 1914. Nr. 1.
- Heyden. Periodenzahl bei der elektr. Zugförderung der preuß. Staatsbahnen. E.K.B. 1911. H. 28.
- La locomotive électrique et la traction des trains à grande vitesse. R.G.E. Mai 1917.
- Hobart. 2400 Volt d. c. Railway electrification. G.E.R. Mai 1913 und B.I.E.B.K.V. Juni 1913.
- Holmgren. Über elektrischen Betrieb in Verbindung mit Dampfbetrieb bei Hauptbahnen. E.T.Z. 1917. H. 04.
- Huldschiner. Einige Beiträge zur Frage des geeigneten Systems für die Elektrifizierung der Vollbahnen. E.u.M. 1912. H. 51.
- Kahler. Trunk line electrification. Proc. Mai 1913.
- Kummer. Die maßgebenden Gesichtspunkte bei der Systemwahl der elektr. Zugförderung. Sch.B.Z. 1915. Bd. 66. Nr. 24.
- Kummer. Die Entwicklung der amerikanischen Hochspannungs-Gleichstrombahnen und die Systemfrage der elektrischen Zuförderung. Sch.B.Z. 1915. Bd. 65. Nr. 17.
- Kummer. Die Systemfrage der elektrischen Zugförderung in Frankreich. Sch.B.Z. 1920. Bd. 76. Nr. 22.
- Kummer. Vollbahn-Elektrifizierung und Wahl der Stromart in England. Sch.B.Z. 1920. Bd. 76. Nr. 22.
- Lydall. The choice of voltage for railway electrification on the direct current system. El. Mai 1917.
- Marchena. Comparaison entre les systèmes de traction en concurrence pour l'électrification des grandes lignes. G.C. Juli 1913.
- Mauduit. L'électrification des chemins de fer. Impressions de la commission envoyé aux Etats-Unis par le ministre français des Travaux pour l'étude de la question. G.C. Aug. 1919. S. 201.
- B.T.S.R. Sept. 1919. R.G.E. Juni 1918. S. 943. G.E.R. 1920. Nr. 4.
- Niethammer. Die Vollbahn-Elektrifizierung und die Systemfrage. E.u.M. 1910. H. 45. Die elektrische Zugförderung auf dem VIII. Int. Eisenbahnkongress in Bern. E.u.M. 1910. H. 37.
- Oppizi. Trazione elettrica. Verl. Hoepli, Mailand. 1921.
- Pförr. Wechselstrombahnen. E.B. 1903. H. 3.
- Pförr. Der elektrische Vollbahnbetrieb. G.A. 1907. Nr. 718.
- Pichelmayr. Über die Wahl der zweckmäßigsten Periodenzahl für schwere Wechselstrom-Zugförderung. E.K.B. 1911. H. 7.
- Reichel. Beitrag zur Frage der günstigsten Periodenzahl für Wechselstrombahnen. E.K.B. 1909. H. 5.
- Reichel. Rundschau über die Elektrifizierung von Vollbahnen. E.K.B. Jan. 1912 bis Juni 1913.
- Reyval. L'électrification des chemins de fer suisses. L.E. 1914. Nr. 2.
- Rice. Railway electrification as a means of saving fuel and relieving freight congestion. G.E.R. 1918. Nr. 3.
- Righi. La elettrificazione delle ferrovie. Verlag Nicola Zanichelli, Bologna 1915.

- Roedder. Die Fortschritte auf dem Gebiete der elektrischen Fernbahnen. Kreide's Verl. 1909.
 Schweiz. Studienkommission. Elektrische Bahnen in Nordamerika. Verl. Rascher. Zürich 1908.
 Seefehlner. Die elektrische Zugförderung auf den Vollbahnen. Ö.W.O.B. 1916. H. 2.
 Sieber. Zur Elektrisierung der Vollbahnen. E.T.Z. 1910. H. 9.
 Smith. Some railway conditions governing electrification. L.R.T.J. März 1914.
 Storer. Steam railroad electrification. E.R.J. Dec. 1915.
 Vallauri. Einiges über die Systemfrage bei der Elektrisierung der Hauptbahnen. E.K.B. 1914. H. 24.
 Vallauri. Sulla „Questione del sistema“. L'Elettrotecnica. Aug. 1916.
 Wittfeld. Die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Betriebes von Vollbahnen. Z.V.D.J. 1919. H. 25.
 Zallud. Einige Gesichtspunkte zur Beurteilung der Vollbahnentraktion. E.u.M. 1913. H. 35.
 Zipp. Die Leistungsfähigkeit der Dampf- und elektrischen Lokomotive. Helios 1913. Nr. 28.
 Elektrische Zugförderung auf den großen Eisenbahnen. B.d.I.E.K.V. Berichte von Gleichmann,
 Gibbs, Hruschka, Wyssling. Juli 1910.
 La „questione del sistema“. L'Elettrotecnica. Sept. 1918.

Gleichstrombahnen:

- Beeuwkes. Operating results from the electrification of the trunk Line of the Chicago, Milwaukee & St. Paul Ry. G.E.R. 1917. Nr. 5.
 Bearce. Summary of High-voltage D.C. Railways. G.E.R. 1920. Nr. 4.
 Hare. St. Paul to electrify Cascade Mountains. G.E.R. 1917. Nr. 5.
 The electrification of the Butte, Anaconda & Pacific Ry. G.E.C.B. Juli 1914. E.R.J. März 1914.
 Cox. The contact system of the B.A.u.P.R. Proc. 1915. Nr. 8.
 Some results on B.A.&P.R., electrification. Eng.u.Min.J. 1915.
 Renshaw. High Voltage D. C. Railway Practice. Proc. Apr. 1916.
 Seefehlner. Die elektrische Zugförderung auf der Puget-Sound-Strecke der Ch.M.&St.P.Ry. E.u.M. 1918. E.K.B. 1918. H. 23.
 Elektr. Ausbau der Paris—Orléansbahn. G.C. 1919. Bd. 74. S. 4. E.T.Z. 1919. H. 4. Organ. 1920. H. 20.
 Bearce. Electrification of the Paulista Railway, Brazil, Sout-America. G.E.R. 1921. Nr. 7.

Wechselstrombahnen:

Amerika (Vereinigte Staaten).

- Törpisch. Die elektrischen Bahnen der Vereinigten Staaten Amerikas. G.A. 1907. Nr. 725.
 Eichel. Amerikanische elektrische Bahnen. Int.Str.u.Kleinb.V. 1908.
 Meyer. Amerikanische Wechselstrombahnen. Z.V.D.I. 1908. S. 1381.
 Single Phase Traction on Railways. The Railway Eng. Aug. 1908.
 Zehme. Bau elektrischer Hauptbahnen in den Vereinigten Staaten. G.A. 1909. Nr. 767.
 Brecht. Neueres von den elektrischen Hauptbahnen Amerikas. E.K.B. 1914. H. 20.
 Nordmann. Die Einführung des elektr. Betriebes im Hoosac Tunnel. E.K.B. 1912. H. 12. Eng. Sept. 1912. E.R.J. Juli 1911.
 Schwarzkopf. Strombezug der New York, New Haven u. Hartfordbahn. E.K.B. 1916. H. 29. E.R.J. Dez. 1915.
 Laternser. Die Elektrifizierung der New York, New Haven u. Hartfordbahn. Sch.B.Z. 1916. Bd. 67. Nr. 7.
 Murray. Conditions affecting the success of main line electrification. Proc. 1915.
 Murray. Electrification analyzed and its practical application to trunk line roads, inclusive of freight & passenger operation. Proc. 1911.
 Murray. Betriebserfahrungen einer neuen amerikanischen Wechselstrombahn. E.K.B. 1914. H. 12. E.R.J. Juni u. Febr. 1914.
 Smith. New equipment for the Philadelphia electrification. E.R.J. 1920. Bd. 55. Nr. 24.
 Wechmann. Die elektrische Zugförderung auf den Berliner Bahnen. Z.V.D.J. 1921. Bd. 65. S. 1.
 Die elektrische Zugförderung auf der Westchester Railway. B.I.E.B.K.V. Bd. VIII.
 The New York, Westchester & Boston Ry. E.R.J. Mai 1912.
 New York, New Haven-Hartfordbahn. E.R.J. Apr. 1910, März 1910, Mai 1909.
 Reinhart. Die elektrischen Einrichtungen der New York, New Haven & Hartfordbahn. E.K.B. 1908. H. 5. S.R.J. Aug. 1907.
 Wynne. Operation on the Norfolk & Western R. Proc. 1916. El. Sept. 1917.
 The Norfolk & Western Electrification. E.R.J. Juni 1915. E.T. Juli. 1915.
 Grimshaw. Operation of the P.R.R. Philadelphia-Paoli electrification. E.R.J. Apr. 1916.

Deutschland.

- Alexander. Elektrischer Betrieb auf Fernbahnen. A.E.G. Mitteilungen 1920. Nr. 4.
 Anger. Das deutsche Eisenbahnwesen in der Baltischen Ausstellung. Malmö 1914. Z.V.D.I. Sept. 1915.
 Brecht. Elektrische Zugförderung auf den preuß. Staatsbahnen. Z.V.D.I. 1911. S. 1913.

- Engel. Die Elektrifizierung der Vollbahnen Preußens. E.u.M. 1920. H. 12.
 Epstein. Die elektrische Zugförderung auf den Schlesischen Gebirgsbahnen. Z.d.V.D.E.V. Okt. 1913.
 Gleichmann. Elektrische Zugförderung. E.K.B. Apr. 1910. H. 10. B.I.E.K.V. 1910. E.T.Z. 1911.
 Heyden. Die elektr. Zugförderung auf der Strecke Dessau—Bitterfeld. E.K.B. 1911. H. 16. B.I.E.V.K. 1911.
 Heyden. Die elektrische Zugförderungsanlage Magdeburg—Leipzig—Halle. E.K.B. 1912. H. 32.
 E.K.B. 1920. H. 15.
 Idelberger. Kraft- und Unterwerke für Wechselstrombahnen. E.K.B. 1912. H. 32.
 Kleinow. Die elektrische Zugförderung Lauban—Königszelt. E.K.B. 1912. H. 32.
 Kleinow. Dreiteiliger Triebwagenzug für die elektr. Zugförderung auf den schlesischen Gebirgs-
 bahnen. E.K.B. 1915. H. 5. Apr. 1914.
 Trautvetter. Die Elektrifizierung der zukünftigen Reichseisenbahnen. E.K.B. 1920. H. 1.

England.

Electrification of British railways. E.R.J. Mai 1913.

Poschenrieder. Die Elektrifizierung der Eisenbahnen in England. E.u.M. 1920. H. 47.

Europa.

- Dawson. Electrical equipment of main line railways in Europe. E.R.J. 1907. Bd. 30. Nr. 15.
 Poschenrieder. Die Elektrifizierung von Vollbahnen in Deutschland, Schweden und Norwegen.
 E.u.M. 1918. H. 12.

Scheichl. Über elektrische Vollbahnbetriebe. Z.O.I.A.V. 1911.

Frankreich.

- Jullian. Notes sur les essais de traction électrique par locomotives équipées avec moteurs à
 courant monophasé. R.G.C.F. März 1911. E.R.J. Mai 1913. E.K.B. 1912. H. 18.
 Leboucheur. L'électrification des chemins de fer du Midi. T.M. 1920. Bd. XII. Nr. 12.
 Pahin. Progrès on the Midi Railway Pyreneen electrification. E.R.J. 1919. Bd. 54. Nr. 10.
 La traction électrique par courant alternatif simple sur les chemins de fer du Midi. I.E. 1913.
 Uytbork. Bericht über die Elektrifizierung der franz. Midi-Eisenbahngesellschaft. B.I.E.K.V. Juni 1914.

Österreich.

- Dittes. Der gegenwärtige Stand der Elektrifizierung der österreichischen Staatsbahnen. Z.O.I.A.V.
 1920. H. 17. Ref. E.u.M. 1920. H. 19. E.K.B. 1920. H. 20. E.K.B. 1921. H. 8. E.u.M. 1921. H. 16.
 Dittes. Einige Fragen der elektrischen Vollbahntraktion. Z.O.I.A.V. 1919. H. 29.
 Dittes. Zur Frage der Energieversorgung elektrisch betriebener Vollbahnen. E.u.M. 1919. H. 29.
 Hruschka. Bericht über die Vorarbeiten zur Elektrifizierung der k. k. österr. Staatsbahnen.
 E.K.B. 1910. H. 25.
 Kratochwil. Elektrifizierungsvorsorge in Österreich mit Rücksicht auf die Vollbahn-Elektrifizierung.
 Selbstverl. Salzburg 1916.
 Seefehlner. Stellungnahme Amerikas zum elektrischen Vollbahnbetrieb und die Frage der elek-
 trischen Zugförderung in Österreich. E.u.M. 1920. H. 35.
 Wechmann. Die elektr. Zugförderung auf Fernbahnen in Deutschland u. Österreich. V.T. 1921. Mai/Juni.

Schweden.

- Die Versuche mit elektrischem Betrieb der schwedischen Staatsbahn. E.K.B. 1908. H. 19. E.T.Z.
 1906. H. 9. E.T.Z. 1908. H. 23.
 Dahlander. Versuche mit elektrischem Betrieb auf schwedischen Staatseisenbahnen. Verl. Olden-
 bourg 1908.
 Dahlander. Vergangenheit und Zukunftsaussichten der schwedischen Staatsbahn-Elektrifizierung.
 Teknisk Tidkrift. Jahrg. 48. H. 52. Ref. E.T.Z. 1920. H. 11.
 Hoepner. Die Lapplandbahn Kiruna—Riksgränsen. V.T. 1921. H. 17.
 Oefverholm. Einführung des elektrischen Betriebes auf der schwedischen Staatsbahnstrecke
 Kiruna—Riksgränsen. E.K.B. 1910. H. 25.
 Die elektrische Hauptbahn Kiruna—Riksgränsen. E.T.Z. 1915. H. 51. Druckschrift der Siemens-
 Schuckert-Werke. Berlin 1914. E.K.B. 1914. H. 9. G.A. 1915. Nr. 909.
 Neue Wechselstrombahnen der schwedischen Staatsbahnen. E.K.B. 1915. H. 31.
 Kuntze. Aus dem Betrieb der Riksgränsenbahn. E.K.B. 1916. H. 9.
 Winkler. Elektrischer Betrieb auf Fernbahnen. Z.V.D.I. 1920. S. 181.

Schweiz.

- Mitteilungen und Berichte der schweizerischen Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb.
 Mitteilungen 1 bis 4. Berichte 1—4. Verl. Rascher. Zürich 1908, 1910, 1915.
 Betriebskosten der Gotthardbahn bei elektrischer Zugförderung. Z.V.D.E.V. 1911. B.I.E.K.V. 1911.
 Huber-Stockar. Die Elektrifizierung der Schweizer Bundesbahnen. Sch.B.Z. 1919. Bd. 73. Nr. 13.
 Ref. E.u.M. 1919. H. 32.
 Kummer. Der Kraftbedarf der Gotthardbahn mit Rücksicht auf die Neuanlagen für deren
 elektrischen Betrieb. Sch.B.Z. 1912. Bd. 59. Nr. 10.

- Kummer. Bericht und Kreditbegehren der Schweiz. Bundesbahnen zur Einführung der elektrischen Traktion auf der Gotthardbahn. Schw.B.Z. 1913. Bd. 72. Nr. 20.
- Thormann. Die elektrische Traktion der Berner Alpenbahn-Ges. (Lötschberg). Sch.B.Z. 1914. Bd. 63. Nr. 2.
- Thormann. Zur Eröffnung der Berner Alpenbahn. Sch.B.Z. 1913. Bd. 62. Nr. 1.
- Brecht. Die Elektrisierung der Gotthardbahn. E.K.B. 1914. H. 6.
- Sachs. Die Entwicklung des elektrischen Bahnbetriebes in der Schweiz. E.u.M. 1919. H. 23.
- Sachs. Aufnahme des elektrischen Betriebes auf der Teilstrecke Erstfeld—Airolo der Gotthardbahn. E.u.M. 1921. H. 5.
- Soberski. Zur Elektrisierung der Schweiz. Bundesbahnen (Gotthardbahn). E.K.B. 1916. H. 17.
- Die Elektrisierung der Gotthardbahn. E.T.Z. 1918. H. 27.
- Thormann. Der elektrische Betrieb auf der Strecke Spiez—Frutigen der Berner Alpenbahn. Sch.B.Z. 1911. Nr. 7.
- Les résultats d'exploitation du chemin de fer des alpes bernoises. G.C. Nov. 1916.
- Huebler. Der elektrische Betrieb auf den Linien des Engadin. Sch.B.Z. Mai 1916.
- Rhätische Bahn: Der elektrische Betrieb auf den Linien des Engadin. Orell Füssli. Zürich 1915.
- Soberski. Der elektrische Betrieb auf den Linien des Engadins St. Moritz-Schuls-Tarasp und Samaden-Pontresina (Rhätische Bahn). G.A. 1916. Nr. 939.
- Zehme. Der elektrische Betrieb der Rhätischen Bahn. Z.V.D.E.V. Apr. 1916.
- Zur Elektrisierung der schweizerischen Eisenbahnen. E.T.Z. 1918. H. 8. E.K.B. 1918. H. 25. E.u.M. Okt. 1918. E.K.B. Juli 1917.
- Résultats acquis dans l'exploitation des chemins de fer suisses. R.G.E. Aug. 1918.
- Mitteilungen über die Bahnanlage Seebach—Wettingen. E.T.Z. 1907. H. 4.
- Neue Stromzuführungsanlage für elektr. Vollbahnen. E.T.Z. 1904. H. 15.
- Kummer. Seebach—Wettingen. Sch.B.Z. Juli 1909.
- Herzog. Die 15000 Volt Einphasenbahn Seebach—Wettingen. Sch.E.T.Z. Apr. 1908.

Drehstrombahnen:

- Krüger. Elektrischer Betrieb auf den italienischen Staatseisenbahnen. E.K.B. 1907. Nr. 11.
- Parodi. Note sur le développement de la traction électrique en Italie. R.G.C.F. Nov. 1913.
- Huldschiner. Die Entwicklung der elektrischen Bahnen in Italien im Jahre 1913. E.K.B. 1914. H. 10.
- Huldschiner. Der Ausbau der Valtellinabahn von Lecco nach Mailand. E.T.Z. 1921. H. 21.
- Pahin. Mont Cenis (Italy) Railway electrification. E.R.J. Sept. 1917. S. 344.
- Hausmann. Die elektrische Zugförderung auf der Mont Cenis-Bahn. E.K.B. 1914. H. 30. E.T.Z. 1910. H. 22. R.T. Dez. 1913.
- Italian electric railways. Eng. Febr. 1917.
- Verebély. Die elektrische Vollbahntraktion in Italien. E.u.M. 1919. H. 20.
- Pontecorvo. Some results of Italian Three phase electrification (Giovi). E.R.J. März 1915.
- Die Elektrizität auf den italienischen Staatsbahnen. E.T.Z. 1913. H. 10.
- Kapp. On progress in heavy electric traction. E.R.J. Sept. 1913.
- Santoro e Calzolari. La trazione elettrica sulla vecchia linea dei Giovi. R.T. 1914. Nr. 1.
- The Giovi Line and Chiappella Station. Eng. Aug. 1913.
- Three phase locomotives for the Giovi-Lines Italy. E.R.J. Apr. 1911.
- Calzolari. Der elektrische Betrieb auf der alten Giovi-Linie. E.T.Z. 1912. H. 48.
- Verole. Notes sur l'électrification de la ligne des Giovi. R.G.C.F. Febr. 1912.
- Righi. Effetti del fumo delle locomotives a vapore sulle linee a trazione elettrica. R.T. 1911.
- Waterman. Dreiphasen-Zugförderung. Proc. Juni 1905 E.T.Z. 1906. H. 18.
- Huber. Soll man elektrische Bahnen mit Geichstrom oder Drehstrom betreiben? E.T.Z. 1899. H. 9.
- The operation of the Simplon-Tunnel. E.N. 1909. Nr. 5.
- Kilchenmann. Betriebserfahrungen bei der elektr. Zugförderung am Simplon. B.Sch.E.V. 1912. H. 11. E.K.B. 1913. H. 21.
- Ross. Der elektrische Betrieb von Vollbahnen mit Hochspannung und dessen Wirtschaftlichkeit. Z.O.I.A.V. 1901.
- Cserháti. Versuchsergebnisse über Stromverbrauch und Rückgewinn auf der Valtellinabahn und einige Eigenschaften der Drehstromtraktion. Z.O.I.A.V. 1905. Nr. 23.
- Cserháti. A valtelina vasút elektromos berendezése. M.M.&E.E.K. 1903.
- Cserháti. Drehstrom versus Gleichstrombahnen. Wechselrede, Kübler, Niethammer, Schimpff. E.T.Z. 1902. H. 20 u. 23. Kandó. E.T.Z. 1903 u. 1904. H. 8. Lanino. 1904. H. 6, 14.
- Cserháti. Fahrbare Transformatorstation der Veltlinerbahn. E.T.Z. 1907. H. 2.
- Cserháti. Messungen auf der Valtelinabahn. E.T.Z. 1905. H. 7.
- Cserháti. Die Valtelina Hochspannungs-Drehstrom-Vollbahn. E.T.Z. 1903. H. 17.
- Kando. Über Drehstrombahnen. E.T.Z. 1910. H. 28.
- Kando. Vollbahnen mit elektrischem Betriebe. Z.f.E. 1901. H. 53.
- Kando-Kummer. Gotthardbahn und Giovi-Linie. Über Berechnungen und Messungen des Kraftbedarfs bei elektrischem Betriebe. Sch.B.Z. 1912. Bd. LX.

- Golwig. Die elektrische Hochspannungsbahn in der k. u. k. Munitionsfabrik Wöllersdorf. Z.f.E. März 1902.
- New. Le chemin de fer électrique de Gergal à Santa Fe. T.M. Bd. VIII. Nr. 5.
- Fodor. Dreiphasenstrom gegen Gleichstrom. Z.f.E. Nov. 1901.
- Jordan. Der Schnellbahnwagen der AEG. (Zossen). Z.f.E. 1901. Lasche. E.T.Z. 1901. H. 39.
- Reichel. Elektrische Schnellbahnen. E.T.Z. 1901. H. 34.
- Reichel. Schnellbahnlokomotive ausgerüstet mit Motoren für unmittelbare Zuführung von 10000 V. Hochspannung. E.T.Z. 1902. H. 32.
- Reichel. Über die Zuführung elektrischer Energie für größere Bahnnetze. E.T.Z. 1904. H. 23.
- Reichel. Versuche über Anwendung des hochgespannten Drehstromes für den Betrieb elektrischer Bahnen. E.T.Z. 1900. H. 23.
- Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen. Bericht über die Versuchsfahrten auf der Militär-Eisenbahn. Berlin 1904.
- Reichel. Verwendung des Drehstroms für den Betrieb elektrischer Bahnen. Verl. Oldenbourg 1903.
- Electrification des chemins de fer fédéraux ligne Brigue—Sion. B.T.S.R. 1919. H. 6.

Die Elektrotechnik hat gerade in diesem wichtigen Gebiet in den verschiedenen Ländern keinen einheitlichen Weg eingeschlagen.

Amerika hat zunächst an dem bei Stadt- und Überlandbahnen bewährten Drehstrom-Gleichstrom-Stromschiene-650 Volt-System starr festgehalten. Die New York-New Haven-Hartfordbahn blieb lange Zeit das einzige Unternehmen, das sich des direkten Einphasensystems 11000 Volt $25\sim$ bediente.

Mit diesem Versuch, der anfänglich nicht geringe Schwierigkeiten bereitete, war aber das Eis gebrochen. Das Wechselstromsystem förderte das konkurrierende Gleichstromsystem insofern, als die Gleichstrommotoren durch die Kompensation und die Wendepole, verbessert und die Abkühlungsfragen gründlich studiert wurden.

Als Erfolg ist die Tatsache zu verzeichnen, daß der derzeit größte elektrische Bahnbetrieb, die Chicago-Milwaukee-St. Paul-Bahn, mit 3000 Volt Gleichstrom ausgeführt wurde, daß dagegen gleichzeitig weitere großzügige Ausführungen mit 11000 Volt $25\sim$ Wechselstrom, jedoch mit Umformerlokomotiven entstanden sind. (Norfolk und Westernbahn, Pa. Pennsylvaniabahn) Außerdem ist eine Gebirgsstrecke mit 3300 Volt $25\sim$ Drehstrom ausgerüstet worden.

In Europa besteht eine Einheitlichkeit der Stromsysteme ebensowenig; nichtsdestoweniger liegt fest, daß sich Schweden, Deutschland und Österreich, die Schweiz für das Wechselstrom $15000 \text{ Volt } 15 - 16 \frac{2}{3} \sim$ System entschieden haben und nur Italien an dem Drehstrom 3300 Volt $15\sim$ festhält, während, wie man hört, Ungarn ein Wechselstrom-Drehstrom-Lokomotivumformersystem bei 15000 Volt Spannung und $50\sim$ anzuwenden beabsichtigt.

In England und Frankreich hat man neuerdings für Gleichstrombetrieb mit etwa 1500 Volt Stellung genommen.

Aus diesen Feststellungen geht zunächst hervor, daß man praktisch jede Aufgabe der Zugförderung der Fernbahnen mit jedem System befriedigend lösen kann. Es gibt jedoch Grenzen wirtschaftlicher Natur.

Die Amerikaner können den Gleichstrom mit seiner teureren Leitungsanlage verwenden, weil der große Verkehr eine gute Ausnützung ermöglicht, andererseits Drehstromnetze von riesiger Ausdehnung und enormer Leistung vorhanden sind, an die es ein Leichtes ist, die Bahnen mit Motorgeneratoren anzuschließen.

Die Nachteile des Wechselstrom-Drehstromsystems mit Spaltumformer auf der Lokomotive kommen dort nicht zur Geltung, weil die Lokomotiveinheiten sehr groß sind — es handelt sich um Maschinen von 3300 PS und Zugkräfte von 56700 kg.

Die Italiener haben mit dem Drehstrom zu elektrifizieren begonnen, und zwar auf Gebirgsstrecken, die wenig veränderliche Geschwindigkeiten verlangen, darum konnte hier der Drehstrom mit seiner mangelhaften Geschwindigkeitsregelung befriedigen, und jetzt würde natürlich der Entschluß schwer fallen, auf ein anderes System überzugehen.

Für die vergleichsweise kleinen Leistungen von etwa bis 2000 PS je Lokomotive und den überwiegenden Bedarf von Einheiten verschiedener Größenordnung bis herunter zu 300 PS zahlreichen Linien mit schwachem Verkehr ist das 15 000 Volt 15 ~-System Wechselstrom zweifellos dasjenige, welches allen Anforderungen am besten zu entsprechen vermag, da die Leitungsanlage billig gebaut werden kann, Lokomotiven in jeder Größe wirtschaftlich herzustellen sind, der Motorwagenbetrieb ohne weiteres möglich ist. Daß dieses Stromsystem nicht auch für andere Zwecke in Betracht kommen kann, ist von untergeordneter Bedeutung.

B. Spezialbahnen.

6. Zahnbahnen.

Literatur:

- Nipkow. Untersuchung der Wirtschaftlichkeit des Zahnradbetriebes auf der Albulabahn. V.T.W. 1912. Nr. 6.
- Herzog. Die Arth-Rigibahn. Sch.E.T.Z. 1907. H. 15. E.K.B. 1907. H. 11.
- Daubner. Die Barmer Bergbahn. Z.V.D.I. 1902. Nr. 1.
- Rölls Enzyklop. des Eisenbahnwesens. Bergbahnen.
- Berner Oberlandbahnen E.K.B. 1912. H. 12.
- Müller. Die elektrische Bergbahn Brunnen—Morschach. Z.V.D.I. 1906.
- Ryncki. Le chemin de fer Blonay-Pleiades. B.T.S.R. 1912.
- Boesch-Ouzelet. Die Corcovadobahn. E.K.B. 1910. H. 29. Sch.B.Z. 1910.
- Hotopf. Die elektrischen Bahnanlagen der Filderbahn. E.K.B. 1906. H. 15.
- Les tramways de Grenade. Thomson-Houston. Paris 1908. Nr. 141.
- Haag und Greulich. Die elektrische Zahnbahn auf das Gornergrat. Sch.B.Z. 1898.
- Elektrifizierung der Usui-Togebahn. A.E.G.Z. 1914. Nr. 8.
- Les nouvelles locomotives du chemin de fer de la Jungfraubahn. R.B.B.C. 1917. Nr. 1. Ref. E.u.M. 1917. H. 47.
- Brünner. Technische Einzelheiten über die Jungfraubahn. E.u.M. 1912. H. 36.
- Möller. Die Jungfraubahn und der Bau ihres Tunnels. Z.V.D.I. 1904. Nr. 46.
- Siedler. Die Jungfraubahn. Z.f.E. Wien 1902. H. 48.
- Strub. Die Kraftanlagen, Leitungen und Fahrzeuge der Jungfraubahn. Schw.B.Z. 1897. Ref. E.T.Z. 1897.
- Liechty. Lokomotiven mit Hilfsmotoren. G.A. 1908. Nr. 746.
- Elektrische Bergbahn-Lokomotive der Ouest-Lyonnais Eisenbahn. Eng. 1901.
- Bremond. Chemin de fer électrique de Martigny au Châtelard. B.T.S.R. 1908.
- Herzog. Dasselbe. Sch.E.T.Z. 1908. H. 41.
- Die Monthey-Champéry-Bahn. Sch.B.Z. 1910. L.R.T.J. 1910. E.R.J. 1909.
- Zehnder Spoerry. Die elektrische Zahnradbahn Montreux—Glion. Sch.B.Z. 1909.
- Zindel. Dasselbe. E.K.B. 1909. H. 32.
- La ferrovia elettrica del Mottarone. M.T. 1911.
- Kuntze. Die elektrische Zahnbahn auf den Mont Salève. R.G.A.T. 1891. I. E.T.Z. 1894. H. 21.
- Strub. Die Münster-Schluchtbahn. D.S.K.B.Z. 1907. Nr. 30. Sch.E.T.Z. 1908. H. 32.
- Seefehlner. Die Rittnerbahn (Tirol). E.K.B. 1908. H. 29.
- Leyvraz. Le chemin de fer des Schöllenens. B.T.S.R. Nov. 1917.
- Die elektrischen Einrichtungen der Schöllenensbahn. B.B.C.-M.B. 1918.
- Die elektrische Bahn Stansstad—Engelberg. Z.V.D.I. 1899. Sch.B.Z. 1899. Bd. 33. Nr. 15.
- Burkard. Neuer elektrischer Automobilwagen für Adhäsions- und Zahnstangenbetrieb der Stansstad—Engelberg-Bahn. Sch.B.Z. 1905.
- Cattani. Bahntechnischer Rückblick aus der Schweiz. E.K.B. 1914.
- Herzog. Die elektrischen Anlagen der Schweiz. I.B. Die elektrisch betriebenen Straßen-, Neben-, Berg- und Vollbahnen. Verl. A. Raustein, Zürich 1905.
- Strub. Bergbahnen der Schweiz bis 1900. Zeitschr. f. d. ges. Lokal- u. Straßenbahnwesen. Verlag J. F. Bergmann, Wiesbaden.
- Armbruster. Die Tiroler Bergbahnen. Verl. für Fachliteratur, Wien.
- Die Zahnradbahn Trait-Planches. E.B. 1904. H. 18.
- Seefehlner. Die elektrische Bahn Triest—Opcina. E.B. 1904. H. 14.
- Morgenthaler. Die elektrischen Einrichtungen der Vesuv-Bahn. Sch.B.Z. 1903.

- Strub. Die Vesuv-Bahn. Sch.B.Z. 1903. Bd. 41. H. 16.
 Die Wendelsteinbahn. E.T.Z. 1914. H.32. Schw.B.Z. 1915. Akkumulatorenfabrik A.-G. Hagen.
 Morgenthaler. Die Elektrifikation der Wengernalpbahn. Sch.B.Z. 1910.
 Müller. Die Wengernalpbahn. Z.V.D.I. 1912. S. 1401. E.K.B. 1912.
 Elektrische Lokomotiven der Wengernalpbahn. E.K.B. 1910. H. 30. Sch.B.Z. 1910.
 Gaze. Elektrische Lokomotiven für Zahnrad- und Adhäsionsbetrieb. Z.V.D.I. 1902.
 Brückmann. Neuere Zahnradbahnen. Z.V.D.I. 1898. Bd. 42.
 Weiss. Schweiz. Berg- und Passbahnen. V.T. 1921. H. 56.
 Peter. Fünfzig Jahre schweiz. Zahnradbahnen- und Bergbahnbau. Sch.B.Z. 1921. Bd. 77. Nr. 21.

Zu Zahnradbahnen nimmt die Eisenbahntechnik Zuflucht, wenn die verlangten Zugkräfte mit Reibung zwischen Rad und Schiene nicht mehr oder nicht mit wirtschaftlichen Mitteln übertragen werden können. Verhältnismäßig große Zugkräfte und kleine, wenig veränderliche Geschwindigkeiten sind die Folge dieser Aufgaben. Die für Eisenbahnfahrzeuge sonst grundsätzlich verlangte Seriencharakteristik ist daher keine Bedingung, kann vielmehr gut entbehrt werden, wenn nur für Elastizität im Getriebe gesorgt wird. Die ausgeführten Anlagen sind außerdem zumeist Touristenbahnen, die überwiegend für Personenverkehr dienen und kleine Zugsseinheiten benötigen; man hat daher bei den bislang auf elektrischen Betrieb eingerichteten Zahnradbahnen mit Mittelspannungen von 550 bis 750 Volt das Auslangen finden können. Erst in neuerer Zeit fand der Gleichstrom mit Spannungen bis 1500 Volt für Bahnen mit verhältnismäßig großer Leistung Eingang.

Da Drehstrominduktionsmotoren und Gleichstromnebenschlußmotoren bzw. auch Serienmotoren der eingangs erwähnten Forderung der gleichmäßigen Geschwindigkeit gut entsprechen können, findet man fallweise beide Stromarten vertreten, obzwar die Neigung für Gleichstrom zu überwiegen scheint.

Die elektrische Betriebskraft hat beim Reibungsbetrieb keinen unmittelbaren Einfluß auf das System des Unter- und Oberbaues, wenn sich auch im Zusammenhang mit dem elektrischen Betrieb auf Straßenbahnen namentlich das Rillenschiensystem entwickelt hat. Jedenfalls steht fest, daß eine früher mit Dampfkraft betriebene Anlage ohne Änderung des Unter- und Oberbaues bei gleicher oder eher noch gesteigerter Leistung auf elektrische Zugförderung übergehen kann.

Bei Zahnbahnen besteht diese Unabhängigkeit zwischen den baulichen Anlageverhältnissen und dem elektrischen Betrieb bzw. den Bauformen der Triebfahrzeuge nicht mehr. Diese unterliegen in mehrfacher Hinsicht Einschränkungen, die durch die Ausführung des Ober- und Unterbaues gegeben sind. Eine grundsätzlich eingehende und kritische Behandlung dieser Zusammenhänge ist für die volle Beherrschung dieses Gegenstandes notwendig.

7. Standseilbahnen.

Literatur:

- Eberhard. Die Bergbahn auf den Merkur bei Baden-Baden. D.B.Z. 1914. H. 1.
 Müller. Einige neuere Berg-Aufzüge. G.A. 1910. Nr. 784.
 Lefébvre. Tramway funiculaire de Belleville. Revue pratique des Travaux publics. 1892 u. 1893.
 Schütt. Seilbahn für Vergnügungsreisende im Kgl. Salzbergwerk zu Berchtesgaden. Z.V.D.I. 1913.
 Schmedes. Die neue Drahtseilbahnstrecke der São-Paulo-Eisenbahn in Brasilien. V.T.W.
 Wohlfahrt. Die Drahtseilrampe in Ofen (Buda). Mitteilungen des ung. Ing. u. Arch. Ver. 1870.
 Funiculaire électrique du Bürgenstock. Soc. de l'Ind. El. Genève.
 Dumas. Funiculaire de la Bourboule. G.C. Sept. 1904.
 Fühles. Bergdrahtseilbahn auf Capri. T.R. 1909. Nr. 21.
 Thieme. Drahtseilbahnen mit elektrischem Antrieb. Cassarate—Mt. Bré. E.K.B. 1916. H. 13.
 Bernadet. Funiculaire de la Cure d'Air Ste. Antoine. Cte. rendu de la Soc. des Ing. civ. 1906.
 Le funiculaire de Engelberg-Gerschnialp. Revue B.B.C. 1917.
 Bahse. Die Drahtseilbahn Erdmannsdorf—Augustusburg. D.B.Z. 1916. Nr. 8.
 Guntschnabahn, Bozen. Konzessionsbedingungen. Österr. Verordnungsblatt für Eisenbahnen und Schiffahrt. 30. Mai 1912.
 Der Hammetschwand-Aufzug. Sch.B.Z. Okt. 1905. E.T.Z. 1906. H. 1.
 Seefehlner, Elektr. Zugförderung.

- Hamilton electric incline railway. E.R.J. 17. Juli 1915.
- Armknecht. Die Drahtseil-Bergbahn nach der Hohensyburg. E.T.Z. 1909. H. 19.
- Schmidt. Die Bergbahn Heidelberg. Z.V.D.I. 1908. S. 1501.
- Seefehlner. Theorie und Praxis der Seilbahnen: die Hungerburgbahn (Tirol) und die Seilbahn auf die Tarajka. E.u.M. 1909. H. 31.
- Drahtseilbahn Alte Wiese—Freundschaftshöhe in Karlsbad. R.T.W. 1913. H. 21.
- Konzessionsbedingnisse. Österr. Verord.Bl. f. E. u. Sch. 23. April 1912.
- Capri. Le chemin de fer Lausanne—Ouchy. Die Eisenbahn, Bd. IX.
- Thieme. Drahtseilbahnen mit elektrischem Antrieb. Les Avants-Sonloup. E.K.B. 1916. H. 13.
- Lookout mountain incline railway. Brill Magazine. 1911.
- Reyval. Chemin de fer funiculaire de Croix paquet à Lyon Croix-Rousse. R.G.E. 1907.
- Grivet. Chemin de fer de Lyon à Fourvière et St. Just. R.G.Ch.F. 1882.
- Lookout mountain incline railway. Brill Magaz. 1911.
- Die Seilebene bei Mahanoy, Pa. E.N. 1909.
- Thomann. Die Mendelbahn. E.B. 1904. H. 3.
- Jordan. Dasselbe. Z.Ö.I.A.V. Wien 1904. Nr. 31. Ref. Z.f.E. 1904. H. 34.
- Strub. Dasselbe. Sch.B.Z. 1903.
- Jordan. Über Drahtseilbahnen. E.B. 1904. H. 22.
- Jordan. Die Signal- und Telephoneinrichtungen auf der Mendelbahn. Z.f.E. Wien 1904. H. 44.
- Die elektrisch betriebene Seilbergbahn in Mont Dore. E.T.Z. 1899. H. 8.
- Gradenwitz. Eine eigenartige Drahtseilbahn mit elektr. Antrieb. Ep. Wien 1908. Nr. 23.
- Zehnder-Spörry. Die Niesenbahn. E.K.B. 1912. H. 19. Sch.B.Z. 1912.
- Tripet. Chemin de fer Neuchatel—Chaumont Tramway et Funiculaire. B.T.S.R. 1911.
- Bäseler. Die Oberweißbacher Bergbahn. V.T. 1921. Nr. 11. Z.V.D.E.V. 1920.
- Le funiculaire électrique de Pau. G.C. 1908. Nr. 1361.
- Strub. Bergbahnen der Schweiz bis 1900. I. Drahtseilbahnen. Kreidels Verl. Wiesbaden 1900.
- Peter. Fünfzig Jahre schweiz. Bergbahnen. Sch.B.Z. 1921. Bd. 77. Nr. 21.
- Walloth. Die Seilbahnen der Schweiz. Kreidels Verl. Wiesbaden 1893.
- Perkins. A picturesque Italian railway. S.A. 1909.
- A cable counterweight system for steepgrade on an electric railway at Seattle-Wash. E.N. 1911.
- Zehnder-Spörry. Elektrische Drahtseilbahn Siders—Montana—Vermala. Z.Ö.I.A.V. 1916. H. 9. B.T.S.R. 1915. H. 10.
- Seefehlner. Die Seilbahn auf die Tarajka. E.u.M. 1909. H. 31.
- Armbruster. Die Tiroler Bergbahnen. Verl. für Fachliteratur, Wien.
- Birk. Die neueren Standseilbahnen in Tirol. V.T.W. 1915. Nr. 30.
- Peter. Die Drahtseilbahn Treib—Seelisberg. Sch.B.Z. Bd. 69. Nr. 11.
- Cattani. Der Bergaufzug am Trümmelbachfall. Sch.B.Z. 1914.
- Strub. Die Vesuvbahn. Sch.B.Z. 1903. Bd. 41. Nr. 16.
- Schwarz. Die Virglbahn bei Bozen. Organ. 1908. H. 22. S.R.J. 1908. Bd. 31. Nr. 10.

Für diese gilt, soweit die elektrische Einrichtung in Betracht kommt, dasselbe wie für Zahnradbahnen. Ein Unterschied besteht nur insofern, als der Antriebsmotor ortsfest angeordnet wird, wobei das Drahtseil die Ortsveränderung der Fahrzeuge besorgt.

Der Antriebsmotor wird zumeist an das jeweils vorhandene Leitungsnetz angeschlossen, dessen Stromart, sowie die Stromlieferungsbedingungen bestimmen dann die Stromart des Windwerkmotors. Gleichstrom mit Pufferbatterie ist dann am Platze, wenn eine gleichmäßige Belastung des Werkes aus technischen Gründen (Spannungsschwankungen) oder kaufmännischen Motiven (Pauschalbezahlung der Spitzen) verlangt wird.

Der Zusammenhang zwischen elektrischer Betriebskraft und den bautechnischen Anlageverhältnissen ist ein noch tiefgreifenderer als bei Zahnbahnen. Durch den überwiegenden Anteil der Schwerkraft an der Zugsbewegung wird die Gestaltung des Höhenplanes zu einer mechanischen Aufgabe, neben welcher die an sich unbedeutende elektromotorische Einrichtung des Antriebes in den Hintergrund tritt. Im Gefolge des elektrischen Betriebes sind neue Oberbausysteme entstanden und wurden Anlagen von früher unmöglicher Länge ausführbar; es müssen daher zur vollen Erfassung der Tragweite des elektrischen Betriebes die bautechnischen Anlageverhältnisse eine eingehende Erörterung erfahren.

8. Schwebeseilbahnen.

Literatur:

- Buhle. Seilschwebebahnen für Personenbeförderung. D.B.Z. Nov. 1910.
 Buhle. Seilschwebebahnen für den Fernverkehr von Personen und Gütern. Z.V.D.I. 1913. S. 1783.
 Buhle. Kabelkrane und Luftseilbahnen. G.A. 1915. Nr. 905.
 Frank. Seilhängebahnen oder Seileisenbahnen. Z.O.I.A.V. 1912. Nr. 45.
 Mehrtens. Über die Erfindung und Entwicklung der Seilschwebebahnen. Der Eisenbau. 1914. H. 12.
 Sproecke. Personen-Luftseilbahnen, ihre Entwicklung und Ziele. Sch.E.T.Z. 1914. H. 20.
 Stephan. Die Drahtseilbahnen. Verl. Julius Springer. Berlin. 1921.
 Wettich. Zur Kritik über Konstruktion und Verhalten von Personenseilschwebebahnen. Die Förder-technik. 1914. H. 7.
 Wettich. Schwebebahnen oder feste Seilbahnen. Z.O.I.A.V. 1912. Nr. 39.
 Wintermeyer. Seilschwebebahnen (mit Antrieb) zur Personenbeförderung. E.K.B. 1913. H. 24.
 Le Vergenier. Schwebebahn von Mähl. G.C. 1914. Nr. 13. Organ. 1915.
 Zehnder-Spörry. Schwebebahnen oder feste Seilbahnen. Z.O.I.A.V. 1912. Nr. 23.
 Zezula. Drahtseilschwebebahnen. R.T.W. 1915. Nr. 3.
 Wettich. Personenschwebebahnen auf den Kohlernberg. D.B.Z. 1913. Nr. 24.
 Koncessionsbedingnisse für die Kleinbahn mit elektrischem Betriebe von Bozen nach Kohlern. D.K.B.Z. Sept. 1914.
 Soulavy. Die neue Personenschwebebahn auf den Kohlernberg bei Bozen. Z.O.I.A.V. 1913. Nr. 2.
 Schwebefähre in Bordeaux. Sch.B.Z. April 1919.
 Buhle. Seilschwebebahn von Chamonix auf die Aiguille du Midi, Montblanc-Gruppe. B.I.E.K.V. Bd. VIII.
 Fidaz-Alp Sura (Filmserstein) Seilschwebebahn. E.K.B. 1916. H. 14.
 Fühles. Die Schwebebahn Vigiljoch. Z.V.D.I. 1913. S. 729. E.K.B. 1910. H. 25.
 F.C.P. Seilschwebebahn über den Niagara. E.T.Z. 1917. H. 8. Z.V.D.I. 1916. Nr. 42. Eng. Juli 1916.
 Pietrkowski. Die Seilschwebebahn für Personenbeförderung in Rio de Janeiro. Z.V.D.I. 1913. S. 927.
 Espitallier. Le transbordeur funiculaire à voyageurs du Mont Ulia près de St. Sebastian. G.C. 1909. Nr. 1408.
 Der Wetterhornaufzug. E.K.B. 1909. H. 20. Sch.B.Z. Dez. 1908.

Für die elektrischen Einrichtungen gelten dieselben Gesichtspunkte wie für Standseilbahnen.

9. Gleislose Bahnen.

Literatur:

- Lombard-Gérin und Bonfiglietti's elektrische Selbstfahrer. E.T.Z. 1900. H. 18.
 Schiemann. Gleislose Motorbahnen mit elektrischem Oberleitungsbetrieb. E.T.Z. 1901. H. 47.
 Elektrisches Automobil mit Luftleitung. Trolley automoteur. Z.f.E. 1901. H. 10.
 Gleislose Bahnen der Braunschweigischen Maschinenbauanstalt. E.T.Z. 1902. H. 50.
 Schiemann. Wirtschaftlichkeit gleisloser Industriebahnen. E.T.Z. 1903. H. 50.
 Elektrischer Omnibusbetrieb. E.T.Z. 1903. H. 34.
 Przygode. Elektrische Omnibusbetriebe. Verl. S. Calvary. Berlin 1904.
 Schiemann. Gleislose elektrische Bahnen. E.T.Z. 1905. H. 27. 1903. H. 50.
 The trackless trolley. R.E. Okt. 1908.
 Elektrische Oberleitungsautomobillinien. Mitt. d.V. f. d. Förd. des Lokal- u. Str.B.-Wesens. 1909. H. 3.
 Eine Zusammenstellung der elektrischen Oberleitungsautomobillinien. E. u. M. 1909.
 The filovia trackless trolley in Italy. E.R.J. Sept. 1909.
 Gleislose elektrische Automobilbahnen. E.T.Z. 1909. H. 10.
 Elektrische Oberleitungsautomobillinien, System Mercedes-Electrique-Stoll. D.S.K.B.Z. 1909.
 Heller. Gleislose Bahnen. Z.V.D.I. 1910. Nr. 18.
 England. Die Wirtschaftlichkeit gleisloser Bahnen im Vergleich mit Straßenbahnen. Elektr. Juli 1910. E. u. M. 1910. H. 36.
 Ertel. Viermotorige elektrische Oberleitungsautomobilwagen System Mercedes-Stoll der Wiener städt. Straßenbahnen. E.K.B. 1910. H. 23.
 Maurer. Elektrische Automobilstrecken mit Oberleitung. Sch.B.Z. Nov. 1910.
 Stoll. Gleislose Bahnen. Zentralblatt f. Techn. Ind. 1910. Nr. 3.
 Schiemann. Die neuesten gleislosen elektrischen Personen- und Gütertransportmittel für Gleichstrom und Wechselstrom. E.T.Z. 1913. H. 17.
 Trackless trolleys in England. E.R.J. 1913. Bd. 42. Nr. 14.
 Kalbfuß. Die Altonaer Hafenschleppbahn. Wasser- und Wegebau-Zeitschrift 1913. Nr. 8.

- Nier. Gleislose elektrische Bahnen. Mitt.d.V.D.Str. u. Kl.B. Okt. 1913.
 Stockport Trolley Omnibus Service. E.R.J. 1913. Bd. 41. Nr. 18. L.R.T.J. 1914.
 Andrews. Motor Busses or Trackless Trolleys. G.E.R. Apr. 1920.
 Elektrische Automobilstrecke Fribourg-Posieux. Sch.B.Z. Febr. 1913.
 Schiemann. Die gleislosen elektrischen Bahnen. Selbstverlag, Dresden.
 Schneider. Gleislose Bahnen. Arch. f. Post u. Telegr. 1911. Nr. 20.
 Stobrawa. Gleislose elektrische Bahnen. Z.V.D.I. 1905.
 Przygode. Elektrische Oberleitungsbusse der A.E.G. E.B. 1904. H. 8.
 Die gleislose Bahn Berlin—Steglitz. E.T.Z. 1912. H. 25.
 Kindler. Elektrischer Omnibusbetrieb mit oberirdischer Stromzuführung in Bremen. E.T.Z. 1911. H. 8.
 Die elektrische Oberleitungsbahnlinie Heilbronn—Böckingen. E. u. M. 1911.
 Die elektrische Oberleitungsbahnlinie Klosterneuburg—Weidling. Allg. Automobil-Ztg. 1908. Nr. 22.
 Filovia Pirano—Portorose, Istrien. E. u. M. 1909.
 Kurz. Schienenlose Drehstrombahnen. Selbstverlag der „Autram“—Wien. 1921.
 Findeis. Elektrische Oberleitungs-Automobilinie Pötzleinsdorf-Salmannsdorf. E. u. M. 1921. H. 22.

An diese sind bei ihrem Auftauchen große Hoffnungen als Ersatz für Straßenbahnen geknüpft worden. Tatsächlich sind gleislose Bahnen in allen Ländern vereinzelt geblieben, weil dieses System insofern auf einem Trugschluß fußt, als der beabsichtigte Zweck, die kostspielige Gleisanlage zu ersparen, nur dann erreicht werden kann, wenn eine tragfähige Fahrbahn schon vorhanden ist. Durch den motorischen Antrieb und das unvermeidliche Gewicht der Fahrzeuge und die zumeist größere Fahrgeschwindigkeit — als bei Pferdefuhrwerken üblich — wird die Straßendecke in kurzer Zeit zerstört oder erfordert derartige Erhaltungskosten, daß die erzielbaren Einnahmen zu deren Deckung nicht ausreichen. Ein Großteil derartiger Bahnen mußte daher abgetragen werden. (Dresdner Heidebahn, Bielatalbahn bei Königstein in Sachsen, Tatrabahn in Oberungarn, Hermannstadt in Siebenbürgen, Preßburg—Eisenbrünnl, Berlin—Johannisthal u. a.)

Bei gleislosen Bahnen entfällt die Erdrückleitung; es ist daher eine doppelpolige Fahrleitung nötig, deren umständliche Bauart die anwendbare Arbeitsspannung auf etwa 500 bis 600 Volt beschränkt. Die Reichweite dieser Bahnen ist daher sehr gering bzw. verlangt schon bei verhältnismäßig kleinen Leistungen große Kupferquerschnitte.

Die durch den Krieg verursachten Schwierigkeiten der Benzinbeschaffung und der Mangel an animalischer Zugkraft ließen das Interesse für dieses Verkehrsmittel wieder in den Vordergrund treten.

C. Fahrzeuge mit eigener Kraftquelle.

10. Benzin- (Benzol, Rohöl) elektrische Fahrzeuge.

Literatur:

- Benzolelektrische Triebwagen. A.E.G. 1912.
 Benzolelektrische Lokomotive von 54 t Dienstgewicht. G.A. 1916. Nr. 886.
 Bieloy. Benzin-elektrischer Zug. System Frese. E.K.B. 1906. H. 9.
 De la Court. Verwendung von Verbrennungsmotoren für die Zugförderung. Rivista delle industrie ferroviare 1921. Nr. 1. Ref. E.R.B. 1921. H. 8.
 Diesel-Elektriska Vagn-Aktiebolaget. Diesel-elektr Motorwagen für Eisenbahnbetrieb. Druckschrift 23.
 Dodd. Self propelled railway passenger cars. G.E.R. 1914.
 Dodd & Arnold. Self propelled railway passenger cars. V. Ann. Conv. of the Int. Railw. Fuel Association 1913.
 Gas electric train for the Khedive of Egypt. E.R.J. Okt. 1913.
 Gas electric cars or locomotives. G.E.C.B. Okt. 1914.
 Gaselectric locomotives for Dan Patch-Line. E.R.J. Okt. 1915.
 Grempe. Benzol- und Schwerölmotoren im elektrischen Eisenbahnwesen. Helios. Sept. 1918. S. 285.
 Heller. Benzolelektrische Eisenbahn-Motorwagen. Z.V.D.I. 1912.
 Hubendick. Erfahrungen mit diesel-elektrischen Triebwagen in Schweden. G.C. 1920. Bd. 77. S. 305. Ref. E.T.Z. 1921. H. 1.
 Königshagen. 90 PS-Oltrriebwagen mit elektrischer Kraftübertragung. E.K.B. 1917. H. 16.
 Ostertag. Die erste Thermo-Lokomotive. B.d.I.E.V.V. 1913.
 Roland. Die benzolelektrischen Triebwagen der A.E.G. E.K.B. 1914. H. 15.

- Sarmezey. Motoros kocsik vasuti üzemben. Verl. Patria. Budapest 1904.
 Sarmezey. Dieselmotorok alkalmazása vasuti-üzemekben. Z.d.U.I.u.A.V. 1918.
 Schimanek und Nagel. Motorwagen oder Lokomotive. G.A. 1907.
 Valatin. Die Kohlenersparnis im Betriebe der Eisenbahnen Ungarns. E.K.B. 1918. H. 25.
 Wagenknecht. Triebwagen auf amerikanischen Eisenbahnen. E.K.B. 1914. H. 2.
 Waskowsky. Die neueren Heilmann-Lokomotiven. E.T.Z. 1898. H. 4.
 Wechmann. Neuere Benzolelektrische Triebwagen. E.K.B. 1912. H. 30.
 Weyand. Die Triebwagen im Dienst der preuß.-hess. Staatseisenbahnen. E.K.B. 1913. H. 13.
 Zeuner. Die dieselelektrischen Triebwagen für die sächs. Staatsbahnen. E.K.B. 1915. H. 26.
 Ziffer. De l'emploi des voitures automobiles et automotrices sur les lignes des chemin de fer.
 L'Ind. d. tramw. et ch. d. f. 1913. Int. Straßen- und Kleinbahn-Kongreß 1908 und 1912.
 Locomotive électrique. G.C. 1893. Nr. 556 u. 564.
 Turbinenlokomotive mit elektr. Arbeitsübertragung. Ref. E.T.Z. 1911. H. 1. Eng. 1910. S. 54
 S.A. Nov. 1910.
 Elektrische Zugförderung mit Diesellokomotiven. E.T.Z. 1920. H. 1.
 Ein britischer benzin-elektrischer Triebwagen. B.I.E.V.V. Bd. VIII.

Der Explosionsmotor und die Wärmekraftmaschine sind durch eine hohe Kraftausbeute des Brennstoffes gekennzeichnet. Diese Maschinen eignen sich jedoch zur direkten Zugförderung wegen ihrer mangelhaften Geschwindigkeitsregulierung und weil sie keine Anfahrtzugkraft haben nicht. Durch die Zwischenschaltung der elektrischen Kraftübertragung werden diese beiden Mängel mit großer Vollkommenheit behoben, so daß diese Art Fahrzeuge durch eine vorzügliche Zugkraft- bzw. Geschwindigkeitsregelung gekennzeichnet sind. Die Leistung der am Fahrzeug befindlichen Kraftanlage kann in sehr großen Geschwindigkeitsgrenzen voll ausgenützt werden. Alle diese Fahrzeuge sind aus naheliegenden Gründen für Gleichstrom eingerichtet und finden überall dort Verwendung, wo die Anlage der Fern- und Fahrleitung nicht rentabel ist. Als Lokomotiven können sie wirksam mit Dampflokomotiven in Wettbewerb treten, wenn es sich um Verschubdienst handelt. Die Leistungen sind beschränkt auf Benzinmotoren von 120 bis 200 PS.

Hinzugefügt sei, daß diese Antriebsart sich auch vorzüglich für den Schiffsantrieb eignet.

11. Speicher-Fahrzeuge.

Literatur:

- Anger. Das deutsche Eisenbahnwesen in der Baltischen Ausstellung. Malmö 1914. Z.V.D.I. 1915. Bd. 59. Nr. 37.
 Elektromotor-Triebwagen mit eigener Kraftquelle. Schw.B.Z. Sept. 1916.
 Akkumulatorenwagen auf schwed. und norweg. Staatsbahnen. E.K.B. 1916. H. 16.Z.V.D.E.V.1916. S.360.
 Triebwagenzug mit Edison-Akkumulatoren und Vielfachsteuerung. E.R.J. Sept. u. Okt. 1912.
 Bode. Akkumulatoren-Triebwagen. Z.V.D.E.V. 1914. Nr. 43.
 Borghaus. Die Einführung des Akkumulator-Triebwagenbetriebes auf den Strecken Mülheim-Ruhr usw. G.A. 1913. Nr. 868.
 Weyand. Die Triebwagen im Dienste der preuß.-hessischen Staatsbahnen. G.A. 1914. Nr. 896. E.K.B. 1904, H. 14. E.K.B. 1913, H. 13. Bd.I.E.K.V. 1913.
 Akkumulatorenwagen für das Kraftwerk Untra. E.K.B. 1915. H. 4.
 Büttner. Triebwagen für Vorortverkehr in Schweden. E.K.B. 1915. H. 4.
 Büttner. Die Verwendung des Akkumulators in der Verkehrstechnik. G.A. 1903. Nr. 624.
 Büttner. Über Akkumulator-Triebwagen für Eisenbahnen. E.K.B. 1910. H. 11.
 De la Court. Verwendung von Verbrennungsmotoren für die Zugförderung. Riv. d. Ind. Ferrov. 1921. H. 1. Ref. E.K.B. 1921. H. 8.
 Heumann. Leistungsgrößen der Akkumulator-Triebwagen der preuß. Staatsbahnverw. E.K.B. 1915. H. 21.
 A.E.G. Die Akkumulator-Doppelwagen der preuß. Staatsbahnen. 1908.
 Strauß. Die Akkumulatoren-Verschiebe-Lokomotive der Eisenbahn-Werkstätten-Inspektion in Tempelhof. E.T.Z. 1908. H. 26.
 A.E.G. Akkumulatoren-Doppelwagen mit Stromrückgewinnung der preuß. Staatseisenbahnverwaltung.
 Strasser. Über die Bestrebungen zur Gewichtsverminderung der Akkumulatoren. Z.O.I.A.V. 1916. H. 6.
 Keller. Rollmaterial der schweiz. Eisenbahnen in der schweiz. Landesausstellung in Bern 1914. Sch.B.Z. Juli 1915.

- Förderbetrieb mit führerlosen Akkumulatoren-Lokomotiven. Akk.Fabr.A.G.
 Gayer. Akkumulatorenbetrieb auf den bayr. Eisenbahnen. G.A. März 1901. Giesler. Z.V.D.E.V.
 Okt. 1907.
 Grempe. Neuere Akkumulator-Doppelwagen der preuß. Staatsbahnen. D.S.u.K.B.Z. 1917. Nr. 25.
 Guillery. Handbuch über Triebwagen für Eisenbahnen. Verl. Oldenbourg. 1919.
 Riep. Vollspurige Akkumulatoren-Lokomotiven im Verschiebedienst. E.K.B. 1912. H. 36.
 Studer. Akkumulatorenlokomotive des Schlachthofes der Stadt Zürich. Sch.B.Z. Juli 1910.
 B.B.C.M.B. Akkumulatorenfahrzeuge zur Verwendung in Fabriken. Mai 1918.
 Dreger. Eine elektrische Akkumulatoren-Lokomotive mit Edison-Akkumulatoren. E.T.Z. 1909.
 Rothpelz. Der Förderbetrieb bei Ausbau des zweiten Simplontunnels. Sch.B.Z. März 1918.
 Vallauri. Trazione elettrica con accumulatori. Elettrotecnica 1917. Nr. 30.
 Winkler. Achtachsige dreiteilige Akkumulatorentriebwagen der preuß. Staatsbahnen. V.T.W. Okt. 1917.
 Akkumulator-Tunneluntersuchungswagen der preuß. St.E.B.V. A.E.G.
 Akkumulator-Lokomotiven über und unter Tage. E.K.B. 1909. H. 14.
 Storage-battery-locomotive. E.W. Okt. 1917.
 Kleiner Akkumulatorwagen mit Spill für Rangierdienst. B.B.C.M.B. 1921. Nr. 5.
 Zugförderung mit Akkumulatoren in Italien. Riv. d. Ind. ferroviarie. 1921. Nr. 2. Ref. E.K.B. 1921. H. 8.
 Tracy. Calculating battery sices for locomotives. E.W. 1921. Bd. 77. Nr. 25.
 Klausner. Elektr. Speichertriebwagenzüge der österr. Bundesbahnen. E. u. M. 1921. H. 26.
 Wittfeld. Eisenbahnbetrieb mit Speicherfahrzeugen. V.T. 1921. Mai/Juni.

Der Sammlerbetrieb kommt dort in Betracht, wo einerseits verhältnismäßig billige Kraft zur Verfügung steht, andererseits die Anbringung der Fahrleitung aus technischen, finanziellen oder etwa Sicherheitsgründen untulich ist. Derartige Fälle liegen z. B. bei Nebenbahnlinien mit sehr schwachem Verkehr, ausgedehnten Bahnhof- oder Fabriksanlagen, schließlich Stollen mit sehr niedriger Deckenhöhe vor.

Voraussetzung für die befriedigende Arbeitsweise von Sammlerfahrzeugen ist, daß ein möglichst gleichmäßiger Betriebsplan zu bewältigen sei, so daß nach kurzer Betriebszeit die Grenze der Leistung festliegt und danach der Stundenplan für die Ladung und Entladung festgelegt werden kann. Mit Rücksicht auf das verhältnismäßig hohe Gewicht der Sammler kann diese Betriebsart auf Bahnen mit großen Steigungen keine Anwendung finden. Die jeweilig zu wählende Betriebsspannung wählt man — wenn gleichzeitig nicht auch Oberleitungsbetrieb in Betracht kommt und daher andere Momente für die Wahl der Spannung bestimmend sind — entsprechend der vom Gewichtsstandpunkt günstigsten Zellenzahl.

12. Umformerlokomotiven.

Die Tatsache, daß die für die Fernübertragung in einer einpoligen Fahrleitung geeigneten Stromarten sich für die Triebmaschinen nicht eignen, hat zum Bau von Umformerfahrzeugen geführt. Auf diesen wird nicht nur die Spannung, sondern auch die Stromart umgeformt. Diesbezügliche Versuchsausführungen liegen auf viele Jahre zurück und blieben hauptsächlich wegen der Umständlichkeit und dem hohen Gewicht der Einrichtungen ohne Erfolg. Die letztere Schwierigkeit wurde bei zwei amerikanischen Bahnen mit Lokomotiven ganz großer Leistung mit Erfolg bekämpft.

Die hier durchgeführte Aufzählung der vorkommenden Bahnarten eignet sich jedoch nicht zur technisch-wissenschaftlichen Behandlung der elektrischen Zugförderung, weil selbst die verkehrstechnisch extrem verschiedenen Bahnarten in bezug auf die physikalischen Grundlagen der elektrischen Einrichtung in der Hauptsache übereinstimmen. Es erweist sich daher zweckmäßig, den für die elektrische Kraftübertragung zum Zwecke der Zugförderung stets kennzeichnenden Vorgang, und zwar die Stromerzeugung, die Kraftübertragung und schließlich die elektromechanische Energieumformung, im Triebfahrzeug für alle Bahnarten in diesem Zusammenhange zunächst einheitlich zu behandeln und in zweiter Reihe auf die qualitativen und quantitativen Sonderfälle einzugehen.

Die Einteilung des Gegenstandes in diesem Werke fußt auf diesem Grundgedanken.

Zweiter Teil.

Stromerzeugung.

1. Technisch-wirtschaftliche Grundlagen.

Literatur:

- D'Aste. Traction électrique et traction à vapeur. L.E. 1914. Nr. 8.
- Bayrische Staatsbahnen. Denkschrift über die Einführung des elektrischen Betriebes auf den bayrischen Staatsbahnen. 1918. E.T.Z. 1910. E.u.M. 1914.
- Bearce. Kohlensparnis durch Elektrifizierung der Bahnen. G.E.R. Nov. 1917. Ref. E.u.M. 1918. H. 26.
- Der Schnellzugsverkehr mit elektrischen Lokomotiven. B.B.C.M.B. Juni 1917.
- Carlier. L'utilité économique de la traction électrique pour les chemins de fer Belges. L.E. 1914. Nr. 11.
- Dittes. Zur Frage der Energieversorgung elektrisch betriebener Vollbahnen. E.u.M. 1919. H. 29.
- Ellenbogen. Die Elektrifizierung der Eisenbahnen. Sozialdemokrat. Wochenschrift 1910.
- Ferstel. Die Vorbereitungen der Staatseisenbahnverwaltung für die Einführung des elektrischen Betriebes auf Hauptlinien. Z.O.I.A.V. 1918.
- Fränkel. Über die Wirtschaftlichkeit der elektrischen Vollbahnen. G.A. 1910. Nr. 784.
- Grünhut. Kohlensparmaßnahmen in der Elektrizitätswirtschaft. E.u.M. 1920. H. 11.
- Hruschka. Elektr. Zugförderung auf den großen Eisenbahnen. Der Entwurf für die Elektrifizierung der Hauptbahnstrecke Triest-Opcina. Sch.E.T.Z. 1910. H. 45.
- Huber-Stockar und Laternser. Die Elektrifizierung der New York-New Haven & Hartford Bahn. Sch.B.Z. Febr. 1916.
- Kliment. Gedanken über die Zukunft des Lokomotivbaues. B.I.E.B.K.V. 1912.
- Kliment. Die Dampfkraft und andere Energiequellen im zukünftigen Transportwesen. Z.O.I.A.V. 1912. Nr. 49. Bemerkungen hierzu. Brecht. E.K.B. 1912.
- Klingenberg. Neuere Gesichtspunkte für den Bau von Großkraftwerken. E.T.Z. 1920. H. 29. E.u.M. 1920. H. 30.
- Kummer. Die elektrische Dampfkesselheizung als Notbehelf für schweiz. Eisenbahnen und Dampfbetrieb. Sch.B.Z. Juli 1917. Thormann. Entgegnung hierauf. Ebendorf. Trautweiler. Dasselbe.
- Pförr. Der elektrische Vollbahnbetrieb. G.A. 1907. Nr. 718.
- Philipps. Wirtschaftlichkeit der Krafterzeugung bei der Interborough Rapid Transit Co. in New York. E.K.B. Mai 1919.
- Sächsische Staatsbahnen. Denkschrift über die Verwendung von Elektrizität zur Zugförderung 1913.
- Stauf. Kosten der Kilowattstunde im Dampfmaschinenbetriebe. Z.d.B.R.V. Januar 1918. Ref. E.u.M. 1918. H. 18.
- Steinmetz. Americas energy supply. Proc. Juni 1918.
- Usbeck. Die wirtschaftliche Bedeutung des elektrischen Hauptbahnbetriebes. E.T.Z. 1913. H. 34.
- Die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Betriebes von Vollbahnen. Z.D.I. Bd. 63. H. 14.
- Verebely. Die Elektrifizierung des Hauptnetzes der ung. Staatsbahnen im Hinblick auf die Kohlenwirtschaft. M.M.E.E.K. 1920. Bd. LIV. Nr. 13—16.
- Wyssling. Berichte der schweiz. Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb. H. 4. Rascher & Co. Zürich 1915.
- Die Wasserkräfte zur Elektrisierung der Orléansbahn. G.C. 1920. Bd. 77. S. 170. Ref. E.T.Z. 1920. H. 48.
- Die Stromerzeugung ist technisch die Quelle und wirtschaftlich die Grundlage der elektrischen Zugförderung. Eine Existenzberechtigung kann der elektrischen Zugkraft nur dann zuerkannt werden, wenn sie die gestellte Zugförderungsaufgabe in beiden oder zumindest in einer Richtung besser löst als die in Betracht kommenden anderen Bewegungsmittel, wie die animalische oder die Dampfzugkraft.
- Der hohe Wirkungsgrad der elektrischen Antriebsmaschine ist ebenso bekannt wie die Tatsache, daß technisch wirtschaftliche Mittel zur Verfügung stehen, um

die elektrische Arbeit zu verteilen und in beträchtliche Entfernungen zu übertragen. Da auch die Stromerzeuge selbst mit hohen Wirkungsgraden arbeiten, ist für die Wirtschaftlichkeit der elektrischen Zugförderung letzten Endes die primäre Kraftanlage ausschlaggebend.

Zur Krafterzeugung im großen kommen grundsätzlich zwei Arten von Kraftquellen in Betracht: Wasserkräfte und kalorische Anlagen.

Die wirtschaftliche Bedeutung der ersten tritt insbesondere unter den schwierigen Gewinnungsverhältnissen der Brennstoffe in den Vordergrund. Die Ausbeutung einer sonst brach liegenden Wasserkraft stellt ein neugeschaffenes produktives Kapital dar, indem mit Hilfe eines einmaligen Geld- und Arbeitsaufwandes eine neue dauernde Arbeitsquelle gewonnen wird. Die Wasserkraftanlagen sind weiter eine hochwertige Ausnützungsart der wasserhebenden Sonnenwärme, indem die Anlagen zur Wasserkraftgewinnung selbst mit hohen Wirkungsgraden arbeiten. Tatsächlich können von dem dem Wasser innenwohnenden Arbeitsvermögen etwa 50 bis 60 % am Radumfang nutzbar gemacht werden.

Zur Beurteilung der kalorischen Krafterzeugung ist es am Platze, sich zunächst über den Wirkungsgrad der beim Dampfbetrieb von Vollbahnlokomotiven üblichen direkten Krafterzeugung Rechenschaft zu geben.

Die elektrische Zugförderung kommt in erster Linie für Gebirgsbahnen in Betracht, weil bei diesen der vergleichsweise große Kraftbedarf die Verfeuerung großer Mengen Heizmaterials verlangt und hierdurch hohe Anforderungen an die physische Leistungsfähigkeit des Heizers bedingt sind. Dies vorausgesetzt, kann der Kohlenverbrauch für das Tonnenkilometer mit 0,08 kg Kohle angenommen werden.

Eine Normalkohle von 7000 Kalorien ins Auge fassend, entspricht obigem Kohlenverbrauch ein Arbeitsaufwand von $0,08 \cdot 7000 \cdot 425 = 238000 \text{ mkg} \approx 0,88 \text{ PSh}$.

Dem Tonnenkilometer entspricht bei 10 kg/t Zugswiderstand eine Leistung von

$$\frac{1 \cdot 10 \cdot 1000}{75 \cdot 3600} = 0,037 \text{ PSh},$$

d. h. der Wirkungsgrad beträgt nur

$$\frac{0,037}{0,880} = 4,20 \text{ %}.$$

Diesem durchschnittlichen Ergebnis steht das bei Versuchsfahrten erzielte Resultat gegenüber, daß von der in der Kohle aufgespeicherten Sonnenwärme höchstens 6 bis 7 % nutzbringend verwertet werden können.

Wenn man sich weiter vor Augen hält, daß für das Tonnenkilometer mit elektrischer Zugkraft unter sonst gleichen Verhältnissen etwa 40 Wattstunden verbraucht werden und die Erzeugung der Kilowattstunde etwa 1,0 kg Kohlen erfordert, so entspricht obiger Leistung ein Kohlenverbrauch von 0,04 kg, d. h. bei zentraler Krafterzeugung kann etwa die Hälfte der beim Dampfbetrieb aufzuwendenden Kohlen erspart werden. In Wirklichkeit wird die Ersparnis größer, weil der obige Vergleich insofern einseitig ist, als er den hohen Kohlenverbrauch für das Dampfthalten, für den Verschub und für die Zufuhr und Verteilung der Kohlen nicht berücksichtigt.

Daß aber insbesondere der letztangeführte Aufwand nicht unbeträchtlich ist, geht aus der Rechnung hervor. Für jede Tonne zugeführte Kohlen kann man für die Alpengebiete einen Transportweg von etwa 500 km rechnen. Über diese Strecke müssen beladen die $1\frac{1}{2}$ fache Bruttolast und zurück das der halben Nutzlast entsprechende Leergewicht des Wagens gefördert werden. Diese letztere Annahme muß gemacht werden, weil Massengüter wie Kohlen aus Verkehrsrücksichten nur in geschlossenen, für andere Zwecke nicht verwendbaren Zugseinheiten gefördert werden können; eine nutzbare Rückfracht demnach nicht in Betracht zu ziehen ist.

Jeder Tonne zugeführter Kohle entspricht demnach eine Verkehrsleistung von $(1,5 + 0,5) \cdot 500 = 1000$ Tonnenkilometer, d. h. ein Eigenverbrauch von $0,08 \cdot 1000 = 80$ kg Kohlen. Man muß also, um am Verbrauchsamt 1000 kg Kohlen zu erhalten, an der Grube 1080 d. s. um 8% mehr zum Versand bringen. Auf den Erzeugungsort umgerechnet, beträgt der Kohlenverbrauch unter den obigen Annahmen 0,0864 kg für das Bruttotkm. Für einen Vergleich mit einem an der Grube errichteten Kraftwerk auf gleicher Grundlage ist demnach die Berücksichtigung dieses Eigenverbrauches nötig.

Tatsächlich wurde für die preußischen Staatsbahnen ausgerechnet, daß die elektrische Zugförderung jährlich 5 Mill. Tonnen Kohlen erfordern würde gegenüber 13 Mill. Tonnen beim Betrieb mit Dampflokomotiven.

In einem Bericht von Huber-Stockar über erzielte Betriebsergebnisse finden sich nachstehende bemerkenswerte Angaben:

Bahnlinie	Kohlenverbrauch in kg/tonnenkm	
	in der Dampflokomotive:	im Kraftwerk bei elektr. Betrieb:
N. Y. N. H. & H. R. R. . . .	0,072	0,037
Rhätische Bahn	0,104	0,056
Gotthard- und Lötschbergbahn	0,085	0,047
Schweiz. B. B. Kreis I bis IV .	0,078	0,037

d. h. die Betriebsergebnisse dieser Bahnen beweisen die Richtigkeit des Satzes: 1 kg Kohle im Kraftwerk verbrannt, gibt eine doppelt so große Leistung am Zughaken als 1 kg Kohle in der Dampflokomotive verbrannt.

Den Wert dieses wirtschaftlichen Ergebnisses erhöht der weitere Umstand, daß in ortsfesten Kraftwerken minderwertige, nicht transportfähige Brennstoffe, wie Torf, Lignit, die in großen Mengen vom Dampfbetrieb als Abfall ausgeschiedene Rauchkastenlösche verheizt werden können, wogegen mit Dampflokomotiven hochwertige Leistungen nur mit Edelkohlen erreichbar sind. Wird in ortsfesten Anlagen die Kohle vergast, können wertvolle Nebenprodukte gewonnen werden.

In Kulturländern mit nennenswerter Industrie nehmen die Bahnen mit 30 bis 40% Anteil am gesamten Kohlenverbrauch. (Vereinigte Staaten, Nordamerika 35%, Österreich 30%.) Die Tragweite der Kohlenersparnis im Eisenbahnbetrieb liegt daher auf der Hand. Nicht minder fällt die Ersparnis an manueller Arbeitsleistung bei zentraler Verfeuerung der Kohlen ins Gewicht.

Die Bedeutung dieser Umstände verdoppelt sich durch Heranziehung von Wasserkräften zur Stromerzeugung.

Die wirtschaftliche Überlegenheit der Stromerzeugung mit Wasserkräften steht außer Zweifel und kann in Zukunft kaum nennenswert gesteigert werden.

Demgegenüber scheint die derzeitig gebräuchliche Art der kalorischen Stromerzeugung noch Entwicklungsmöglichkeiten zu bergen.

Die Chemiker streben dem idealen Ziel der unmittelbaren Erzeugung von Elektrizität aus Kohle zu.

Die Gasturbine wird vielleicht die Dampfturbine und Gasmaschine verdrängen, wenn nicht die hohe kalorische Ausbeute gebenden Maschinen des Dieselprinzips zu Großmaschinen entwickelt und wirksam in Wettbewerb treten werden.

Diese Betrachtungen beziehen sich auf die Zukunftsmöglichkeiten der technischen Lösungen für die Primärmaschine. Kummer hat dagegen gewissermaßen als Kriegsbefehl vorgeschlagen, die Dampfkessel der Lokomotiven bei reichlich verfügbaren Wasserkräften elektrisch zu heizen und zu diesem Behufe die Strecken mit Oberleitung auszurüsten. Es stellt sich jedoch heraus, daß durch diese Methode

nichts gespart werden kann, weil etwa der zehnfache Strombedarf für dieselbe Verkehrsleistung aufzuwenden ist, was auch bei der Anlage der Kraftwerke und Leitungen arge Erschwernisse bedeutet.

2. Art der Belastung.

Literatur:

Kummer. Über die Kraftwerkrausnützung beim zukünftigen elektrischen Betrieb der schweizerischen Eisenbahnen. Sch.B.Z. Febr. 1913.

Kummer. Neuere Studien über die Schwankungen des Kraftbedarfs der elektrischen Zugförderung. Sch.B.Z. Apr. 1916.

Singlephase power service. E.W. Nov. 1916.

Smith. Substations of the Chicago Milwaukee & St. Paul Ry. G.E.R. Nov. 1916.

Die Stromerzeugung für elektrische Bahnen unterscheidet sich von solchen für andere Zwecke zunächst dadurch, daß — abgesehen von großen Straßenbahnenetzen — das Kraftwerk von verhältnismäßig wenigen und im Verhältnis zur Leistung des Kraftwerkes großen Abnehmern beansprucht wird. Außerdem schwanken diese Belastungen kurzzeitig in den Grenzen von Null bis zum Höchstwert und kommen selbst Umkehrungen in die gegensätzliche Richtung vor. Nachdem der Eisenbahnverkehr stets unvermeidlichen Störungen und Unregelmäßigkeiten, deren Zeitpunkt, Dauer und Größe sich nicht vorraussagen läßt, unterworfen ist, läßt es sich auch nicht ausschließen, daß mehrere Höchstbelastungen zeitlich zusammenfallen.

Die zeitweilige Abstellung nicht benötigter Stromerzeuger zur Verbesserung der Wirtschaft kommt im Bahnbetriebe nach Abflauen derartiger Spitzen nur dann in Betracht, wenn der Verlauf der Spitzen einigermaßen bekannt ist und deren Zeitpunkt festliegt.

a) Verlauf der Leistungen in kWh bei einem Bahnkraftwerk.

b) Verlauf der Leistung bei einem allgemeinen Licht- und Kraftwerke mit gleicher täglicher kWh Abgabe und gleicher Höchstbelastung.

c) Summenlinie der vom Bahnkraftwerk in 24h abgegebenen kWh.

d) Summenlinie der vom allgemeinen Licht- und Kraftwerke in 24h abgegebenen kWh.

e) Summenlinie bei gleichmäßiger Energieabgabe.

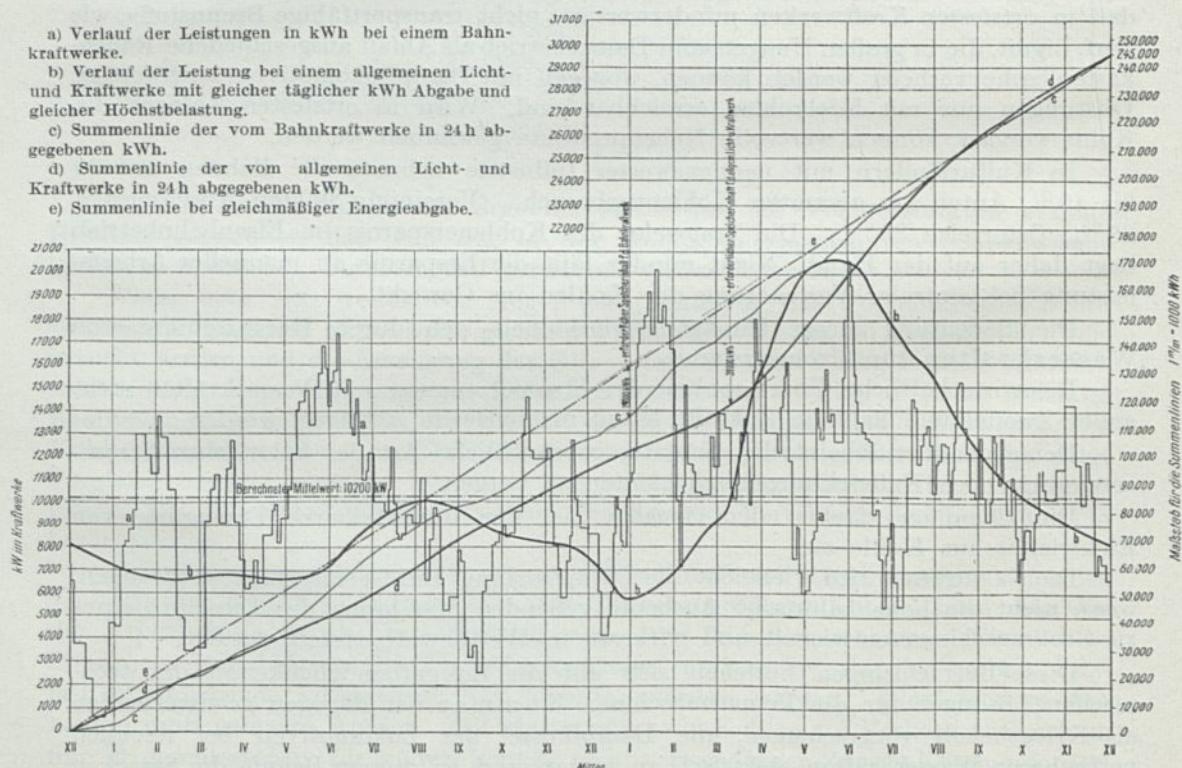


Abb. 1. Leistungsdiagramme. (Dittes.)

Auf diese Sachlage ist es zurückzuführen, wenn insbesondere früher den Bahnen ungünstigere Preisbedingungen für den Strombezug aus fremden Werken gestellt wurden als Licht- und Kraftkonsumenten. Eine genauere Untersuchung der einschlägigen Verhältnisse führt jedoch zum Ergebnis, daß anbelangend die Ausnützung der bereitzuhaltenden Leistungen zwischen diesen beiden Verbrauchern kein quantitativer Unterschied besteht.

Ein Blick auf die Energiediagramme eines Bahnbetriebes und einer Anlage für allgemeine Licht- und Kraftversorgung (Abb. 1) lehrt, daß ein Unterschied in der Zeitfolge und der Häufigkeit der Spitzenbelastungen besteht, indem im Bahnkraftwerk die abzugebende Leistung fortwährend zwischen Bruchteilen der Mittelleistung und dem mehrfachen Wert pendelt, wogegen bei Licht- und Kraftwerk die großen Veränderungen sich nur allmählich vollziehen. Im letzteren Falle kann eine entsprechende Anzahl Maschinen zeitweilig abgestellt werden, was beim Bahnkraftwerk nicht angeht. Der Unterschied drückt sich lediglich in einem etwas höheren Wirkungsgrad des Lichtkraftwerkes aus.

Kummer gibt für einige Kraftanlagen die Ausnützungsziffern an, aus denen die Bestätigung dieser Überlegung hervorgeht.

Bahn-Kraftwerk: Anlage:	Maschinen- leistung: KW	Ausnützungs- ziffer:
Simplon	1500	0,16
Veltlin	3150	0,22
Giovi	5000	0,14
Paris—Orleans	3000	0,27
Mailand—Varese	2250	0,32 ¹⁾
Berlin—Groß-Lichterfelde	1800	0,26
Long-Island Rd.	16500	0,16

Schweizerische Kraftwerke für Licht- und Kraftverteilung:	Maschinen- leistung:	Ausnützungs- ziffer:
Stadt Basel	5430	0,23
Stadt Bern	5100	0,25
Bodensee—Thurntal	3000	0,29
Lausanne	3385	0,24
Oerlikon	1050	0,23
Rathausen	6000	0,21
Solothurn	540	0,22
Kt. Schaffhausen	3000	0,15
Kt. Zürich	7225	0,27
Stadt Zürich	24300	0,11

3. Milderung der Spitzen. Wesentlich gemildert werden die Höchstwerte der Spitzen dadurch, daß die Fahrleitungs- und auch die Zentralenspannung selbsttätig bei Überlastung sinkt. Die für Bahnbetrieb bestimmten Dynamos müssen daher im Gegensatz zu Maschinen insbesondere für Beleuchtung und Motorbetrieb mit abfallender elastischer Charakteristik gebaut werden.

Eine abfallende, also unstarre Charakteristik verlangt aber auch ein anderer für Bahnbetrieb kennzeichnender Umstand. Im Bahnbetrieb sind Kurzschlüsse unvermeidlich.

4. Kurzschlüsse. Diese sind von besonders verheerender Wirkung, weil sie in Stromkreisen auftreten, deren Induktanz im Verhältnis zum Kraftwerk sehr klein ist. Kurzschlüsse werden in ihren Wirkungen zwar durch selbsttätige raschwir-

¹⁾ Akkumulierung vorhanden.

kende Schalter begrenzt, doch sind auch diese gefährdet und die Sicherheit ihrer Wirkungsweise zweifelhaft, wenn die der Kurzschlußstelle zufließende Energiemenge nicht dadurch begrenzt wird, daß die treibende Spannung mit zunehmender Stromstärke sinkt.

5. Mittel für ein elastisches Verhalten.

Literatur:

Münster. Zur Frage der selbstdämmenden umkehrbaren Batterie-Zusatzmaschinen. E.K.B. 1915. H. 15.
Schröder. Pufferversuche mit Pirani- und Lancashire-Maschinen. E.u.M. 1911. E.T.Z. 1912. E.K.B. 1912.

Schröder. Wechselstrompufferung. E.T.Z. Febr. 1915.

Weißbach. Die umkehrbare Batterie-Zusatz-Maschine Bauart Pirani der S.S.W. — E.K.B. 1908. H. 9.

In dem hier betrachteten Sinne sind für Bahnkraftwerke Vorkehrungen, welche die Spannung starr festhalten, geradezu betriebsgefährlich und schädlich.

Dagegen sind Schaltungsanordnungen, die dämpfend wirken und die magnetische Trägheit des Systems vermehren, erwünscht. Die direkte Speisung von der Dynamo in die Fahrleitung ist für alle Bahnbetriebe, für welche verhältnismäßig wenige und relativ große Einzelabnehmer in Betracht kommen, tunlichst zu vermeiden.

Tatsächlich findet man die direkte Speisung nur bei straßenbahnartigen Betrieben verwirklicht — also bei solchen Anlagen, bei welchen der Umstand nicht mehr zutrifft, daß die Zahl der Abnehmer relativ gering und ihre Leistung relativ zum Kraftwerk groß ist — dagegen bei Vollbahnen streng gemieden. Bei Gleichstrom-Hochspannungsbahnen läßt sich die direkte Speisung allerdings nicht vermeiden, weil wirtschaftlich arbeitende Dämpfungselemente nicht existieren.

Die mit 11000 Volt $25\sim$ Wechselstrom betriebene New York-New Haven-Hartfordbahn hatte ursprünglich die günstige Lage des Kraftwerkes dadurch voll auszunützen vermeint, daß die Generatoren direkt für die Spannung der Arbeitsleitung gebaut und letztere direkt angeschlossen wurde. Nach kurzem Betriebe hat sich herausgestellt, daß die magnetische Trägheit dieses Systems viel zu gering ist, infolgedessen sich alle Belastungsspitzen mit voller Schärfe ausprägen und Kurzschlüsse einen derartigen Umfang annehmen, daß kein Schalter standhält und Überspannungen dabei mit verheerender Wirkung auftreten.

Man hat sich dadurch geholfen, daß man 1:1 Transformatoren zwischenschaltete, die inzwischen dadurch besser verwertet wurden, als man mit ihrer Hilfe auf ein Dreileitersystem von 2×11000 übergehen und daher die Reichweite des vorhandenen Leitungssystems wesentlich ausdehnen, gleichzeitig auch durch Entlastung der Erdrückleitung die Beeinflussung der Schwachstromleitungen mildern konnte. (Abb. 2.)

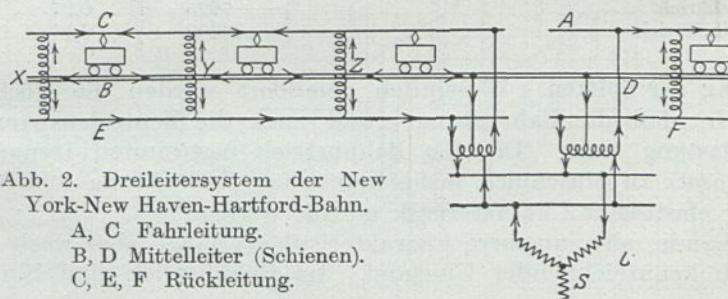


Abb. 2. Dreileitersystem der New York-New Haven-Hartford-Bahn.

A, C Fahrleitung.

B, D Mittelleiter (Schienen).

C, E, F Rückleitung.

Eine ähnliche Wirkung wie die direkte Speisung haben auch Anordnungen, welche die Festhaltung oder gar Erhöhung bei ansteigender Strombelastung bezeichnen. Erwähnung verdient die für andere Zwecke ganz vorzügliche Piranischaltung, die auch für Bahnkraftwerke verwendet wird. (Abb. 3.) Das Wesentliche

dieser Schaltung besteht dahin, daß eine Seriendynamo ihre Erregung vom Linienstrom erhält und die so erzeugte Spannung einer Pufferbatterie aufgedrückt wird. Strom-

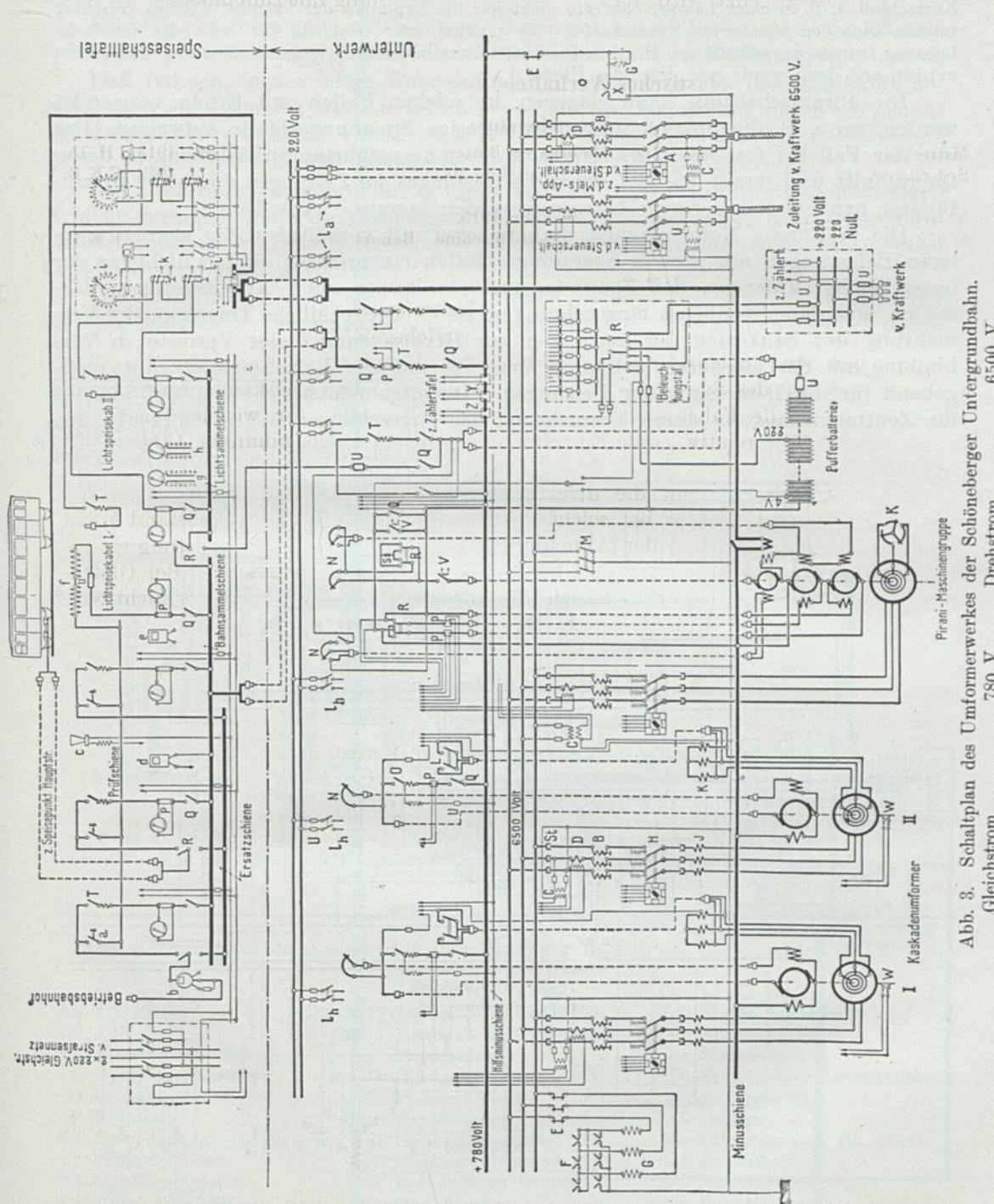


Abb. 3. Schaltplan des Umformerwerkes der Schöneberger Untergrundbahn.

stöße werden daher von der mit fester Spannung arbeitenden Dynamo ferngehalten und von der mit der Last wachsenden Batteriespannung übernommen.

Diese Schaltung steigert die Kurzschlußenergien.

In einem bestimmten Fall, einer Überlandbahn mit etwa 800 Volt-Betrieb zeigte sich als Folge, daß die für die Nebenstromkreise (Licht, Heizung, Bremse) der Fahrzeuge vorgesehenen Patronensicherungen, die für 1000 Volt Betriebsspannung gebaut waren, nicht standhielten. Jeder Kurzschluß, z. B. in einer Lampe, bewirkte nicht nur die Explosion der Patrone, sondern zerschlug zumeist auch den gußeisernen Schutzkasten. Es mußten sehr reichlich, für etwa die zehnfache Leistung bemessene, selbsttätige Höchststromschalter mit magnetischer Funkenlöschung angebracht werden, erst dann wurde man Herr des Übels.

Die Piranischaltung kann dagegen in solchen Fällen mit Erfolg verwendet werden, wo z. B. die Speiseleitungen unzulässige Spannungsabfälle aufweisen. Das war der Fall bei fast allen im Kriege in Eisen ausgeführten Speiseleitungen, deren Querschnitt und damit die Belastung des Gestänges der Leitungen durch die Pirani-Booster nennenswert geringer bemessen werden konnte. (Abb. 10)

Die praktische Notwendigkeit, Bahnanlagen mit verhältnismäßig kleinen mittleren Belastungen mit großen Spannungsabfällen einzurichten, ändert nichts an der feststehenden Tatsache, daß Spannungsverluste immer auch Arbeitsverluste darstellen und daher tunlichst einzuschränken sind. Die geldliche Tragweite der Vermehrung der Baukosten der Leitungen zur Herabsetzung dieser Verluste in Verbindung mit der hierdurch bedingten Vergrößerung der Belastungsspitzen ist maßgebend für die Bemessung der Leitungen. Im allgemeinen steht fest, daß je mehr die Zentralenbelastung durch Vermehrung der angeschlossenen Triebfahrzeuge den

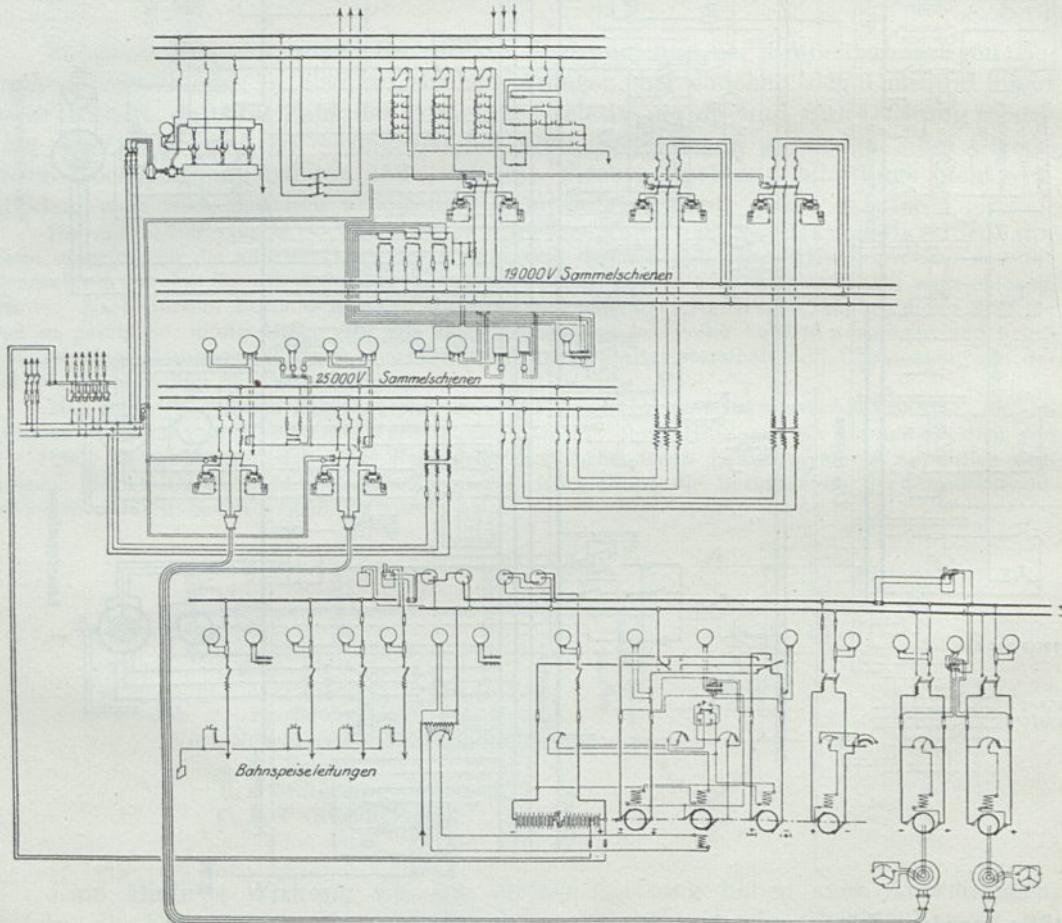


Abb. 4. Schaltplan eines Drehstrom-Gleichstrom-Unterwerkes mit Pirani-Pufferung.
Drehstrom 20000 V/Gleichstrom 800.

den Bahnbetrieben eigentümlichen schwankenden Charakter verliert, d. h. je gleichmäßiger die Belastung wird, desto kleinere Spannungsverluste zulässig und wirtschaftlich werden.

Genaue, allgemein gültige Zahlenwerte lassen sich bei der Vielartigkeit der Objekte nicht geben. Die Rechnung muß hierüber Hand in Hand mit der Erfahrung entscheiden.

Daß Bahnen, insbesondere Überlandbahnen unmittelbar an das Kraftwerk angeschlossen sind, kommt weitaus seltener vor als die Belieferung durch ein primär mit Drehstrom gespeistes Umformerwerk. Für diese Art der Stromversorgung sprechen auch die eingangs erwähnten Mängel der direkten Speisung.

Die Umformer verteuern durch ihren Leerlauf und die erforderliche Bedienung in nicht geringem Maße die Stromkosten einer Bahn, insbesondere beim Drehstrom-Gleichstrom-System. Die Bestrebungen zielen seit jeher darauf, in diesem Belange Verbesserungen herbeizuführen.

Die Einanker-Umformer sind in diesem Belange insbesondere in Amerika auf eine hohe Stufe der Entwicklung gebracht worden. Sie sind tatsächlich durch

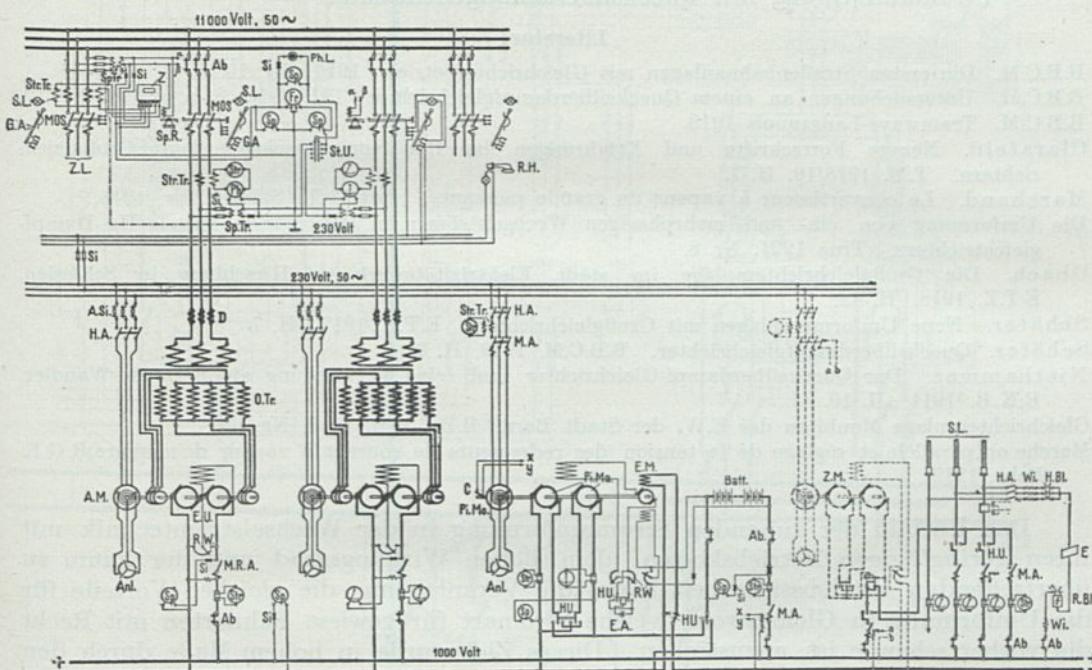


Abb. 5. Schaltplan des Unterwerkes Ramersdorf der Bahn Bonn—Königswinter. (S.S.W.)

Zeichenerklärung:

Ab Abschalter	MOS Maximal-Öl-Ausschalter	StU Stöpsel-Umschalter
Anl Anlasser	MRA Maximal- und Rückstrom-Ausschalter	Sp Spannungszeiger
ASi Abschaltbare Sicherung	OTr Öltransformator	Str Stromzeiger
C Centrifugalkontakt	Ph Phasenindikator	SpR Spannungsrückgangsrelais
D Drosselpule	PhL Phasenlampe	Wi Widerstand
E Erdplatte	RBI Relais-Blitzableiter	Z Zähler
EA Eisen-Aluminium-Zelle	RW Regulierwiderstand	ZL Zuleitung vom EL. Werk
Fr Frequenzmesser	RH Roland-Horn (Huppe)	AM Anwurfmotor
GA Gestänge-Antrieb	SL Signallampe	EU Einanker-Umformer
HA Hebel-Ausschalter	SpTr Spannungs-Transformator	PiMo Piranimotor
HU Hebel-Umschalter	StrTr Stromtransformator	PiMa Piranimaschine
HBl Hörner-Blitzableiter	Si Sicherung	EM Erregermaschine
MA Maximal-Ausschalter		Batt Batterie
		ZM Zusatzmaschine

einen hohen Wirkungsgrad gekennzeichnet. Ihre Verwendung beschränkt sich jedoch auf Mittelspannungsanlagen (750 bis 800 Volt max.).

In vereinzelten Fällen sind Einanker-Umformer auch für Spannungen bis 1100 Volt gebaut worden, doch haben diese Maschinen zwei voneinander getrennte Ankerwicklungen und zwei Kollektoren, die hintereinander geschaltet sind (Abb. 5).

Am europäischen Kontinent zieht man vielfach Motorgeneratoren vor, weil letztere einfacher in Betrieb zu setzen, konstruktiv den Einschränkungen durch die Periodenzahl nicht unterworfen sind und der Gleichstromkreis in keiner Weise mit dem Wechselstrom verkettet ist, daher Störungen nicht übergreifen können. Im allgemeinen darf behauptet werden, daß sich Einanker-Umformer für Großanlagen mit kalorischer Stromerzeugung, wo also der Kilowattstunden-Verbrauch von Belang ist, eignen, für kleinere Anlagen bis zu einigen hundert Kilowatt im Anschluß an hydraulische Werke mit anders gearteter Strompreisbestimmung Motorgeneratoren vorzuziehen sind.

6. Stromumformung mit Quecksilberdampfgleichrichter.

Literatur:

- B.B.C.M. Die ersten Straßenbahnanlagen mit Gleichrichterbetrieb. 1916. Nr. 10.
- B.B.C.M. Untersuchungen an einem Quecksilberdampfgleichrichter. 1918. Nr. 8 u. 1919. Nr. 10.
- B.B.C.M. Tramways-Lausannois 1918.
- Clarafeld. Neuere Fortschritte und Erfahrungen im Bau von Quecksilberdampf-Großgleichrichtern. T.M. 1918/19. H. 7.
- Marchand. Le convertisseur à vapeur de grande puissance. Rev.Techn.Suisse. Nov. 1916.
- Die Umformung von ein- und mehrphasigen Wechselströmen in Gleichstrom mittels Hg.-Dampfgleichrichters. Trua 1921. Nr. 8.
- Obach. Die Großgleichrichteranlage im städt. Elektrizitätswerk zu Hirschberg in Schlesien. E.T.Z. 1918. H. 42.
- Schäfer. Neue Umformeranlagen mit Großgleichrichtern. E.T.Z. 1917. H. 7.
- Schäfer. Quecksilberdampfgleichrichter. B.B.C.M. 1919. H. 3.
- Niethammer. Der Quecksilberdampf-Gleichrichter und seine Verwendung als Perioden-Wandler. E.K.B. 1911. H. 10.
- Gleichrichteranlage Monbijou des E.W. der Stadt Bern. B.B.C.M.B. 1919. Nr. 10.
- Marche en parallèle et réglage de la tension des redresseurs de courant à vapeur de mercure. R.G.E. Febr. 1919.

Das Vorbild der ruhenden Stromumformung in der Wechselstromtechnik mit ihren geringfügigen Betriebskosten, dem hohen Wirkungsgrad und der kaum zu übertreffenden Betriebssicherheit bildet die Veranlassung, die gleichen Vorteile für die Umformung in Gleichstrom, welche Stromart für gewisse Bahnarten mit Recht die vorherrschende ist, anzustreben. Dieses Ziel wurde in hohem Maße durch den Quecksilberdampf-Gleichrichter erreicht, welcher zurzeit bereits in Einheiten von bis etwa 300 Kilowatt für Gleichstromspannungen bis 800 Volt betriebssicher gebaut wird.

Der Wattstundenwirkungsgrad des Gleichrichters erreicht im Betrieb 90 %, der Wirkungsgrad der umgeformten Leistung bis 93 % und ist von der Belastung wenig abhängig.

Sofern fließendes Wasser zur Kühlung der Zylinder verfügbar ist, erfordert der Gleichrichter keine bewegten Maschinenteile. Da weiters Gewicht und Raumbedarf wesentlich geringer sind wie z. B. für Motorgeneratoren gleicher Leistung, weiters der Parallelbetrieb mehrerer Einheiten untereinander als auch mit elektromagnetischen Maschinen sich als betriebssicher erwiesen hat, ist diese Umformerart für die Stromlieferung von Nebenbahnen mit einem Kraftbedarf in der genannten Größenordnung tatsächlich eine hochwertige Lösung.

Die Schaltung einer derartigen Anlage veranschaulicht Abb. 6.

Der umgeformte Strom ist ein pulsierender Gleichstrom, was bei der Stromwendung der Motoren in Erscheinung tritt und auch zu Telephonstörungen Anlaß geben kann. Aus diesen Gründen ist primär ein sechphasiger Anschluß vorzusehen und sind sekundär Dämpfungsdrosselpulen anzugeben.

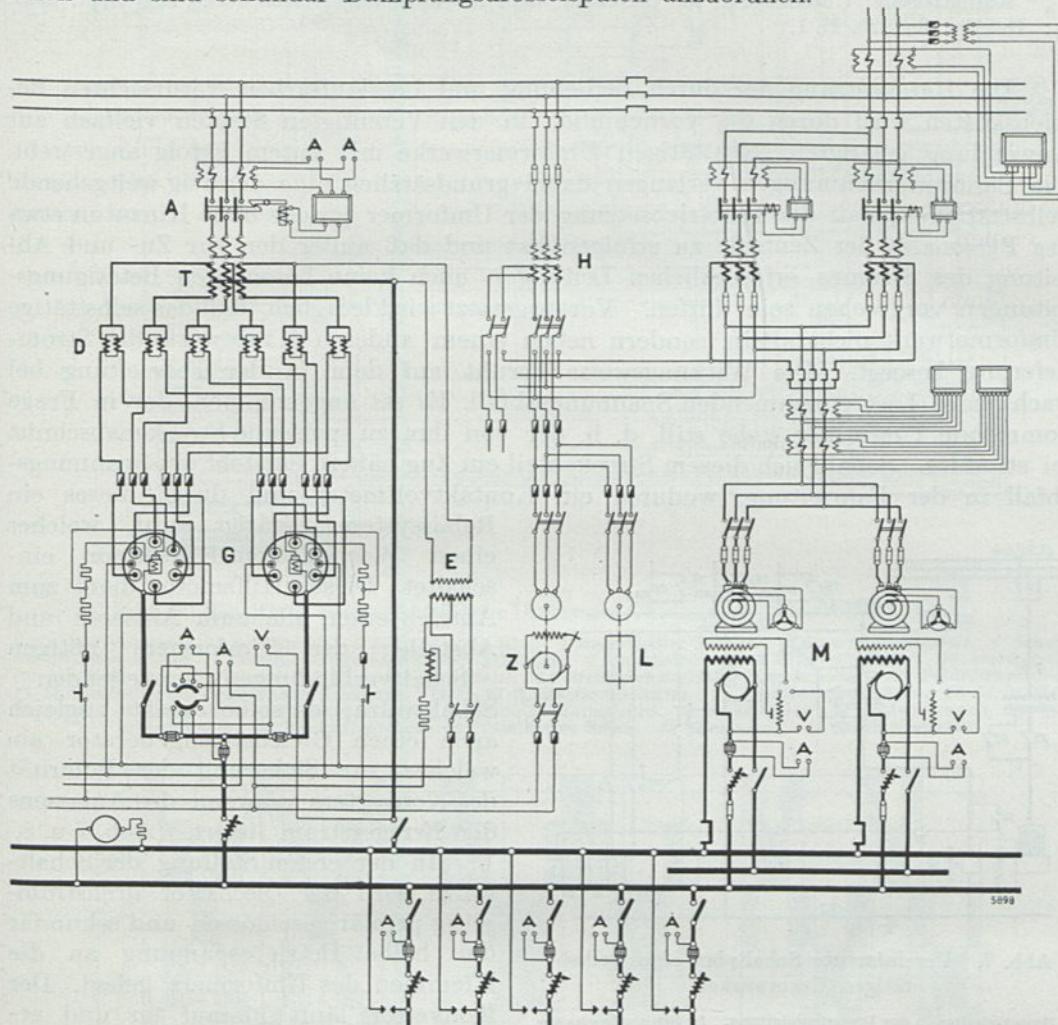


Abb. 6. Schaltplan des Unterwerkes der Limmattal-Straßenbahn. Quecksilber-Dampfgleichrichter. Drehstrom 6000—530/600 V. Gleichstrom (B.B.C.).

Zeichen erklärung.

A Maximalautomat.	E Erregertransformator.	L Luftpumpe.	(V) Voltmeter.
(A) Amperemeter.	G Gleichrichter.	M Motorgenerator.	Z Zünddynamo.
D Drosselpulen.	H Hilfstransformator.	T Haupttransformator.	

7. Selbsttätige Umformerwerke.

Literatur:

- Allen u. Taylor. Automatically controlled substations. E.R.J. 1915. Bd. 4. Nr. 12 und Proc. 1915. Nr. 9.
 Davis. Give the operator a job. G.E.R. 1916. H. 11.
 Davis Automatic railway substation. G.E.R. 1915. H. 12 und 1921. H. 7.
 Evans. Automatic substation, Sacramento Northern Railroad. G.E.R. 1920. Nr. 11.
 Jones. Results of automatic substation operation on the Chicago, North Shore and Milwaukee Railroad. G.E.R. 1921. Nr. 7.
 Johnson. A brief review of automatic substation experience on the Aurora, Elgin and Chicago R.R. P.E.R. 1921. Nr. 7.
 Nash. A year of the automatic substation at Butte E.R.J. 1919. Ref. E.U.M. 1920. H. 1.
 Schmidlin. Automatische Umformerstationen. B.B.C.M.B. 1920. H. 8. Sch.B.Z. 1921. Bd. 7. Nr. 7.

Summerhayes. Automatic substations. G.E.R. 1913. H. 9.

Wensley. Adapting automatic control to motor started converter. E.R.J. 1919. Bd. 53. Nr. 20.

* * Selbstt ige Unterwerke amerikanischer Straßen- und 脰berlandbahnen. E.T. Sept. 1920. — Ref.E.K.B. 1921. H. 1. — E.T.Z. 1921. H. 14.

* * * Automatische Unterstation in Cleveland der Westinghouse Gesellschaft. E.T. Sept. 1920.
Ref.E.u.M. 1920. H. 1.

Die Herabsetzung der durch Bedienung und Leerlaufarbeit verursachten Betriebskosten wird durch die vornehmlich in den Vereinigten Staaten vielfach zur Anwendung gelangten selbsttätigen Umformerwerke mit gutem Erfolg angestrebt. Die Bahnunternehmungen verlangen dabei grundsätzlich eine derartig weitgehende Selbsttätigkeit, daß die Inbetriebsetzung der Umformer jeweils ohne Hinzutun etwa des Personales der Zentrale zu erfolgen hat und daß außer den zur Zu- und Ableitung des Stromes erforderlichen Leitungen auch keine besonderen Betätigungsleitungen vorgesehen sein dürfen. Vorausgesetzt wird lediglich, daß das selbsttätige Umformerwerk nicht allein, sondern neben einem anderen Hauptwerk die Stromlieferung besorgt. Die Wirkungsweise beruht auf dem in der Fahrleitung bei wachsender Last zunehmenden Spannungsabfall. Es sei angenommen, der in Frage kommende Umformer stehe still, d. h. der von ihm zu speisende Streckenabschnitt sei stromlos. Sobald sich diesem Streckenteil ein Zug nähert, entsteht ein Spannungsabfall in der Fahrleitung, wodurch ein Kontaktvoltmeter und durch dieses ein

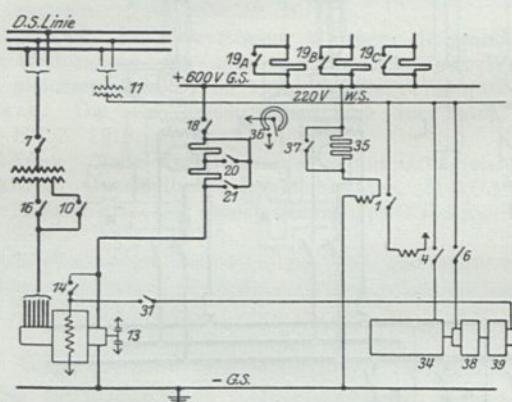


Abb. 7. Vereinfachter Schaltplan eines selbsttätigen Unterwerkes.

7 Hauptschalter in der Drehstromleitung. 10 Sekundärschalter. 16 Anlaßschalter für halbe Spannung. 14 Schalter für den Erregerstrom. 13 Fliehkraftschalter zur Behinderung des Durchgehens. 11 Transformator für die Nebenbetriebe. 18, 20, 21 Linsenschalter. 19A, 19B, 19C Widerstände und Schalter zur Strombegrenzung. 4 Steuerstromschalter. 6 Schalter für den Steuermotor. 38, 39 Erregermaschine. 34 Schaltwalze. 36 Polarisches Relais.

eigenen Kollektor gelegt, worauf der Konverter die normale Betriebsspannung an seinen Klemmen erzeugt, nachdem derselbe gleichzeitig auch drehstromseitig auf die volle Spannung geschaltet worden ist. Der nächste Schritt ist die Einschaltung der Linie unter Zwischenschaltung eines zweistufigen Schutzwiderstandes, der in den nächsten zwei Schaltstufen kurzgeschlossen wird.

Tritt eine nicht bedeutende Überlast ein, schaltet sich in die betreffende Speiseleitung der Schutzwiderstand vor, steigt die Überlast weiter, wird die Überbrückung der einen Stufe des dem Konverter vorgeschalteten Widerstandes gelöst, schließlich derselbe in Gänze eingeschaltet. Setzt der Strombezug aus, tritt das Kontaktvoltmeter in umgekehrtem Sinn in Wirkung, löst alle Schaltungen und setzt den Um-

Relaisystem betätigt wird, welches einen Wechselstrom-Hilfsmotor einschaltet. Dieser Hilfsmotor dient zum Antrieb einer alle zum Anlassen und Abstellen des Umformers nötigen Schaltverbindungen herstellenden Schaltwalze; derselbe treibt zugleich auch einen Gleichstromgenerator an, welcher zur Sicherung der Polarität des Konverters während des Anlassens den Erregerstrom liefert. (Abb. 7 u. 8.)

In der ersten Stellung der Schaltwalze wird der Ölschalter drehstromseitig primär geschlossen und sekundär die halbe Betriebsspannung an die Klemmen des Umformers gelegt. Der Konverter läuft hierauf an und erreicht in rund 30 s die synchrone Geschwindigkeit. Hierauf wird der Umformer durch die Hilfsmaschine erregt. In der folgenden Walzenstellung wird das Feld des Konverters an den

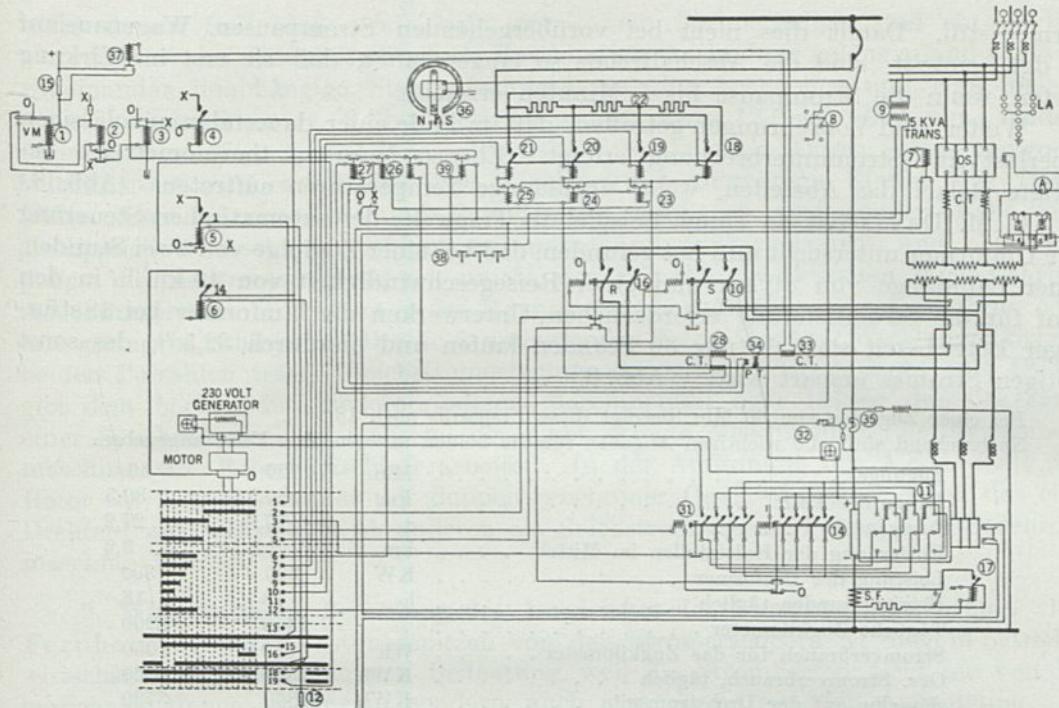
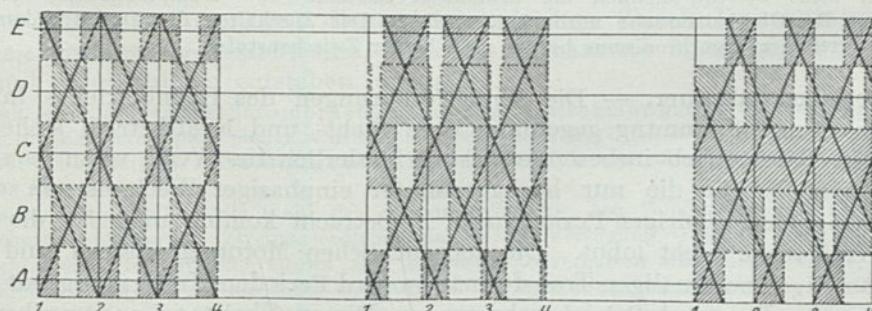
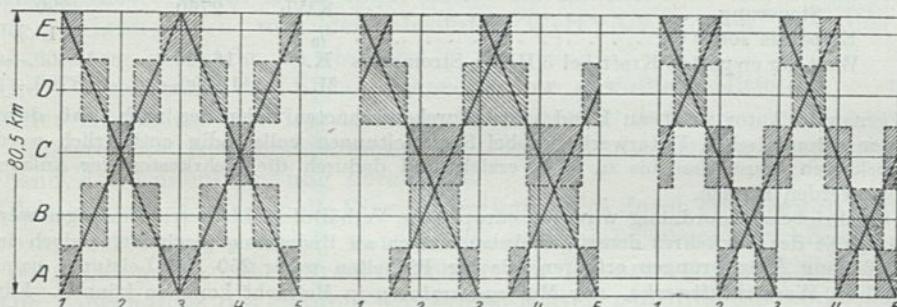


Abb. 8. Schaltbild eines selbsttätigen Drehstrom-Gleichstrom-Unterwerkes. (G.E.C.)

1 Kontakt-Voltmeter. 2 Schaltrelais. 3 Zeitrelais ($2\frac{1}{2}$ Min.). 4 Magnetischer Schalter. 5 Steuerstromschalter. 6 Schalter für den Steuermotor. 7 Oelschalter mit magnetischer Auslösung. 8 Umschalter. 9 5KH-Transformator. 10 Anlaßschalter für den Umformer. 11 Converter. 12 3000 Ω -Widerstand. 14 Erregerschalter. 16 Hauptschalter. 17 Feldnebenschließer. 18 Linienschalter mit magnetischer Auslösung. 19, 20, 21 Höchststromschalter. 22 Vorschaltwiderstände. 23, 24, 25 Strombegrenzer. 26 Zeitrelais für Überlastung. 33, 28, 29 Stromtransformatoren. 31 Feldschalter. 32 Feldwiderstand. 34 Spannungswandler. 35 Rückstromrelais. 36 Polarisiertes Relais. 39 Thermostatarelais.

Abb. 9. Bildfahrpläne zur Darstellung der Arbeitszeiten selbsttätiger Unterwerke.
Oben: Zugsfolge 2^h. Unten: Zugsfolge 1^h. A, B, C, D, E Lage der Unterwerke.

former still. Damit dies nicht bei vorübergehenden Strompausen, Wagenauslauf u. dgl., eintritt, sind die Abschaltrelais so eingeschaltet, daß sie erst in Wirkung treten, wenn die Strompause bis 5 Minuten erreicht.

Weiter sind Vorkehrungen getroffen, daß im Falle einer dauernden unzulässigen Überlast eine Stromunterbrechung erfolgt. Ebenso besorgen thermometrisch betätigte Relais das Abstellen, wenn unzulässige Temperaturen auftreten. (Abb. 8.)

C. M. Davis hat an einem Beispiel die Tragweite der automatischen Steuerung der Umformer untersucht und hat gefunden, daß bei einer Zugfolge von zwei Stunden, einer Bahnlänge von 80 km und einer Reisegeschwindigkeit von 40 km/h in den fünf für die Stromlieferung erforderlichen Unterwerken die Umformer bei 18stündiger Betriebszeit statt 90 nur 30 Stunden laufen und hierdurch 32,5 % des sonst nötigen Stromes erspart wird. (Abb. 9.)

Bei einer Zugfolge von 60 Min. beträgt diese Ersparnis noch 13,3 %.

Nachstehend sind alle wichtigen Angaben für die beiden untersuchten Fälle angegeben.

Zugfolge	Min.	120	60
Länge der Bahn	km	80,5	80,5
Zugsgewicht	t	27,2	27,2
Entfernung der Haltestellen im Mittel	km	3,2	3,2
Leistung der Umformer	KW	300	300
Betriebsstunden täglich	h	18	18
Tägliche Zugkilometer		1450	2900
Stromverbrauch für das Zugkilometer	Wh	1050	1050
Ges. Stromverbrauch, täglich	KWh	1530	3060
dasselbe auf der Drehstromseite	KWh	1860	3720
Gesamte Laufzeit der Umformer in 5 Unter- werken	h	90	90
Hier von Stillstand	h	60	38
Leerlauf des Unterwerkes	h	15	15
Arbeitersparnis, täglich bei autom. Betrieb . .	KWh	900	570
Im Jahr	KWh	328500	208000
Ges. Stromverbrauch, täglich ohne autom. Steuerung	KWh	2760	4290
Ersparnis somit	%	32,5	13,3
Wert der ersparten Kraft bei 5 Heller Strompreis	K.	16420.—	10400.—
	M.	13700.—	8700.—

Der genannte Autor weist an Hand eines durchgerechneten Beispieles nach, daß durch Vermeidung der automatischen Unterwerke, wobei Speiseleitungen vollständig entbehrlich werden, in den Betriebskosten Ersparnisse bis zu 52 % erzielt und dadurch die Mehrkosten der Anlage reichlich verzinzt werden können.

Die beschriebene Anordnung wird für europäische Verhältnisse kleineren Umfangs wegen der Unregelmäßigkeit des Verkehrs derartiger Anlagen noch an Bedeutung gewinnen, jedoch insoweit in der Ausführung Abänderungen erfahren, als für Einheiten unter 250 KW-Leistung, namentlich im Anschluß an Wasserkraftwerke, nur Motorgeneratoren in Betracht kommen können. Für diese vereinfacht sich das ganze Schaltsystem nicht un wesentlich, weil u. a. besondere Vorkehrungen gegen das Umpolarisieren nicht zu treffen sind. Da die Gefahr des Durchgehens bei Motorgeneratoren nicht besteht, können die erwähnten Zuschalt- bzw. Dämpfungswiderstände zum Anlassen von der Gleichstromseite mitbenutzt werden. Das Zuschalten des Drehstromkurzschlußmotors bei erreichtem Synchronismus bedarf auch keiner Zwischenstufen.

8. Periodenumformer. — Die Sonderforderungen des Bahnbetriebes in bezug auf Stromart und Spannung gegenüber dem Licht- und Kraftbetrieb stehen dem elektrischen Bahnbetrieb insbesondere dann hinderlich im Wege, wenn es sich um Betriebe handelt, für die nur hochgespannter einphasiger Wechselstrom der für Bahnen geeigneten niedrigen Periodenzahl in Betracht kommt, und sich die Anlage eigener Kraftwerke nicht lohnt. Die gebräuchlichen Motorgeneratoren sind wegen der meist nötigen zweimaligen Transformation und Perioden-Umformung mit Motorgeneratoren im Bau und Betrieb sehr teuer. Diesen Übelstand zu umgehen, versucht eine Einanker-Maschine der Bergmannwerke und der A.E.G., deren Wirkungs-

weise darauf fußt, daß zwei Drehfelder — ein hochperiodiges und ein niederperiodiges — im Eisenkörper einer Maschine zur Ausbildung gelangen und auf zwei voneinander unabhängige Statorwicklungen — eine hochpolige und eine niederpole — einwirken (z. B. hochperiodig $\nu = 50$, $2p = 12$ Pole, 500 U.p.m., niederperiodig $\nu = 16\frac{2}{3}$, $2p = 4$ Pole, gleichfalls 500 U.p.m.). Durch eine geeignete Wicklungsart wird erzielt, daß jede Wicklung nur unter dem Einfluß des Drehfeldes ihrer eigenen Pol- und Periodenzahl steht (im vorliegenden Falle eine zwölfpolige Wechselstromwicklung mit unverkürztem Wickelschritt und eine vierpolige Wechselstromwicklung mit um $\frac{1}{3}$ der Polteilung verkürztem Wickelschritt). Als induzierender Teil dient in der Bergmannschen Ausführung ein synchron oder mit geringem Schlupf im Drehfeld umlaufender Rotor, der zwei Wicklungen für die beiden Polzahlen trägt; Gleichstromerregung der einen oder anderen oder beider gibt dem hoch- oder niederperiodigen Maschinenteil oder beiden den Charakter einer Synchronmaschine, während der nicht erregte Maschinenteil als Asynchronmaschine mit Rotorkurzschluß arbeitet. In der Anordnung der A.E.G. läuft der Rotor als Asynchronanker mit doppelt-synchroner Geschwindigkeit gegen das eine Drehfeld um, während er im anderen als gleichstromerregtes Polrad einer Synchronmaschine arbeitet.

9. Wirtschaftliche Bedeutung des Ausgleiches der Belastung. Pufferung. Die Fernhaltung der Belastungsspitzen von den Stromerzeugern ist auch in betriebswirtschaftlicher Beziehung von Bedeutung, weil die Stromkosten nicht nur von der bezogenen Menge abhängen, sondern auch von dem Grad der Ausnützung. Je höher die Spitzen relativ zur Mittellast sind, je mehr Kraft der Stromlieferant bereitstellen muß, ohne sie voll ausnützen zu können, um so höher der Einheitspreis.

Bei Gleichstrombetrieb kann die wesentliche Milderung der kurzzeitigen Spitzenbelastung der Stromerzeuger durch Pufferbatterien mit Erfolg erzielt werden; die Pufferwirkung ist ohne besondere Hilfsmittel meist unzureichend. Zur Erreichung dieses Ziels ist es nicht nötig, die Elastizität des Stromerzeugungssystems preiszugeben und den absoluten Wert der Spitzen, wie dies bei der Piranischaltung geschieht, zu steigern.

Die Überwälzung der Spitzen jenseits der gewollten Mittellast — möglichst gleich der Höchstlast der Dynamo — kann besser dadurch erzielt werden, daß man, anstatt die Speicherspannung zu steigern, die Dynamospannung entsprechend der Linienbelastung herabsetzt.

Ohne besondere maschinelle Einrichtung kann dies durch eine Gegenkompondwicklung der Dynamo erzielt werden, die vom Linienstrom durchflossen (Abb. 10) wird oder indem man die Pirani-Maschine der Dynamo gegenschaltet.

Die Anwendung des ersten wirksamen Mittels ist durch die modernen Wendepolmaschinen möglich geworden, deren Ankerrückwirkung vollständig aufgehoben ist, diese daher eine verhältnismäßig große Feldschwächung unbedenklich vertragen.

Bei Wechselstromanlagen dienen dem gleichen Zweck Drosselpulen, die, wenn sie eisenfrei hergestellt sind, auch das wirksamste Mittel gegen Stromwellen, die durch Kurzschlüsse entstehen, darstellen.

Daß ein elastisches Stromerzeugungs- bzw. Umformungssystem — denn alles, was hier für die Krafterzeugung gesagt wurde, gilt ebenso auch für Unterwerke — einem starren System selbst auf Kosten des Wirkungsgrades wirtschaftlich weit überlegen sein kann, lehrt ein typisches Beispiel.

Es handelte sich um die Wahl des Stromsystems für den Windwerksmotor einer Seilbahn (Hungerburg—Innsbruck). Zweiphasenstrom stand zur Verfügung. Da für eine Seilbahn eine Nebenschlußcharakteristik, also ein an sich starres Motorverhalten wünschenswert ist, war gegen einen direkten Anschluß an das Netz und Aufstellung eines Induktionsmotors mit Anlaßanker nichts einzuwenden. Um an Anlagekosten zu sparen, wurde diese an sich technisch einfachste, billigste und den höchsten Wirkungsgrad aufweisende Lösung gewählt.

Indessen war diese Wahl verfehlt, weil der Stromlieferant, der mit Wasserkraft arbeitet, vorweg die Stromverrechnung nach verbrauchten KWh ablehnte und auf die Pauschalbezahlung der überhaupt auftretenden Höchstleistung für das ganze Jahr bestand.

Da der Mittelwert einen kleinen Bruchteil der Höchstlast erreichte, konnte trotz Verschlechterung des Wirkungsgrades der Anschlußwert der Bahn dadurch ganz wesentlich herabgesetzt werden, daß man einen Drehstrom-Gleichstrom-Umformer parallel zu einer Pufferbatterie vorsah und den Windwerkmotor durch einen Gleichstrommotor ersetzte. Trotz des nachträglichen Umbaus machten sich die aufgewendeten Kosten gut bezahlt.

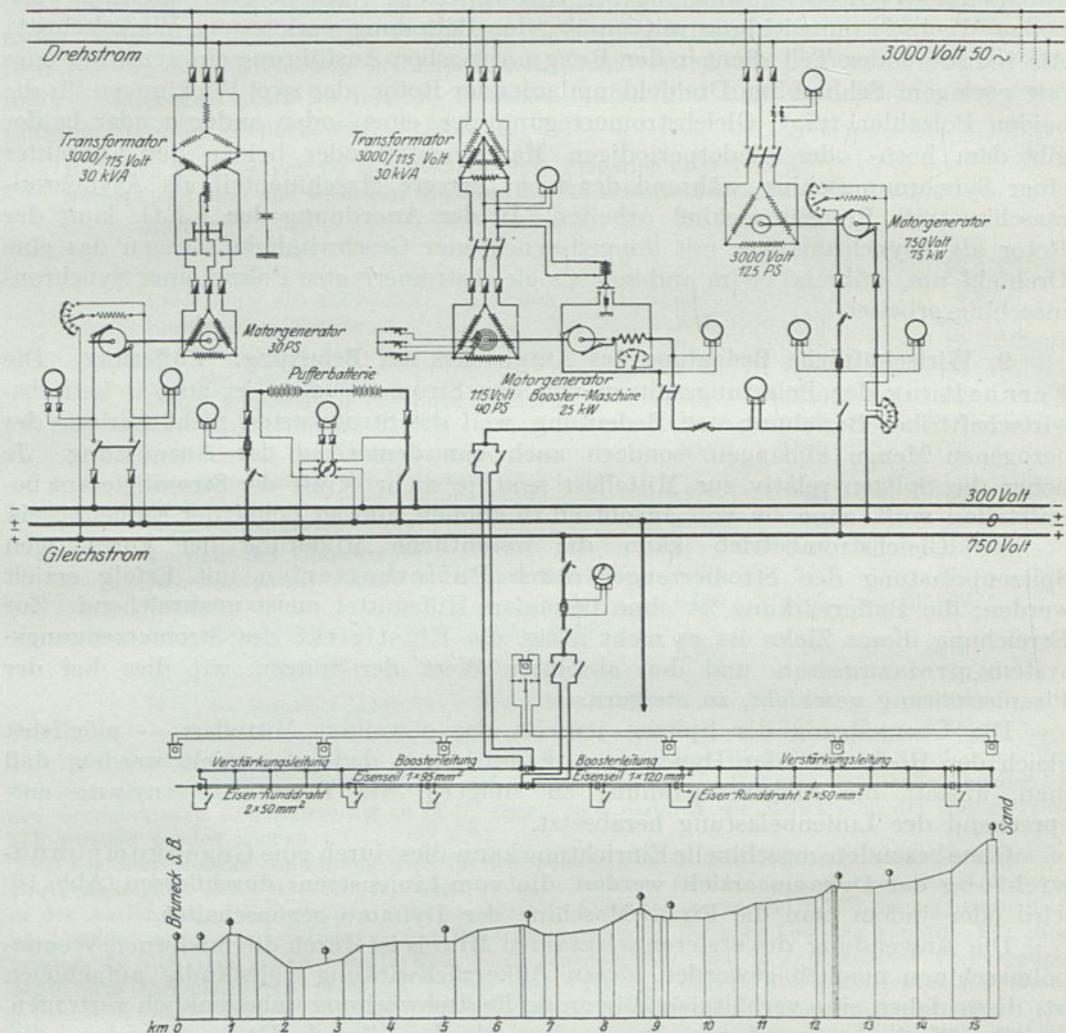


Abb. 10. Schalt- und Stromverteilungsplan eines Drehstrom-Gleichstrom 750 V-Unterwerkes mit Kurzschlußmotor. (A.E.G.U.)

Große Schwungmassen können bei entsprechender Herabsetzung der Drehzahl auch zur Lieferung der Spitzenbelastungen herangezogen werden.

Es sind auch Versuchsausführungen zu verzeichnen, die mit besonderen Schwungradumformern in Verbindung mit Sammlerbatterien dieses Ziel zu erreichen suchen. Die Anordnungen werden aber reichlich umständlich und wegen des hohen Eigenverbrauches auch meist kaum wirtschaftlich. (Mont Cenis, Wiesentalbahn, Albtalbahn.)

Außer für den Ausgleich der kurzzeitigen Spitzenbelastungen ist bei Bahnbetrieb auch für die über das Mittel auftretenden stunden-, tag- oder saisonweisen Belastungen Vorsorge zu treffen.

Bei Dampfanlagen ist die Lösung der Frage verhältnismäßig einfach, es ist nur nötig, die überhaupt vorhandene Maschinenleistung entsprechend abzustufen und in ihrer Gesamtheit so zu bemessen, daß auch die Höchstbeanspruchung sicher geliefert werden kann.

Eingehende Erwägungen sind dagegen bei Wasserkraftanlagen nötig, wobei man sich nicht auf die Bemessung der Turbinen und Stromerzeuger beschränken darf, vielmehr muß die Wasserwirtschaft mit dem Energiebedarf in volle Übereinstimmung gebracht werden.

Die überhaupt abfließende Wassermenge muß den Stromverbrauch decken können. Je nach Art der Wasserkraft und des Jahresverlaufes des Strombedarfes werden bei der Wasserfassung Speicher mit einem Fassungsvermögen für die Dauer des unzureichenden Wasserzuflusses nötig. Außerdem sind entsprechende Wasserbehälter in der Nähe des Kraftwerkes vorzusehen, um die kurzzeitigen Spitzen decken zu können. Alles das muß in Einklang mit der je nach Art der Gewässer wechselnden Wasserführung gebracht werden.

10. Resonanzerscheinungen, verursacht durch die Antriebsmaschinen. Die Eigentümlichkeit der Belastung der Bahnkraftwerke verlangt eine besonders sorgfältige Dämpfung der Steuerorgane der Antriebsmaschine wie Wasser- und Dampfturbinen, die zurzeit wohl ausschließlich in Betracht kommen. Resonanzerscheinungen bei plötzlichen Entlastungen, namentlich nach Kurzschlüssen, gehören zu den gefürchteten Vorkommnissen, weil sie nicht zu selten zu Rohrbrüchen infolge unzulässiger Drucksteigerungen und dgl. führen. Es sind daher Regulatoren, die eine gewisse Tourenänderung nach oben und nach unten zulassen, aber keine Schwankungen oder Pendelerscheinungen herbeiführen können, erwünscht.

11. Schaltungsregeln. Die Schaltung eines Bahnkraftwerkes muß selbst auf Kosten einer gewissen, meist nur theoretischen Vollkommenheit die größte Einfachheit, Klarheit und Übersichtlichkeit aufweisen. (Abb. 11, 12.)

Gemessen soll nur das werden, was unbedingt nötig ist, und zwar in demjenigen Stromkreis, wo für den betreffenden Apparat die größte Betriebssicherheit zu erwarten ist. Man muß sich immer vor Augen halten, daß die sich ungemein rasch abspielenden Vorgänge, insbesondere bei Störungen, zu einer ruhigen Überlegung gar nicht Zeit lassen, daß vielmehr alle Maßregeln vom Personal ungesäumt geradezu instinktiv getroffen werden müssen. Das ist nur bei einer einfachen Anlage erreichbar. (Abb. 12.)

Bei Gleichstromanlagen messe man Strom und Spannung — ersteren für jede Maschine — außerdem den Gesamtstrom und die Belastung der einzelnen Linien.

Ein, höchstens zwei umschaltbare Spannungsmesser genügen für diesen Zweck, Leistungszeiger sind überflüssig, dagegen sind Wh-Zähler je nach der Sachlage für die Gesamterzeugung und die einzelnen Linien wertvoll, selbsttätige Höchstromausschalter für jeden Stromzweig genügen, Sicherungen sind selbst für Mittelspannungen als unzuverlässig erkannt und daher gemieden; dagegen ist es zweckmäßig, in jedem Zweig Trennschalter, die nur bei stromlosem Zustand betätigt werden, vorzusehen, um bei Instandhaltungsarbeiten gegen eine zufällige Einschaltung des betreffenden Zweiges gesichert zu sein.

Der als notwendig erkannte Grundsatz der Einfachheit der Schaltung führt bei Wechselstromanlagen dazu, Dynamo und zugehörigen Transformator als eine Maschineneinheit zu betrachten; man schaltet daher mit der Oberspannungsseite des Transformators das ganze Aggregat ab. (Abb. 12.)

Es wird billiger und betriebssicherer, wenn die Belastung des Aggregates nur in der Niederspannung gemessen wird, die Voltmeter dagegen eine Skala entsprechend der Oberspannung erhalten.

Für den Fall eines Defektes des Transformators einer Gruppe und der Dynamo einer anderen Gruppe trifft man am besten dadurch Vorsorge, daß man die Transformatoren leicht transportabel einrichtet, den defekten entfernt und den Ersatz an dessen Stelle setzt. Einfache Trennmesser genügen für diesen Zweck vollständig und wird die Schaltanlage auf diese Art viel einfacher und billiger, als wenn man daselbe durch Ringleitungen und Umschalter erzielen will.

Die Vereinfachung darf jedoch nirgends so weit getrieben werden, daß darunter die Sicherheit des Betriebes leidet; daher sind z. B. Linienschalter der Fernleitungen, die besonders hohen Anforderungen zu genügen haben, tunlichst doppelt vorzusehen. Hierbei ist der Grundsatz vor Augen zu halten, daß der Reserveschalter auch ohne eingeschaltet zu sein, stets unter Spannung zu stehen hat, denn nur so ist die Sicherheit gegeben, daß er im Bedarfsfall tatsächlich diensttauglich ist.

KW-Zeiger sind auch hier überflüssig, wenn auch das Produkt von Strom und Spannung nicht die Leistung gibt, so genügt doch die Kenntnis der Strombelastung allein, die die Erwärmung der Maschine bestimmt.

Im Verfolg dieser Grundsätze unterläßt man auch bei Motorgeneratoren den zugeführten Strom zu messen.

Handelt es sich um Drehstrom-Gleichstrom-Umformer, wird man in vielen Fällen den Induktionsmotor dem Synchronmotor vorziehen, weil ersterer eine viel einfachere Inbetriebsetzung bei hohem Wirkungsgrad im Betrieb ermöglicht, unbedingt stabil ist und in dieser Beziehung durch unsachgemäße Bedienung nichts verfehlt werden kann.

In zahlreichen Betrieben hat sich für diese Zwecke der Induktionsmotor mit Kurzschlußanker vorzüglich bewährt. Das Anlassen erfolgt von der Gleichstromseite von der meist vorhandenen Pufferbatterie und wird bei erreichter Synchrondrehzahl der Motor ohne weiteres an die zugeführte Spannung geschaltet. Auf der Drehstromseite reduziert sich die ganze Schalteinrichtung auf einen einzigen Schalter und das Linienvoltmeter (Abb. 10). Diese Umformerart eignet sich besonders auch für selbsttätige Umformerwerke.

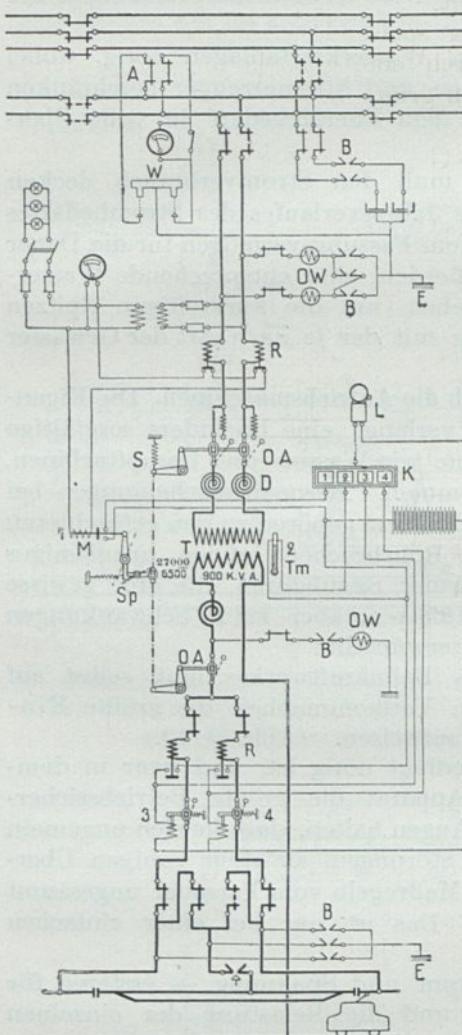


Abb. 11. Schaltbild eines Umformerwerkes der Mariazellerbahn. 11000/6000 V. 25 ~. (O.S.S.W.)

T	Transformator	B	Blitzableiter
D	Drosselspule	OW	Ölwidderstand
OA	Ölausschalter	W	Wasserstrahler
R	Zeitrelais	T _m	Thermometer
S	Spannwerk	K	Klappenschrank
Sp	Sperrung	L	Läutewerk
M	Elektromagnet	E	Erde
A	Abschalter		

Motor ohne weiteres an die zugeführte Spannung geschaltet. Auf der Drehstromseite reduziert sich die ganze Schalteinrichtung auf einen einzigen Schalter und das Linienvoltmeter (Abb. 10). Diese Umformerart eignet sich besonders auch für selbsttätige Umformerwerke.

12. Schutzeinrichtungen. Schutzeinrichtungen gegen Überlast, Überspannung, Überstrom und atmosphärische Entladung sind selbstverständlich in demselben Maße und Umfang vorzusehen, wie sie sich bei Kraftwerken für andere Zwecke bewährt haben und üblich sind. Dabei ist stets der besondere vehemente Charakter der Stromwellen bei Gleichstrom und bei Wechselstrom niedrige Periodenzahlen und deren enorme mechanische Wirkung zu beachten.

13. Einpolige Erdung. Der die Fahrleitung speisende Stromkreis des Kraft- oder Umformerwerkes von Bahnanlagen ist durch eine Eigentümlichkeit gekennzeichnet, die bei anderen Stromerzeugungsanlagen grundsätzlich streng gemieden ist.

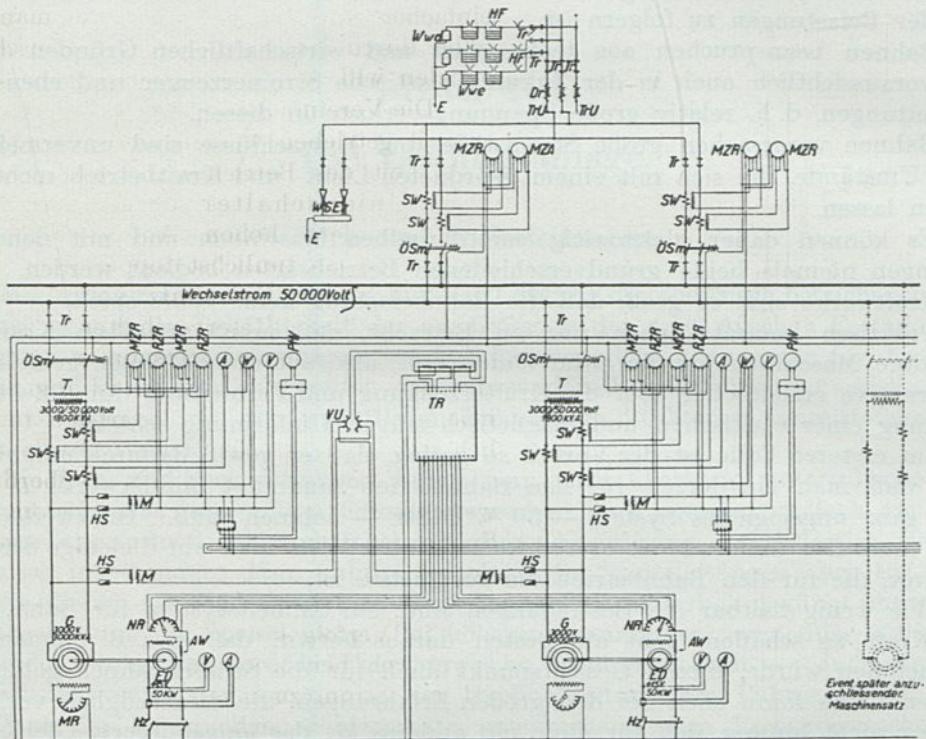


Abb. 12. Schaltplan eines Bahnkraftwerkes für einphasigen Wechselstrom. Maschinenspannung 3000 Volt. Spannung der Fernleitung 50000 Volt (Tirill-Regler, A.E.G.U.).

G Generator	NR Nebenschluß-Regler	W Leistungszeiger
ED Erreger-Dynamo	MR Magnet-Regler	PhV Phasen-Spannungszeiger
T Transfator	AW Ausgleichs-Widerstand	HS Hochspannungs-Sicherung
OSm Ölschalter mit magnet. Auslösung	SW Stromwandler	Dr Drosselspule
TrU Einpoliger Trennschalter	M Meßtransformator	HF Hörnerfunkenableiter
VU Spannungszeiger-Umschalter	MZR Maximal-Zeitrelais	Wwe Einpoliger Wasserwiderstand
Hz Zwei poliger Hebeleinschalter	RZR Rückstrom-Zeitrelais	Wwd Dreipoliger Wasserwiderstand
TR Tirill-Regler	A Stromzeiger	WSEz Zweipoliger Wasserstrahler
	V Spannungszeiger	E Erde

Bahnbetriebe verzichten mit verschwindender Ausnahme auf die Erde bzw. die Schienenrückleitung. Nachdem solcherart der eine Pol der Stromerzeugungsanlage stets das Nullpotential aufweist, ist es zwecklos und im allgemeinen unzulässig, in diesem Pol irgendwelche Schalter oder Schutzvorrichtungen anzubringen.

Der Stromkreis der Fahrleitung für Bahnen ist daher im Gegensatz zu allen anderen Kraftbetrieben bei Gleich- und Wechselstrom durch einpolige Schaltung gekennzeichnet. Im Erdpol sieht man lediglich einen Trennschalter vor, um im Bedarfsfalle die Maschine mit einem konstruktiv hergestellten Behelf abtrennen zu können.

14. Strombezug aus bahnfremden Werken. Die für Bahnbetriebe geeigneten und üblichen Stromarten sind im allgemeinen grundsätzlich verschieden von denjenigen, die sich für Licht- und Kraftbetriebe oder Elektrochemie eignen. Nachdem jedoch Bestrebungen einen wünschenswerten Idealzustand darin sehen, mit einer Stromart für alle Zwecke auszukommen, und zwar mit $50 \sim$ Wechsel- bzw. Drehstrom, ist man insbesondere anlässlich der Frage der Vollbahnelektrifizierung dagegen aufgetreten, daß die Bahnen ihre bisherige Sonderstellung in bezug auf die gebräuchlichen Stromsysteme beibehalten.

Derartige Bestrebungen versprechen kaum Erfolg, wie aus dem dargelegten grundsätzlich und notwendigerweise verschiedenen Charakter der Stromerzeugung und der Belastungen zu folgern ist.

Bahnen beanspruchen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen derzeit und voraussichtlich auch in der Zukunft elastische Stromerzeuger und ebensolche Fernleitungen, d. h. relativ große Spannungsverluste in diesen.

Bahnen verursachen große Stromstöße und Kurzschlüsse sind unvermeidlich. Alles Umstände, die sich mit einem geordneten Licht- und Kraftbetrieb nicht vereinigen lassen.

Es können daher gleichzeitig von denselben Maschinen und mit denselben Leitungen niemals beide grundverschiedenen Betriebsarten bedient werden, außer die Kraftwerke sind so groß, daß die Bahnbelastung keine Rolle spielt.

Praktisch kommt daher nur in Betracht, daß man im selben Kraftwerk besondere Maschinen für die Bahn laufen läßt, also auf diesem Wege gemeinsame Kraftreserve erzielt oder aber die Krafterzeugung und Fernleitung durch Zwischen schaltung einer elastischen und magnetisch tragen Umformung schützt.

Im ersten Falle ist der Vorteil so gering, daß er gewiß dadurch aufgewogen wird, daß man ein derzeit für den Bahnbetrieb zumindest minderwertiges, wenn nicht ganz ungeeignetes System — $50 \sim$ W.Str. — nehmen muß. Im zweiten Fall, wenn man also umformt, ist es selbstverständlich, daß man auf diejenige Stromart umformt, die für den Bahnbetrieb die geeignetste ist.

Wie wenig haltbar die Bestrebungen sind, ein Einheitssystem für Bahn, Licht und Kraft zu schaffen, geht am besten daraus hervor, daß es z. B. niemand auf sich nehmen würde, diesen Gesichtspunkt auch für die Straßenbahnen geltend zu machen. Man kann eben bei den großen Erfahrungen, die diesbezüglich vorliegen, darüber nicht hinweg, daß für diese ein anderes als das eingebürgerte Gleichstrom 550 bis 750 Volt-System bei strenger Trennung von jedem anderen Verbraucher nicht in Frage kommen kann.

Dritter Teil.

Die Leitungsanlage.

Fern- und Speiseleitungen.

Mit Zunahme der Ausdehnung und der Leistung der elektrisch betriebenen Bahn-anlagen genügt die Leitfähigkeit der aus Gründen der mechanischen Festigkeit mit bestimmten Querschnitten ausgelegten Fahrleitung allein nicht mehr für die Strom-zufuhr und Verteilung. Es werden daher besondere Fernleitungen notwendig, deren Bau und Betrieb mit der eigentlichen Bahnanlage in keinem unmittelbaren Zusammenhang stehen.

Die Fern- und Speiseleitungen, sofern man nicht überhaupt unterirdische Kabel vorzieht oder aus bestimmten Gründen vorsehen muß, werden vielfach am Bahngestänge angeordnet. Wirtschaftlich ist diese Ausführung gerechtfertigt, betriebs-technisch insbesondere dann unbequem, wenn die Speiseleitungen auch für andere Zwecke dienen als die Fahrleitung. Jede Instandhaltungsarbeit bedingt unter einem die Abschaltung der Speiseleitung. Bei höheren Spannungen, etwa über 20000 Volt, schwindet — insbesondere bei kurvenreichen Gebirgsstrecken — auch der wirtschaftliche Vorteil der Anordnung der Hochvoltleitung am Bahngestänge, indem die Zahl der kostspieligen Stützpunkte entsprechend dem Richtungswechsel der Bahntrace viel höher wird, als wenn die Leitung freizügig geradlinig mit wirtschaftlichen Mastenentfernungen von 150 bis 200 m gebaut wird. Außerdem wird die Beanspruchung der Maste, namentlich in Kurven auch wesentlich größer. Eine getrennte Leitungsführung ist daher stets in ernste Erwägung zu ziehen.

Die für Bahnbetriebe bestimmten Fern- und Speiseleitungen sind in bezug auf die Auslegung in elektrotechnischer Richtung insofern eigenartig zu behandeln, als diese auch zu den zur Milderung der Wirkung der Stromstöße dienenden Einrich-tungen gehören, daher in bezug auf die Stromspitzen viel größere Spannungs-verluste zugelassen werden, als in irgendeinem anderen Gebiet der elektrischen Kraftübertragung. In bezug auf die Stromspitzen werden Spannungsabfälle bis äußerst 30 bis 35% noch wirtschaftlich, indem die Leitungsanlage mit den Spitzen-leistungen nur während eines verschwindenden Teiles der Betriebszeit beansprucht wird. Es wird daher den Anforderungen der Wirtschaftlichkeit am besten ent-sprochen, wenn in bezug auf die mittlere Leistung mit geringen Spannungsverlusten 5 bis 10% gerechnet wird.

Im übrigen werden alle den Leitungsbau betreffenden Fragen im Abschnitt über die Fahrleitungen Erörterung finden.

Die Arbeitsleitung (Fahrleitung).

A. Theorie und Berechnung.

I. Elektrische Eigenschaften; Festwerte; Berechnung der Leitungsanlage.

Literatur:

- Behn Eschenburg. Spannungsabfall von Wechselströmen in Eisenbahnschienen. E.T.Z. 1904. H. 16.
 Bisacre. Berechnung von Spannungsabfällen und Energieverlusten bei Gleichstrombahnen. El. Bd. 84. 1920. S. 188. Ref.E.T.Z. 1920. H. 50.
- Boucherot. Abaque pour faciliter le calcul des courants alternatifs au moyen de la methode de M. Boucherot. R.G.E. Juni 1918. S. 821.
- Breitfeld. Strom- und Feldverdrängung in runden Leitern. E.u.M. H. 48. 1920.
- Breitfeld. Berechnung von Wechselstromfernleitungen. Verlag Vieweg. Braunschweig 1912.
- Easton. The construction of abaci. El. Aug. 1918.
- Gall. The a. c. track circuit. El. Sept. 1919. S. 244.
- Hoppe. Strombelastung von Metallschienen. E.K.B. 1917. H. 22.
- Huldschiner. Berechnung des Spannungsabfalles in den Fahrleitungen und Schienenrückleitungen von Wechsel- und Drehstrombahnen. E.T.Z. 1910. H. 48.
- Huldschiner. Zur Berechnung von Spannungsabfällen in den Fahr- und Speiseleitungen elektrischer Wechselstrombahnen. E.T.Z. 1920. H. 52.
- Kennelly. Wechselstromwiderstand von Eisenbahnschienen. Journ. of Franklin Inst. Bd. 182. Nr. 2. 1916. Ref.E.u.M. 1916. H. 51.
- Koch u. Mauder. Entwurf von Kurvenblättern für schnelle und genaue Berechnung von Hochspannungsfernleitungen. E.T.Z. 1921. H. 15.
- Kummer. Eiserne Fahrleitungen für Wechselstrombahnen. Sch.B.Z. 1917. Bd. 70. Nr. 25. Ref.E.u.M. 1918. Nr. 7.
- Lichtenstein. Experimentelle Bestimmungen der für die Berechnung von Wechselstrombahnenleiteranlagen maßgebenden physikalischen Größen. E.T.Z. 1907. H. 25.
- Niethammer. Strombelastung von Metallschienen. E.u.M. 1918. H. 4.
- S.E.V. Die Korrosion durch Erdströme elektrischer Bahnen. S.E.V. B. 1918. Nr. 7.
- Truxa. Beitrag zur Berechnung des Wechselstromwiderstandes massiver Eisenleitungen. Archiv für Elektrotechnik. 1919. VIII. Bd. H. 4.
- Wechmann. Elektrotechnik unter dem Einfluß des Krieges. G.A. 1916. Nr. 931.
- Weel. Über einige bemerkenswerte Fluchtlinentafeln zur Berechnung elektrischer Leitungen. E.A. 1920. Nr. 81.
- Wilson. Selbstinduktion von Straßenbahnschienen. El. 23. II. 1906.
- Wechselstrom-Verluste in Stahlschienen. Report of the Electr. Railway Fest. Comm. to the President of the Louisiana Purchase Expor. Ref.E.T.Z. 1907. H. 30.
- Zickler. Die Berechnung des Wechselstromwiderstandes von Eisenleitern mit kreisförmigem Querschnitt. E.u.M. 1919. H. 40.
- Zickler. Die Berechnung des Wechselstromwiderstandes von massiven Eisenleitern beliebiger Querschnittsform. E.u.M. 1920. H. 15.

1. Gang der Rechnung. Die im Bahnbetriebe auftretenden Belastungen sind durch einen ständigen Wechsel der Stromwerte gekennzeichnet. Eine mathematisch genaue Auswertung der Spannungs- und Arbeitsverluste und der etwaigen Erwärmung der Leiter ist daher nicht möglich. Man muß sich mit den praktischen Anforderungen genügenden Annäherungsverfahren begnügen, die den wahrscheinlich ungünstigsten Belastungsfällen entsprechen.

Zu diesem Zweck führt man durch das in Frage kommende Fahrplanbild in verschiedenen Zeitpunkten Schnitte, die Ort und Größe der Strombelastung angeben, wenn die Zuglast, die Geschwindigkeit und der Zugwiderstand gegeben sind. Durch mehrere in verschiedenen Zeitpunkten gezogene Schnitte erhält man Aufschluß, welche Zeitpunkte wegen der Art und Lage der Belastung besondere Beachtung verdienen.

Der Spannungsabfall, der angenähert auch ein Maß des Leistungsverlustes bildet, ist für die vorkommenden Spitzenbelastungen zu ermitteln, insbesondere deshalb, weil die Triebmaschinen der Fahrzeuge für feste Spannungen ausgelegt sind, daher ist ein geordneter Betrieb nicht zu erzielen, wenn der Spannungsverlust die Reguliergrenzen bzw. Geschwindigkeitsreserven überschreitet. Für die Wirtschaftlichkeit der Anlage bzw. für die Arbeitsverluste werden dagegen die bei einer mittleren Belastung auftretenden Verluste maßgebend sein. Für die Erwärmung der Leitungen kommt schließlich der geometrische Mittelwert der Stromstärke in Betracht.

Die Durchführung der Rechnung unterscheidet sich in mehrfacher Beziehung von derjenigen, die für Kraftübertragungsanlagen üblich ist.

Die Hin- und Rückleitung ist von ganz verschiedener Beschaffenheit; die bezüglichen Spannungsabfälle sind für jede auf Grund der ihr eigentümlichen Festwerte zu berechnen. Dies gilt, gleichgültig welche Stromart in Betracht kommt.

Bei Wechselstrombetrieb vergrößert sich der effektive Verlustteil durch die Hautwirkung in der Schiene, weiter vermehrt die Selbstinduktion den Spannungsverlust in beträchtlichem Maße, weil die beiden Leitersysteme — Oberleitung und Schiene — im allgemeinen sich in großer Entfernung befinden.

2. Die elektrischen Kennwerte der Leitungsanlage. Der Ohmsche Widerstand der Fahrleitung ist gegeben durch den Querschnitt und den spezifischen Widerstand des verwendeten Leitermaterials. Für Kupfer ist für Gleich- und Wechselstrombetrieb kein Unterschied zu machen. Für Eisenleitungen vermehrt sich der effektive Widerstand durch die als Hautwirkung bezeichnete Stromverdrängung gegen den Umfang des Querschnittes.

Der Zahlenwert dieses Widerstandes berechnet sich auf Grund der Erfahrungsformeln von Zickler zu

$$\frac{W_w}{W_g} = 1 + 0,84 \alpha^4, \quad \text{wenn } \alpha < 1$$

$$\frac{W_w}{W_g} = 0,758 + \sqrt{1,343 \alpha^2 - 0,183}, \quad \text{für } \alpha \geq 1$$

und

$$\frac{W_w}{W_g} = 0,758 + 1,159 \alpha, \quad \text{für } \alpha \geq 3.$$

Hier bezeichnet W_w den wirksamen Wechselstromwiderstand Ω/km , W_g den Gleichstromwiderstand Ω/km , r der Halbmesser des Leiters in cm, μ die magnetische Permeabilität, ϱ den spez. Widerstand je m/mm^2 , \sim die sekundliche Periodenzahl und ist

$$\alpha = \frac{\nu}{100} \sqrt{\frac{\sim \mu}{\varrho}}.$$

Für die Rückleitung ist der Ohmsche Widerstand nicht ohne weiteres aus den stofflichen Eigenschaften der Schienen zu berechnen, weil die zahlreichen in Reihe geschalteten Schienenverbinder den Widerstand nicht unbeträchtlich vermehren.

Die „Deutschen Erdstromvorschriften“ enthalten die Bedingung, daß der Widerstand des Stoßes im ungünstigsten Fall den Widerstand der Schiene um höchstens 20%, d. h. bei 10 m Schiene entsprechend der Widerstandsvermehrung von 2 m Schiene erhöhen darf. Tatsächlich erreicht man in der Praxis, daß eine Stoßverbindung dem Widerstand von etwa 2 bis 5 m Schienelänge gleichkommt. Bei 10 m langen Schienen erhöht sich der spez. Widerstand auf das 1,2 bis 1,5 fache des Schienenstahles, daher 9,6 bis 15 fache des Kupfers; bei 15 m langen Schienen auf das 1,13 bis 1,33 fache des Schienenstahles und 9,0 bis 13,3 fache des Kupfers.

Die Bedeutung der großen Schienenlänge und einer guten Stoßverbindung geht aus diesen Betrachtungen hervor.

Für Entwürfe ist für den Gleichstromwiderstand des Gleises eine Erfahrungsformel vielfach in Gebrauch, laut welcher

$$W_{SG} = \frac{1}{G} \Omega/\text{km}$$

wo G das Metergewicht der Schiene bedeutet.

Prüft man diese Formel auf ihre Richtigkeit, findet man, daß sie einem etwa 15 fachen Widerstand gegenüber dem des Kupfers entspricht.

Der Widerstand eines gut erhaltenen 100 mm^2 Kupferverbinder beträgt nach durchgeführten Messungen $0,000093 \Omega$, das ist bei einem Schienenprofil von $42,5 \text{ kg}$ je l. m. der Widerstand von $2,72 \text{ m}$ Schienenlänge. Die Vermehrung des Widerstandes beträgt bei 12 m Schienenlänge somit $23,2\%$.

Die Stoßverbinder System Scheinig u. Hofmann wiesen als Mittelwert von zahlreichen Messungen einen Widerstand von $0,0000085 \Omega$ auf entsprechend $0,258 \text{ m}$ Schienenlänge und einer Vermehrung um nur $1,32\%$.

Der kilometrische Rückleitungswiderstand dieses Oberbaues ergibt sich daher mit Kupferverbinder zu $0,0212$, mit Scheinigstößen zu $0,0176 \Omega/\text{km}$. Die obige Erfahrungsformel gibt den Wert

$$\frac{1}{42,5} = 0,0235,$$

welcher gut mit ersterem Ergebnis übereinstimmt.

Mit dem Schoopschen Spritzverfahren hergestellte kupferne Stoßverbinder vermehren nach den Versuchen der preußischen Staatsbahnen nur um 1,0 bis 1,5 m den Widerstand der Schienenlängen. Der Widerstand wird dann nur mehr das 8,5 bis 11,0 fache des Kupfers.

Trotz des verhältnismäßig hohen spez. Widerstandes bzw. der geringen Leitfähigkeit kann auf die Schienen als Rückleitung nicht verzichtet werden, weil das Geleise zufolge der großen Querschnitte der gebräuchlichen Schienen einem verhältnismäßig großen Kupferquerschnitt gleichkommt. Z. B. hat eine $42,5 \text{ kg}/\text{m}$ schwere Schiene einen Querschnitt von 5400 mm^2 ; dieser Eisenquerschnitt ist für das Gleis 10400 mm^2 und ist, selbst wenn die Leitfähigkeit nur $\frac{1}{15}$ beträgt, d. h. die Stoßverbinder die Leitfähigkeit beinahe auf die Hälfte verringern, einem Kupferleiter von 720 mm^2 gleichwertig.

Bei Gleichstrombetrieb ist dem Ohmschen Widerstand der Rückleitung besonderes Augenmerk zuzuwenden, weil dieser bei den verhältnismäßig großen Stromstärken eine große Rolle spielt.

Bei Wechselstrombetrieb tritt dieser Teilverlust gegenüber der Hautwirkung und dem Induktionsverlust an Bedeutung zurück. Es genügen daher selbst bei Vollbahnen Kupferverbinder von 50 mm^2 Querschnitt oder gleichwertige andere Verbinder.

Für die Widerstandsvermehrung der Schienen durch die Hautwirkung gilt Erfahrungsformel von Zickler, in welche statt dem Durchmesser der Koeffizient α mit dem Querschnitt q in cm^2 und dem Umfang u in cm einzusetzen ist.

$$\alpha = 0,02 \frac{q}{u} \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

Nach Kummer ist

$$\frac{W_w}{W_g} = 1 + \alpha q \frac{2,1}{10^3}.$$

Die Formel der A.E.G. lautet

$$W_w = \frac{c \sqrt{\sim}}{2 u} \quad \Omega/\text{km Gleis.}$$

Hier ist

$c = 2,6$ für 15 bis 25 \sim und

2,9 für 40 \sim .

Zur Berechnung des induktiven Spannungsabfalles sind die Zahlen der Selbst- und gegenseitigen Induktion für die im Eisenbahnwesen vorkommenden Leiteranordnungen zu ermitteln.

Nach einer allgemeinen Ableitung von Sumec ist der Koeffizient der gegenseitigen Induktion

$$2l \left(\ln \frac{2l}{x} - 1 \right)$$

wo l die Seitenlänge der geradlinigen Schleife und x die Entfernung der beiden Leiter voneinander bzw. von sich selbst bedeutet.

Zur Berechnung der Selbstinduktion darf x noch gleich Null, noch $= R$ (Radius des Leiters) gesetzt werden. Für $x = 0$ wäre das Feld im Leiter nicht berücksichtigt, für $x = R$ bliebe unbedacht, daß innerhalb des Drahtquerschnittes die Kraftlinien nur mit dem von ihnen umschlossenen Teil des Gesamtstromes verkettet sind.

Huldschiner leitet für den einzusetzenden Mittelwert die Formel ab

$$R_0 = \frac{R}{\mu} e^4 \text{ cm;}$$

für Kupfer wird $R_0 = 0,78 R$.

Die von Lichtenstein durchgeführten Versuche ergaben für die Permeabilität der Stahlschienen

$$\mu = 25 - \frac{\sim}{2,8},$$

wo \sim die Periodenzahl bedeutet.

Für eiserne Drähte ist

$$\mu = 200 - 2 \sim.$$

Der Selbstinduktionskoeffizient des Gleises aus Stahlschienen (Abb. 13) wird danach

$$L_{Fe} = 2l \left(\log \frac{2l e^4}{R_1} - 1 \right) = 2l \left(\ln \frac{2l}{R_1} + \frac{\mu}{4} - 1 \right)$$

und die Zahl gegenseitiger Induktion von einem in der Entfernung d_{12} befindlichen kupfernen Fahrdrähten

$$L_{c_u} = 2l \left(\ln \frac{2l}{d_{12}} - 1 \right)$$

je Kilometer.

Der induktive Spannungsabfall des Leiters 1 (Schiene) in Volt für das Kilometer wird

$$e_{\sigma 1} = 2\pi \sim \frac{2}{10^4} \left\{ J_1 \left(\ln \frac{2l}{R_1} + \frac{\mu}{4} - 1 \right) + J_2 \left(\ln \frac{2l}{d_{12}} - 1 \right) \right\} \text{ und}$$

für den Leiter 2 (Fahrdrähten), da hier

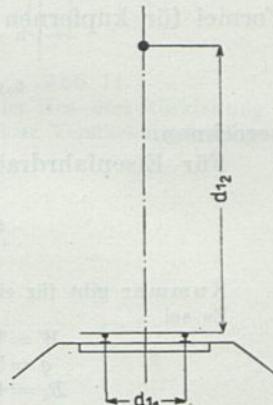


Abb. 13. Schema der Hin- und Rückleitung.

$$R_{o2} = \frac{R_2}{\frac{1}{e^4}} = 0,78 R_2$$

$$e_{o2} = 2\pi \sim \frac{2}{10^4} \left\{ J_2 \left(\ln \frac{2l}{R_2} + \frac{1}{4} - 1 \right) + J_1 \left(\ln \frac{2l}{d_{12}} - 1 \right) \right\}.$$

Hier bedeuten

R_1 den gleichwertigen Halbmesser der Schiene in cm,

R_2 den Halbmesser des Fahrdrähtes in cm,

d_{12} den Abstand beider Leiter in cm.

Der induktive Spannungsabfall in der Schleife (Abb. 13) $e_{o12} = e_{o1} - e_{o2}$ wird, da $J_1 = -J_2 = J$:

$$e_{o12} = 2\pi \sim \frac{2}{10^4} J \left(\ln \frac{d_{12}^2}{R_1 R_2} + \frac{\mu}{4} + \frac{1}{4} \right),$$

wo d , R_1 und R_2 in cm einzusetzen sind.

Geht man auf die in Wirklichkeit vorkommende Leiteranordnung über, daß die Rückleitung von zwei im Abstand d_{11} cm befindlichen Schienen gebildet wird, läßt sich der induktive Spannungsabfall nach der in gleicher Weise abgeleiteten Formel für kupfernen Fahrdrähten berechnen.

Für Eisenfahrdrähten ist

$$e_{o12} = \frac{4\pi}{10^4} J \left(\ln \frac{d_{12}^2}{\sqrt{R_1 d_{11} R_2}} + \frac{3\mu}{8} + \frac{\mu}{4} \right).$$

Kummer gibt für ein Beispiel die ausgerechneten Werte in einer Tabelle an.
Es sei

$W = 0,02$ Ohm/km der Gleiswiderstand für Gleichstrom,

$q = 5851$ mm² $G = 45,93$ kg/m das Schienengewicht.

$R_1 = 4,31$ cm $d_{11} = 143,5$ cm $d_{12} = 600$ cm.

Spannungsabfall in Volt/km und Amp. Einphasenstrom.

\sim	Fahrdrähtquerschnitt mm ²			
	Kupfer		Eisen	
	50	100	50	100
0	0,35	0,19	2,62	1,32
15	0,45	0,31	6,52	4,51
25	0,54	0,43	7,49	5,25
30	0,78	0,71	9,14	6,60

Schon bei kupfernen Fahrleitungen findet man, daß die Periodenzahl 15 die Impedanz bei 100 mm² Fahrdräht auf 0,31 Ohm/km, das ist das 1,61fache des Gleichstromwertes erhöht. Für denselben Fahrdrähtquerschnitt, jedoch Weicheisen steigt die Impedanz im Verhältnis von 0,19 zu 4,51, d. i. auf den 23,6fachen Wert.

Die eiserne Fahrleitung kann demnach als Stromleiter kaum in Frage kommen; sie ist lediglich als mechanische Führung des Stromabnehmers anzusehen. Vom Standpunkt des Bahnbetriebes ist gegen diese Sachlage nichts einzuwenden; es ist vielmehr von Vorteil, das System der Stromverteilung unabhängig von der Fahrleitung einer Leitung aus gut leitendem Stoff anzuvertrauen. Voraussetzung ist allerdings, daß der Eisendraht von einwandfreier Qualität ist.

Die Nachrechnung einiger Beispiele gibt darüber Aufschluß, daß die Entfernung d_{12} von ausschlaggebender Bedeutung ist und der induktive Spannungsabfall durch Näherung der Leiter aneinander wesentlich vermindert werden kann. - $\frac{3}{2}$

Diesen Vorteil machen sich diejenigen Fahrleitungstypen mit Vielfachaufhängung zunutze, bei welchem das ganze System von einem geerdeten Seil getragen wird.

Bei der Stubaitalbahn konnte zufolge der einfachen Anlageverhältnisse die gesamte Impedanz über eine Länge von rund 11 km gemessen werden. Für einen Fahrdräht von 53 mm^2 , Drahthöhe 5,0 m, Spurweite 1,0 m, Schienengewicht 17,89 kg/m ergab die Messung bei $48 \sim$ rund $0,8 \text{ Ohm/km}$ Impedanz gegen den nach der Kummerschen Ableitung berechneten Wert von $0,965 \Omega$.

Für Doppelgleise mit einfachem Fahrdraht gilt

$$\frac{4\pi}{10^4} \sim J \left(\lg n \frac{d_{12}^{-2} d_3^{-2}}{R_2 d_{23}^{-2} \sqrt{R_1 d_{11}}} + \frac{\mu}{8} + \frac{1}{4} \right).$$

Für Einfachgleise mit besonderer Speiseleitung für die Hin- und Rückleitung wird die Berechnung übersichtlicher, wenn die Reaktanz der einzelnen Leiter ausgerechnet wird. Unter Einführung der in Abb. 14 gebrauchten Bezeichnungen

$$\text{für den Fahrdräht} \quad k_2 = \frac{4\pi}{10^4} \left(\ln \frac{d_{12} d_{23}}{R_s d_{ss}} + \frac{1}{4} \right),$$

$$\text{für den negativen Speisedraht} \quad k_3 = \frac{4\pi}{10^4} \left(\ln \frac{d_{23} d_{34}}{R d_{12}} + \frac{1}{4} \right),$$

$$\text{für den positiven Speisedraht} \quad k_4 = \frac{4\pi}{10^4} \sim \left(\ln \frac{d_{34} d_{14}}{R d_{24}} + \frac{1}{4} \right),$$

$$\text{für das Gleis } k_1 = \frac{4\pi}{10^4} \left(\ln \frac{d_{12} d_{14}}{\sqrt{R_1 d_{11} d_{13}}} + \frac{\mu}{8} \right).$$

Der kilometrische Widerstand (Impedanz) des ganzen Systems wird

$$= \sqrt{\left(\frac{w_2 w_4}{w_3 + w_4} + \frac{w_3 w_1}{w_1 + w_3}\right)^2 + \left(\frac{k_2 k_4}{k_3 + k_4} + \frac{k_1 k_3}{k_3 + k_4}\right)^2}.$$

Zu beachten ist, daß, wenn die angenommene Stromverteilung nicht den errechneten Impedanzen entspricht, man den gefundenen Impedanzen entsprechend eine neue Stromverteilung annehmen muß.

Die hier errechneten Werte der Schienenrückleitung setzen voraus, daß für eine gut leitende Verbindung der beiden Schienenstränge vorgesorgt ist. In Straßenbahnbetrieben werden in Entferungen von je 50 m metallische Querverbindner vorgesehen, außerdem auf die Kontinuität des Oberbaues in Weichen und Kreuzungen geachtet. Bei Fernbahnen begnügt man sich mit etwa 4 Querverbindungen auf jedes Kilometer.

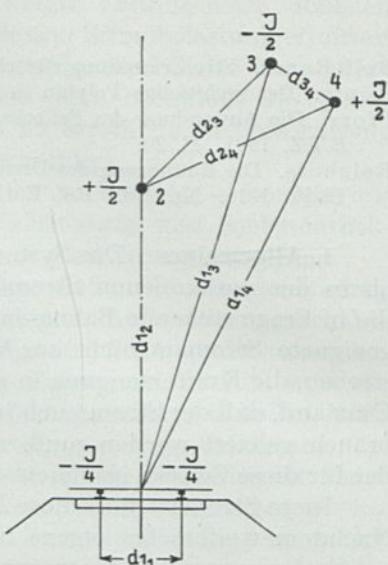


Abb. 14.
Schema der Hin- und Rückleitung
mit je einer Verstärkungsleitung.

II. Die Stromverteilung.

Literatur:

- Bell-Rasch. Stromverteilung für elektrische Bahnen. Verl. Julius Springer, Berlin 1898.
 König. Der mehrpolige Polplan in der zeichnerischen Leitungsberechnung. E.T.Z. 1903. H. 5.
 Pforr. Die Anwendung des Seileckes für die Berechnung der Stromverteilung elektrischer Bahnen. E.T.Z. 1901. H. 20.
 Reichers. Die Einführung des Dreileiterbetriebes bei der Straßenbahn in Dresden. Mitt. der Verein. El. W. 1918. Nr. 210. Ref. E.u.M. 1918. H. 14.

1. Allgemeines. Das System der Stromverteilung bestimmt sich zunächst danach, ob in der vorhandenen Stromquelle diejenige Stromart erzeugt wird, die sich für die in Frage stehende Bahnanlage eignet oder nur eine zum Bahnbetriebe unmittelbar geeignete Stromart nicht zur Verfügung steht. Bei dem allgemein gewordenen Bestreben, die Krafterzeugung in großen Kraftwerken zu vereinigen, andererseits bei dem Umstand, daß der Strom auch in entlegene Gebiete mit verhältnismäßig geringem Verbrauch geleitet werden muß, arbeiten Primäranlagen so gut wie ausschließlich mit der für diese Zwecke geeignetesten Stromart: dem Drehstrom mit 40, 50, 60 Perioden.

Diese Stromart und diese Periodenzahlen eignen sich für den Bahnbetrieb nicht. Nachdem weiters bei eigens für Bahnbetriebe geschaffenen Kraftwerken Leistungen auf Entfernungen zu übertragen sind, für welche die gebräuchlichen Arbeitsspannungen der Fahrleitung nicht ausreichen, ist das System der direkten Speisung von der Primär anlage zur Ausnahme geworden.

Die Zwischenschaltung von Umformungseinrichtungen bedeutet dabei im allgemeinen keine Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit der Speisung, indem durch die Fernübertragung mit Hochspannung die Wirtschaftlichkeit gesichert bzw. für gleichen Kostenaufwand die Umformungsverluste ausgeglichen werden können.

Die indirekte Speisung mit Umformung der Spannung allein oder auch der Stromart ist, wie bereits angedeutet, vom Standpunkt der Elastizität der Stromversorgung wünschenswert.

Für den bereits den Anforderungen des Bahnbetriebes entsprechend umgeformten Strom können je nach Art der Anlage verschiedene Verteilungssysteme in Betracht kommen. In allen Fällen erfolgt die Verteilung direkt und besteht das Bestreben möglichst einfach gestaltete Speisebezirke zu schaffen, damit im Falle einer Störung der Ort des Defektes rasch festgestellt werden kann.

Die mehrfache Speisung eines Netzes wird daher trotz des hierdurch erzielbaren geringeren Aufwandes an Leitungsmaterial im allgemeinen vermieden.

Bei langgestreckten Bahnen ist die Speisung einer Teilstrecke von zwei Seiten üblich. Hier kann dem Übergreifen einer Störung aus einer Teilstrecke in die andere durch getrennten Anschluß und Einschaltung von selbsttätigen Ausschaltern vorgebeugt werden.

Der wirtschaftliche Erfolg der zweiseitigen Speisung gegenüber einer einseitigen Stromzufuhr geht aus der einfachen Überlegung hervor, daß bei gegebener Stromabnahme von J Amp. in einer Teilstrecke die Reichweite der Speisepunkte bei zweiseitiger Speisung vervierfacht wird, indem jedes Unterwerk nur die halbe Stromstärke zu liefern hat. Bei gegebenem Querschnitt bzw. zugelassenem Spannungsverlust kann die halbe Stromstärke auf die doppelte Entfernung übertragen werden, somit kann die Teilstrecke viermal so lang sein wie bei einseitiger Speisung.

Die zweckmäßige Gestaltung der Stromverteilung kann jedoch nur bezüglich des Fahrleitungsnetzes durch geeigneten Entwurf erreicht werden. Die Schienenrückleitung bildet in weitverzweigten Stadtgebieten ein eigenes Leiternetz, in welchem sich der Stromverlauf nach dem Kirchhoffschen Gesetze für Stromver-

zweigungen ausbildet. Wenn demnach aus einem Unterwerk mehrere Rückleitungskabel herausführen, um die vorgeschrivenen Spannungsverluste in der Rückleitung einzuhalten, so muß nach den für mehrfach verzweigte Leitungsnetze üblichen Schnittmethoden der Bereich eines Speisekabels und dessen Strombelastung ermittelt werden. Bei der starken Veränderlichkeit des Widerstandes der Gleise kann diese Rechnung nur als rohe Annäherung betrachtet werden. Man beeinflußt die Speisespannung und dadurch den Anteil eines Speisekabels an Strom durch Vorschaltung von Widerständen oder Zusatzmaschinen mit Serienerregung.

Die beiden Arten der Speisung — freitragend oder mehrseitig — können mit dem allgemein bekannten Zweileiterystem — Fahrleitung und Schienenrückleitung — oder auch mit dem Dreileiterystem zur Ausführung gelangen.

Das Dreileiterystem kann so eingerichtet werden, daß praktisch gleichwertig belastete voneinander isolierte Streckenteile auf je einen Außenleiter geschaltet werden. Der durch die Verdoppelung der Spannung der Stromquelle sonst erzielbare Gewinn an Leitungsmaterial wird in diesem Falle nicht erzielt, weil die hochwertige Schienenrückleitung, die sowieso vorhanden ist, nicht ausgenützt wird.

Der Vorteil dieser Dreileiterschaltung liegt jedoch in der Entlastung der Schienenrückleitung vom Strom und Befreiung der in der Nähe befindlichen Kabel und Rohrleitungen von den elektrolytischen Zerstörungen. Einen indirekten Gewinn kann dieses Speisungssystem insofern bringen, als die meist sehr kräftig bemessenen Rückleitungskabel unter Umständen gänzlich entbehrt werden können.

Im allgemeinen trifft dieser Fall jedoch nicht zu, weil es ziemlich schwierig ist, die Speisebezirke auf gleiche Belastung zu regeln.

Vielfach besteht das Bedürfnis, Außenlinien, die weniger dicht befahren werden, daher nur verhältnismäßig niedrigere Anlagekosten zulassen, mit höherer Spannung als die Stadtnetze zu betreiben. Unter einem besteht für Außenstrecken meist auch das Bedürfnis, rascher zu fahren.

Diesen Bedingungen entspricht ein Verteilersystem, bei welchem die höhere Spannung durch eine Zusatzmaschine erzeugt wird. Das System ist kein eigentliches Dreileiterystem, vielmehr ein mit gemeinsamer Rückleitung arbeitendes doppeltes Zweileiterystem.

Bei Anlagen mit schwachem Verkehr und niedrigen Strompreisen, namentlich bei Pauschalbezahlung des Stromes von Wasserkraftwerken, kann es wirtschaftlich sein, ungewöhnlich große Leitungsverluste zuzulassen. Ein geordneter Fahrverkehr wäre hierbei kaum durchführbar, weil die Geschwindigkeit der Motoren in unzulässigen Grenzen schwanken würde. Zum Ausgleich des in der Leitung auftretenden Spannungsverlustes schaltet man in eine an geeigneter Stelle angeschlossene Speiseleitung eine Zusatzmaschine mit Erregung durch den Fahrstrom. Der Speisepunkt nächst dem Kraftwerk erhält die Maschinenspannung ohne Zusatzspannung. Wenn die Strecke stromlos ist, entsteht zwischen den beiden Speisepunkten ungleicher Spannung ein Ausgleichsstrom. Durch geeignete Verlegung des Speisepunktes kann der Ausgleichstrom in zulässigen Grenzen gehalten werden.

2. Die Berechnung der Stromverteilung. Die Strombelastungen von Bahnanlagen schwanken zeitlich in ihrer Größe und Anzahl, schließlich auch der Lage nach. Durch getroffene Wahl der Zuggewichte, der Fahrgeschwindigkeit und der Motortype, mit welcher die gewünschten Verkehrsleistungen erzielt werden können, ist für jede Zugslage die Strombelastung gegeben. Die Zugslage findet sich aus dem Fahrplan. Trägt man demnach in einem Bildfahrplan in Abhängigkeit vom Weg die entsprechenden Stromstärken auf und zieht man für einen gewissen Zeitpunkt einen Schnitt durch die Fahrplanlinien, erhält man im fraglichen Zeitpunkt für jeden Zug die Stelle, an welcher derselbe sich befindet, und die Stromaufnahmen, die den betreffenden Stellen entsprechen.

Die rechnerische Ermittlung der von Zeitpunkt zu Zeitpunkt in raschem Wechsel befindlichen Spannungsverluste ist eine wenig übersichtliche und zeitraubende Arbeit. Zeichnerische Verfahren führen hier zu einem rascheren Ergebnis.

Das Schema der Strombelastung einer Leitung — für die vorläufig in ihrer ganzen Länge gleichbleibender Querschnitt vorausgesetzt werden soll — hat eine unverkennbare Ähnlichkeit mit einem Brückenträger, auf welchem Einzellasten angreifen, die der Balken auf die Auflager überträgt. Die Berechnungsverfahren, die sich beim Brückenbalken eingeführt und bewährt haben, können in zweckmäßiger Weise auf die Leitungsanlage einer elektrischen Bahn übertragen werden.

Trägt man die Einzellasten — in unserem Fall die Stromstärken — durch Liniengrößen dargestellt in der gegebenen Reihenfolge auf einer Geraden auf und zieht man Strahlen von den einzelnen Stromwerten an einen beliebig gewählten

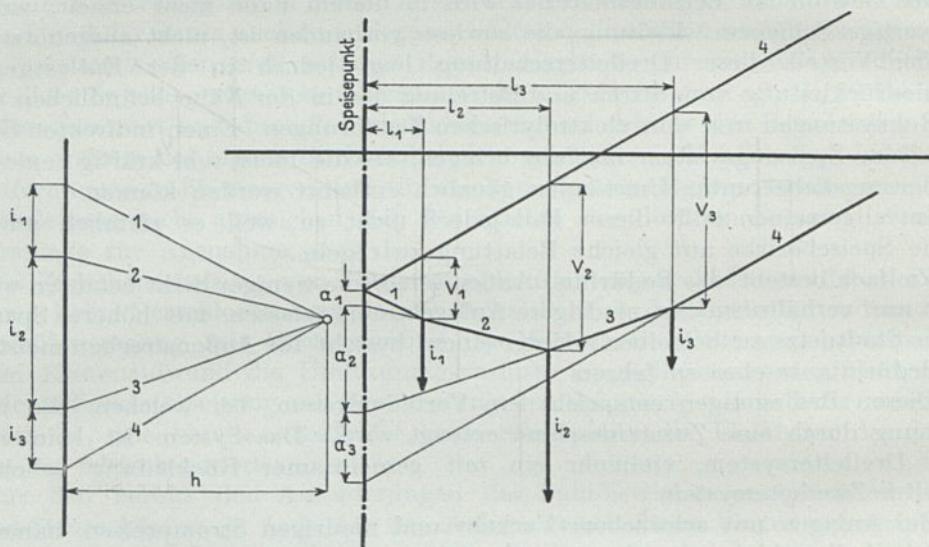


Abb. 15. Stromeck und Seileck.

Pol, erhält man das Krafteck (Stromeck) (Abb. 15). Die beiden äußersten Seiten des Seileckes schließen demnach die Summe aller Stromstärken ein. Deutet man hierauf auf einer wagerechten Geraden in maßstabrichtigen Entfernungen die Lage der Belastungen durch senkrechte Linien an, so kann man das Seileck (Seilpolygon) ziehen, indem man auf einer der Senkrechten einen beliebigen Punkt festlegt, von diesem Punkt aus zwei gerade Linien parallel zu denjenigen zwei Polstrahlen zieht, die die der betreffenden Stelle entsprechende Strombelastung einschließen. So mit allen Strombelastungen fortlaufend, erhält man das Seileck, dessen zwei letzte Seiten parallel zu den Außenseiten des Krafteckes liegen.

Freitragende Speisung (Abb. 15). Es sei ein Speisepunkt an einem Bahnende vorhanden. Die Speisespannung sei unveränderlich.

Die Größe und Lage der Strombelastung sei gegeben, hiernach das Stromeck (Krafteck) gezeichnet. Ausgehend von einem beliebigen Punkt auf der dem Bahnende entsprechenden Senkrechten zieht man eine Parallelle mit derjenigen äußersten Seite des Stromeckes, die der Strombelastung i_1 entspricht, bis zur Senkrechten der Strombelastung i_2 , hierauf eine Parallelle mit dem Strahl 2 des Stromeckes bis zur Senkrechten für i_3 usf. Zieht man schließlich vom Schnittpunkt des Seileckes

eckes mit der Senkrechten am Bahnende eine Parallele mit dem letzten Strahl (4) des Stromeckes, so schließt dieser mit dem Seileck eine Fläche ein, welche die Verteilung des Spannungsabfalles längs der betrachteten Leitung darstellt.

Es bestehen die geometrischen Beziehungen

$$\frac{i_3}{h} = \frac{a_3}{l_3}, \quad \frac{i_2}{h} = \frac{a_2}{l_2}, \quad \frac{i_1}{h} = \frac{a_1}{l_1}.$$

und damit ist

$$V_3 = a_1 + a_2 + a_3 = \frac{1}{h} \{i_1 l_1 + i_2 l_2 + i_3 l_3\}.$$

Der Spannungsverlust bis zum Streckenende ist gleich

$$R \{i_1 l_1 + i_2 l_2 + i_3 l_3\}, \text{ das ist}$$

die Summe der Strommomente multipliziert mit dem kilometrischen Widerstand R .

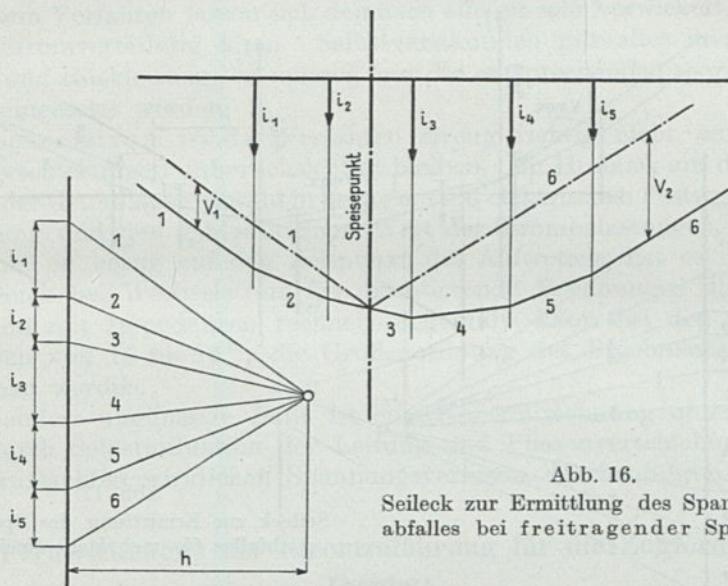


Abb. 16.
Seileck zur Ermittlung des Spannungsabfalles bei freitragender Speisung.

Wählt man nicht willkürlich, sondern

$$R = \frac{1}{h},$$

können die auftretenden Spannungsverluste direkt abgelesen werden. Ist dies nicht der Fall, so sind hR Spannungseinheiten durch die Längeneinheit dargestellt.

Weiters ist:

$$\begin{aligned} \frac{i_3}{h} &= \frac{b_3}{l_3 - l_2} & V_2 &= V_3 - b_3 \\ V_2 &= \frac{1}{h} \cdot (i_3 l_3 + i_2 l_2 + i_1 l_1) - \frac{i_3}{h} (l_3 - l_2) \\ &= \frac{1}{h} ([i_3 + i_2] l_2 + i_1 l_1) \end{aligned}$$

und der Spannungsabfall bis zum Ort der Belastung i_2

$$R ([i_3 + i_2] l_2 + i_1 l_1).$$

Wie ein Blick auf Abb. 16 lehrt, ist es gleichgültig, ob sich der Speisepunkt am Bahnende oder irgendwo an einer anderen Stelle befindet, die Darstellung behält ihre Gültigkeit.

Den Fall, daß der Querschnitt der Leitung veränderlich ist, kann man mit dem Seileck bequem berücksichtigen. Wenn z. B. die Arbeitsleitung in den drei Teilstrecken drei voneinander verschiedene Widerstände aufweist, so ist das Stromeck mit drei entsprechenden Polabständen für die im Bereich der betreffenden Streckenteile vorkommenden Strombelastungen zu ziehen und wird die Schlußlinie keine Gerade, sondern eine so oft gebrochenene Linie parallel mit den aus den einzelnen Polabständen gezogenen Außenseiten des Stromeckes als Querschnittsänderungen vorkommen.

Es bedarf keines besonderen Beweises, daß dasselbe Verfahren auch für den Fall mehrfacher Speisung anwendbar ist. Für zwei und drei Speisepunkte gleicher Spannung, die sich außerdem nicht an den Bahnenden befinden, ist Stromeck und Seileck in den Abb. 17 dargestellt.

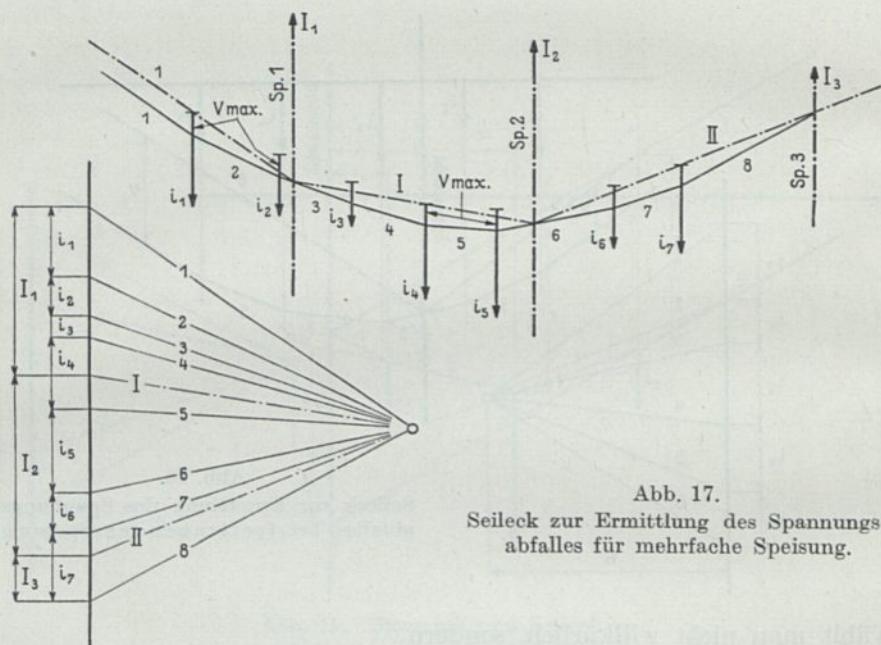


Abb. 17.
Seileck zur Ermittlung des Spannungsabfalles für mehrfache Speisung.

Dieses Verfahren kann ohne weiteres zur Asteilung der Speisepunkte unter Beachtung der wirtschaftlichen Regel, daß diejenige Anordnung der Speisepunkte die beste Ausnutzung der Leitung gibt, bei welcher der Spannungsabfall in allen Teilstrecken gleich groß wird, angewendet werden. Zu diesem Zweck zieht man von einem Bahnende ausgehend, in der dem gewählten Spannungsverlust entsprechenden senkrecht aufgetragenen Entfernung eine Parallele mit dem Seileck. Wo diese Linie das Seileck schneidet, ist die erste Speisestelle vorzusehen. Das Längenmaß entsprechend ΔV_{\max} auf allen Senkrechten auftragend, zieht man vom Punkt der ersten Speisung eine zweite Schlußlinie, so daß die eingeschlossene Fläche nirgends größere senkrechte Längen als ΔV_{\max} aufweist usf.

Dieses Verfahren für mehrere Zeitpunkte wiederholend, findet man die schließlich günstigste Mittellage für die Speisepunkte. Das Seileck gibt unter einem die Belastungen der einzelnen Speisepunkte, indem man mit den gefundenen Schlußlinien Parallelen im Stromeck zieht. Die Parallelen mit den an einem Speisepunkt sich schneidenden Schlußlinien trennen entsprechende Längen an der Stromskala im Stromeck ab.

Wenn der Speisepunkt nicht unmittelbar an der Leitung liegt, vielmehr durch ein Kabel angeschlossen ist, so ist die Spannung des Speisepunktes entsprechend dem Verlust im Kabel veränderlich.

Greift an einem Speisepunkt ein Kabel mit dem Widerstand g an, dessen Endpunkt im Kraftwerk an der festen Spannung E liegt, kann dieses Kabel durch eine Leitung ersetzt gedacht werden, die den gleichen kilometrischen Widerstand wie die Fahrleitung hat; es muß nur die Länge $L = \frac{g}{R}$ entsprechend gewählt sein. Man kann somit die Rechnung wie früher durchführen, nur muß der Speisepunkt um die Länge L verschoben werden.

Liegt der Speisepunkt nicht am Bahnende, so denkt man sich alle Stromgrößen einer Seite zu einer einzigen Stromentnahme zusammengezogen, die am Speisepunkt selbst angreift.

Mit diesem Verfahren lassen sich demnach alle oft sehr verwickelt erscheinenden Fragen der Stromverteilung lösen. Selbstverständlich gilt alles in gleicher Weise für die Hin- und Rückleitung, es müssen nur die entsprechenden spezifischen Widerstandswerte eingesetzt werden.

Für Wechselstrom ist das Verfahren streng richtig nicht anwendbar, weil die Phasenverschiebungen unberücksichtigt bleiben. Im Hinblick auf die beschränkte Genauigkeit der Grundlagen sowohl in bezug auf die elektrischen Festwerte, namentlich der Rückleitung und den zahlenmäßigen Wert der Strombelastungen, schließlich auf das weite Spiel in bezug auf den Zeitpunkt des Auftretens, hat es nichts auf sich, wenn man auch bei Wechselstrom für orientierende Rechnungen dieses Verfahren verwendet und mit Impedanzen rechnet. Jedenfalls kann bei den gebräuchlichen Periodenzahlen von 15 bis $16\frac{2}{3}$ die Größenordnung des Ergebnisses nicht wesentlich verschoben werden.

Für besonders ungünstige Fälle ist eine Kontrollrechnung unter Berücksichtigung des durch Selbstinduktion der Leitung und Phasenverschiebung der Stromabnahme verursachten wirklichen Spannungsverlustes durchzuführen.

III. Fernwirkungen der Stromzuführung für die Zugförderung.

Literatur:

- Ambrosius. Beeinflussung von Telegraphenleitungen durch eine Hochspannungsanlage. Helios 1911. Nr. 19.
- Behn-Eschenburg. Über Wechselstrommotoren der M.F.O. und ihre Wirkungen auf Telephonleitungen. E.K.B. 1908. H. 28.
- Brauns. Telegraphenstörungen durch Wechselstrombahnen mit Schienenrückleitung. E.T.Z. 1915. H. 18. Archiv für Post und Telegr. 1914. Nr. 2. Ref.E.u.M. 1914. H. 77.
- Brauns. Einwirkung von Starkstromanlagen auf Schwachstromleitungen. Telegr. und Fernsprechtechnik, 1919. H. 5. Ref.E.u.M. 1920. H. 2.
- Dumermuth. Maßnahmen gegen die Störungen der Telegraphenleitung im Rhonetal durch den Bahnbetriebsstrom der Lötschbergbahn. Sch.B.Z. 1917. Bd. 59. Nr. 12. E.T.Z. 1917. H. 4.
- Girousse. La traction monophasée et les lignes à courant faible. L.E. Nov. 1913. E.K.B. 1914. Nr. 2.
- Inductive interférence in heavy traction. E.R.J. Febr. 1916. E.R.J. Mai 1914. Schwarzkopff E.K.B. 1904. H. 23. Sch.B.Z. 1917. Bd. 59. Nr. 25. E.T.Z. 1920. H. 11.
- Hohage. Über die Beeinflussung von Schwachstromleitungen und -Apparaten durch Starkstromanlagen. E.T.Z. 1911. H. 51.
- Kenelly. Wechselstromwiderstand von Eisenbahnschienen. Journ. of the Frankl. Inst. Bd. 182. Ref. E.K.B. 1917. H. 31.
- Kummer. Die Maschinenlehre der elektr. Zugförderung II. Verl. Julius Springer. Berlin 1920.
- Kuntze. Untersuchungen über Schwachstromstörungen bei Einphasen-Wechselstrombahnen. Verl. R. Oldenbourg. München-Berlin 1920.
- Leuthele. Elektrisierung der franz. Eisenbahnen. G.C. 1919. Bd. 74. S. 334. Ref. E.T.Z. 1920. H. 11.
- Lichtenstein. Experimentelle Bestimmungen der für die Berechnung von Wechselstrombahnleiteranlagen maßgebenden phys. Größen. E.T.Z. 1907. H. 25. E.K.B. 1907. H. 27. E. 1907. Nr. 32.

- Marcuse. Schutz oberirdischer Fernsprechleitungen gegen störende Beeinflussung durch parallel-liegende Hochspannungsleitungen. Z.f.d.ges.Eisenb.Sicherungswesen. 1915. Nr. 24.
- Marguerre. Über Telephonstörungen durch Wechselstrombahnen und einige Vorgänge in Einphasengeneratoren. E.T.Z. 1912. H. 47.
- Marguerre. Einige Messungen über influenzierte Spannungen in Freileitungen. E.K.B. 1912. H. 26.
- Mauduit. Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones. Dez. 1918.
- Mirabelli. Note sur les perturbations produites par la traction électrique sur les fils télégraphiques. Sch.E.T.Z. 1909. H. 40.
- Porney. Die Elektrisierung der Eisenbahnen in den Vereinigten Staaten und der Schutz der Telegraphen- und Fernsprechlinien. Ann. des Postes, Telegr. et Telephon 1919. S. 566. R. G. E. 1920. Bd. 7. S. 199. Ref. E.T.Z. 1921. H. 2!.
- Rohr. Störende Beeinflussungen und Schutzvorkehrungen. Z.f.K.B. 1916. H. 2.
- Schröter. Schutz von Starkstromleitungen gegen Starkstrom. E.T.Z. 1915. H. 7.
- Schrottke. Über den Einfluß der Hochspannungsleitungen auf die Betriebsfernfernspreechleitungen. E.T.Z. 1907. H. 28.
- Stein. Störungen in Fernsprechleitungen durch Wechselstrombahnen. E.T.Z. 1912. H. 33.
- Stecher. Verfahren zur Berechnung der elektrostatischen Einwirkungen von Drehstromlinien auf benachbarten Schwachstromleitungen. O.W.Ö.B.D. 1915. 21. Jahrg.
- Sulot. Beitrag zur Berechnung der Influenzwirkung von Starkstromleitungen auf parallellaufende Schwachstromleitungen. E.u.M. 1918. H. 33.
- * * * Der Saugtransformator in der Stromverteilung für elektr. Bahnen. Sch.B.Z. 1917, Bd. 59. Nr. 25.
- Thormann u. Kummer. Beeinflussung der Schwachstromanlagen durch die elektrischen Traktionsbetriebe. Schweiz.Studienkommission. Bericht 4. II. Verl. Rascher. Zürich 1915.
- Truxa. Untersuchungen über die Beeinflussung von Schwachstromleitungen durch die elektr. Mittenwaldbahn. Z.Ö.I.A.V. 1921. H. 20/21.
- Valensi. Telefon- u. Telegrafenstörungen. Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones. Aug. 1918, März 1919.
- Warren. Inductive effects of alternating current railroads. Proc. Aug. 1918. Ref. E.T.Z. 1920. H. 11.
- Zanger. Die Methoden zur Untersuchung der Korrosionsverhältnisse bei elektrischen Bahnen. B.S.E.V. Nov. 1920.
- * * * Saugtransformatoren auf der mit Wechselstrom betriebenen Strecke Perpignan-Villafranca der franz. Südbahn. R.G.E. 1917. Bd. 1. H. 9 u. 14. Sch.B.Z. 1917. Nr. 25. Ref. E.K.B. 1917. H. 31.
- * * * La Traction électrique et les lignes à courant faible. T.M. März 1919. S. 113. L. E. März. 1919. Korrosionsverhältnisse bei elektr. Bahnen. B.S.E.V. 1920. Nr. 10. Ref. E. u. M. 1921. H. 28 u. E.T.Z. 1921. H. 30.

1. Fernwirkungen. Der Stromlauf in den Leitungen beschränkt sich in seinen Wirkungen nicht auf die eigentliche Aufgabe, d. i. der Antrieb der Motoren der Triebfahrzeuge. Es läßt sich selbst bei einer für ihre eigenen Zwecke einwandfrei gebauten Anlage nicht vermeiden, daß die an die einzelnen Leiter gebundenen elektrostatischen, elektrodynamischen und elektromagnetischen Fernwirkungen die in ihrem Bereich befindlichen, anderen Zwecken dienenden Leitungen beeinflussen. Handelt es sich dabei um Leitungen von Starkstromanlagen, bleiben diese Fernwirkungen belanglos. Ihre Wirkungen können dagegen äußerst störend werden, wenn es sich um Schwachstromleitungen handelt, die besonders empfindliche Apparate bedienen. In die Gruppe der empfindlichsten Einrichtungen gehört das Telephon, welches aus diesem Grunde zurzeit nur mehr mit erdfreien Doppel-leitungen betrieben wird.

Wenn auch nicht so empfindlich, jedoch den störenden Einflüssen viel mehr ausgesetzt, sind die Telegraphen- und Blockapparate, weil sie noch vielfach mit Erdrückleitung arbeiten.

Je nach der Art des verwendeten Stromsystems ist die eine oder andere Störungsquelle überwiegend oder sie fehlt überhaupt. Letzteres trifft für die gebräuchlichen Gleichstromspannungen zu. Bei Gleichstrombetrieb kann eine elektromagnetische Fernwirkung nur durch sekundäre Erscheinungen verursacht werden. Die elektrodynamischen Wirkungen verlieren dagegen bei Wechselstrombetrieb meist an Bedeutung, weil die Stromstärken gering sind.

2. Statische Induktion. Die einen stromführenden Leiter umgebenden, radial auf dessen Mittelpunkt gerichteten elektrischen Kraftlinien können in einem in ihrem Bereich befindlichen Leiter durch statische Induktion sehr hohe Spannungen erzeugen, die wieder die Quelle von Ladeströmen sind.

Die statisch induzierte Spannung ist direkt proportional der induzierenden Spannung, die Ladeströme dagegen der Periodenzahl. Die Fernwirkung nimmt mit der Entfernung der Leitungen voneinander ab. Die diesbezüglichen elektrophysikalischen Gesetze hat Schrottke entwickelt; für die bei Bahnanlagen vorkommenden Sonderfälle sind sie von Thormann und Kummer in den Berichten der schweizerischen Studienkommission abgeleitet worden.

Die Ergebnisse dieser Ableitungen seien hier wiedergegeben:

- a) die statisch induzierte Spannung erreicht ihren Höchstwert für den Fall der idealen Isolierung der induzierten Leitung.
- b) die induzierte Spannung wird um so kleiner, je größer die Kapazität der induzierten Leitung gegen Erde ist. Sind die beeinflußten Leitungen länger als die induzierenden, wird daher die Beeinflussung geringer als bei gleichlangen Leitungen.
- c) die Ladestromstärke ist proportional der Frequenz und der Länge des induzierten Leiters.
- d) die Ladestromstärke ist Null, wenn der Isolationswiderstand der induzierten Leitung unendlich groß ist; derselbe erreicht seinen Höchstwert, wenn der Isolationswiderstand Null wird.

Auf der Strecke Seebach—Wettingen wurden statisch induzierte Spannungen von etwa 1000 Volt in Leitungen gemessen, die sich in etwa 10 m Entfernung nächst der mit 15000 Volt gespeisten Fahrleitung in einer Länge von höchstens 6000 m befanden.

In den eigenen Betriebstelephonleitungen der Wien-Preßburger Bahn, die am Bahnkörper auf besonderem Holzgestänge in einer Ausdehnung von 50 km verlegt sind, wurden Spannungen bis zu 2000 Volt gemessen.

Physiologisch können selbst diese Spannungen für die mit den Apparaten in Berührung tretenden Personen nur unangenehm, aber nicht gefährlich werden, weil die Ladungen bei den geringen Kapazitäten gering bleiben. Aus dem gleichen Grunde wird der Einfluß der statischen Induktion auf Schwachstromapparate nicht von großer Tragweite sein. Die statische Induktionsspannung gibt jedoch indirekt zu Störungen Anlaß, indem die Isolation durchgeschlagen wird und auf diesem Wege die dynamischen Erdspannungen störende Ströme in die Schwachstromleitungen schicken können.

Die mit der Zeit eintretende Verschlechterung der Isolation durch Verunreinigung der Isolatoroberflächen setzt die induzierte Spannung zwar herab, nichtsdestoweniger ist wegen der statischen Spannung eine viel sorgfältigere Herstellung der Isolation überhaupt nötig, um die erwähnten Durchschläge zu verhindern.

Zur Verminderung der statischen Spannung schaltet man zwischen die zwei Leitungen einer Schleife eine im Mittelpunkt geerdete Spule mit hoher Selbstinduktion und kleinem Ohmschen Widerstand (200 Ohm), die für die hochperiodigen Telefonströme undurchlässig ist, dagegen in bezug auf die statische Spannung einem Kurzschluß gleichkommt; diese Anordnung ebenso wie die Einschaltung besonderer Kondensatoren zu diesem Zweck krankt an der Schwierigkeit der Instandhaltung und Gefährdung durch atmosphärische Entladungen.

3. Die elektrodynamischen Stromwirkungen sind darauf zurückzuführen, daß der Spannungsverlust in den Schienen an sich so groß wird, daß diesem Potentialunterschied entsprechend über die Isolatoren Ströme in die Leitungen eindringen oder daß die Ströme durch die als Rückleitung dienende Erdleitung direkt in die betreffenden Apparate gelangen.

Diese Störungsquelle ist bei Gleichstrom im allgemeinen größer, weil der kilometrische Spannungsverlust wegen der größeren Stromstärken verhältnismäßig größer wird als bei Wechselstrombahnen. Etwa $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{6}$ des gesamten Spannungsverlustes in der Leitungsanlage entfällt auf die Rückleitung.

Gegen diese Störungsgefahr ist der einzige sichere Schutz eine an sich gute Isolation und Verzicht auf die Erdrückleitung.

Bei weniger empfindlichen Einrichtungen, wie es z. B. die Telegraphenapparate sind, müssen deshalb nicht alle Leitungen als Schleifen ausgestaltet werden, es genügt vielmehr für mehrere Leitungen eine gemeinsame isolierte Rückleitung zu schaffen. Günstig verhalten sich in diesem Belange Bahnen mit Dreileiterystem, bei welchem die Schienenrückleitung keinen nennenswerten Strom führt.

Die Ströme verlassen das Bahngeleise, wenn sich Nebenwege mit verhältnismäßig guter Leitfähigkeit finden. Das ist vielfach der Fall, wenn die Bahnstrecke einen Bogen beschreibt, so daß die Ströme kürzere Wege finden als das Geleise. Die gleiche Erscheinung tritt insbesondere im bebauten Stadtgebiet auf, wo die im Erdreich verlegten Gas- und Wasserleitungsrohre, Kabelleitungen u. dgl. dem Strom gute Nebenwege bieten. Die Teilnahme an der Stromleitung bildet für sich keinerlei Gefahr. Schäden entstehen lediglich an denjenigen Stellen, wo der Strom die Nebenwege verläßt, indem der im Erdreich stets vorhandene Feuchtigkeits- und Säuregehalt eine elektrolytische Auflösung der Austrittsstelle bewirkt.

Um diesen Gefahren zu begegnen, müssen einerseits die Austrittsmöglichkeiten des Stromes aus der Schiene nach Möglichkeit eingeschränkt werden, andererseits die Ursache dieser Erscheinung, die Spannungsdifferenz des Leiters gegenüber dem umgebenden Erdreich, möglichst verringert werden.

Die Erdstromvorschriften der verschiedenen Länder enthalten diesbezügliche Vorschriften für innere Stadtgebiete.

Der Spannungsverlust soll 1 V/km nicht überschreiten und überhaupt nicht mehr als 25 Volt erreichen.

Bei Fernbahnen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, mit allen Mitteln für die Herabsetzung des Schienenpotentiales überhaupt zu sorgen. Wiederholte zuverlässige Erdung der Schienen, sorgfältige Instandhaltung der Längs- und Querverbindner bildet hierfür eine Voraussetzung. Eine längs der Strecke verlegte, möglichst aus Kupfer hergestellte, bei jedem Mast mit den gut geerdeten Schienen verbundene Erdleitung ist für diesen Zweck geeignet.

Dieses Schutzverfahren ist gerade entgegengesetzt demjenigen, welches für Stadtgebiete zur Vermeidung von Stromableitungen und den hierdurch verursachten elektrolytischen Störungen zu empfehlen ist. Hierin liegt kein Widerspruch, indem durch tunlichst isolierte Verlegung des Oberbaues das Ein- bzw. Austreten der Streuströme in besser leitende Körper wie Gas- und Wasserleitungen vermieden wird, wobei es weniger in Betracht kommt, daß die Schienenspannung etwas größer wird, weil die Schiene den vollen Strom führt.

4. Die elektromagnetische Induktion. Das den stromdurchflossenen Leiter umkreisende Magnetfeld erzeugt dann, wenn es sich ändert, elektromotorische Kräfte in den von ihm geschnittenen Leitern. Die Wirkungen der elektromagnetischen Induktion können daher bei Gleichstrom nur bei sich genügend rasch vollziehenden Änderungen der Stromstärke auftreten. Tatsächlich verursachen auch Gleichstrombahnbetriebe im Telephon hörbare Stromwirkungen, die auf die groben Nutzungen der Anker und die damit verbundenen Schwankungen der Gegen-EMK und die Stromwendung zurückzuführen sind.

Auch Quecksilberdampfgleichrichter verursachen Störungen in den Schwachstromleitungen, weil sie einen pulsierenden Gleichstrom liefern.

Bei Wechselstrombetrieb ist stets ein der jeweiligen Stromstärke proportionales schwingendes Feld vorhanden, so daß die elektromagnetische Induktion als eine unvermeidliche Beigabe dieser Betriebsart anzusehen ist. Einpolig geführte Leitungen würden der Induktionswirkung uneingeschränkt unterliegen.

Schleifenleitungen sind eigentlich bifilare Wirkungen; es kann daher die elektromagnetische Induktion nur insofern Wirkungen erzielen, als der ideale bifilare Zustand nicht erreicht ist.

Um dies zu erzielen, müssen die Leitungen jeder Schleife systematisch verdrillt werden, damit jeder Draht genau gleich und entgegengesetzt der induktiven Beeinflussung unterliegt.

IV. Mechanische Eigenschaften der Leitung.

1. Allgemeines. Systeme. Die klaglose Stromabnahme zur Speisung des am Bahngleis in Bewegung befindlichen Fahrzeuges verlangt die Einhaltung bestimmter Regeln in der räumlichen Anordnung der Fahrleitung. Diese Anordnungen sind je nach der Bauart des Stromabnehmers verschieden.

Die Rolle ist wenig empfindlich für allgemeine Unregelmäßigkeiten der Drahtlage in bezug auf die Höhe und seitliche Abweichungen von der Bahnachse, obzwar die streng richtige Arbeitsweise der Rolle die volle Einhaltung der Bahnachse voraussetzt. Unvermittelte Richtungswechsel in der Höhenlage, insbesondere aber im Grundriß beschädigen dagegen die Leitung und verursachen Betriebsstörungen durch Entgleisung der Rolle. Eine sorgfältige Asteilung der Stützpunkte in den Krümmungen ist daher für diese Bauart von Wichtigkeit.

Der Schleifbügel und die Walze lassen in bestimmten Grenzen Abweichungen von der Bahnachse in wagerechter Richtung zu; zur gleichmäßigen Abnutzung der Schleifstücke ist eine Zickzackführung in der vollen Schleifbreite sogar eine Voraussetzung, so daß diese in geraden Strecken künstlich hergestellt werden muß. Der Bügel muß mit geringerem Berührungsdruck arbeiten wie die Rolle, um die Abnutzung durch gleitende Reibung einzuschränken. Er ist daher gegen Schwankungen in der Höhenlage sehr empfindlich. In noch höherem Maße gilt dies in Bezug auf die Walze. Der Bügel verlangt auch eine straffer gespannte Leitung als die Rolle, damit der Fahrdraht in etwa entstandenen Riefen der Schleifstücke nicht einläuft und Rillen zieht.

Zur Sicherung der einwandfreien Stromabnahme muß demnach beim Entwurf und beim Bau der Fahrleitung denjenigen Gesetzen Rechnung getragen werden, die für die Höhenlage — den Längsschnitt — und für die seitlichen Abweichungen von der Bahnachse in der Wagerechten — den Grundriß — maßgebend sind.

In den weiteren Betrachtungen wird angenommen, daß die Stützpunkte des Fahrdrahtes — die Drahthalter — im Raum unverrückbar festliegen, obzwar dieser Zustand weder erwünscht noch zulässig ist und der Praxis auch nicht entspricht. Die Untersuchungen bezüglich des Durchhangs werden sich demnach auf das Verhalten des Drahtes innerhalb der Spannweiten beschränken, wobei die oben gemachte Voraussetzung bezüglich der Stützpunkte den Wert der Ableitungen nicht beeinträchtigt, indem die Beweglichkeit der Stützpunkte im allgemeinen nur günstigere Beanspruchungen herbeiführen kann.

Die Berechnung einer Leitung hat sich demnach zu befassen mit

1. dem Längsschnitt. Die Temperatur und die Zugbeanspruchung sind für diesen in gegebenen Spannweiten maßgebend; der Durchhang ist die für das Verhalten der Leitung kennzeichnende Größe.

2. dem Lageplan; dieser wird bestimmt durch die erwünschten oder zulässigen Abweichungen von der Bahnachse, wobei die durch den Richtungswechsel in

Krümmungen der Leitung entstehenden radial gerichteten Zugkräfte gewisse, durch die Isolatorhalter und Stützpunkte bedingte Einschränkungen verursachen.

3. der Beanspruchung der Verspannung (Querdrähte),
4. der Beanspruchung und Bemessung der Stützpunkte.

2. Der Längsschnitt. (Durchhangberechnung.)

Literatur:

- Jüllig. Über die mechanische Beanspruchung elektrischer Luftleitungen. E.T.Z. 1899. H. 51.
- Otto. Berechnung des Drahtdurchhanges. E.T.Z. 1903. H. 3.
- Glinski. Zur Bestimmung des Durchhanges und der Spannung in Drähten. E.T.Z. 1903. H. 14.
- Sengel. Berechnung d. Durchhanges u. d. Spannung in frei gespannten Drähten. E.T.Z. 1903. H. 39.
- Poschenrieder. Bau u. Instandhaltung d. Oberleitungen elektr. Bahnen. R. Oldenbourg, München. 1904.
- Nicolaus. Über den Durchhang von Freileitungen. E.T.Z. 1907. H. 37.
- Dreisbach. Neue Methode zur Prüfung des Durchhanges von Freileitungen. E.T.Z. 1909. H. 50.
- Kohler. Deutsche und Wiener Sicherheitsvorschriften für Freileitungen. E. u. M. 1910. H. 13.
- Schauer. Spannung und Durchhang in Starkstromfreileitungen. E.K.B. 1910. H. 24.
- Weil. Beanspruchung und Durchhang von Freileitungen. Verl. Julius Springer, Berlin. 1910.
- Besser. Durchhang von Freileitungen. E.T.Z. 1910. H. 48.
- Müller. Methode zu graphischen Ermittlungen des Durchhanges von Drähten. E. u. M. 1911. H. 18.
- Coding-Brackett. Exp. und rechn. Ermittlung des Durchhanges von Leitungen. E.W. Sept. 1912.
- Pender-Thomson. The mechanical and electric characteristics of transmission lines. Proc. Juli 1911. E.W. Sept. 1912. Ref. E.u.M. 1912.
- Potin. Calcul à vue des lignes aériennes pour l'emploi de nomogrammes à points alignés. T.M. 1912. Nr. 8.
- Gesing. Drahtdurchhang und Querschnittsbemessung, sowie Bestimmung der Montagezüge für Hochspannungsfreileitungen. E.K.B. 1913. H. 20.
- Sumec. Graphische Bestimmung der Zugbeanspruchung von Freileitungen. E.T.Z. 1915. H. 26.
- Schwarzkopf. 110000 Volt Kraftübertragung in großer Gebirgshöhe. E.K.B. 1916. H. 33.
- Krzyzanowski. Über den Einfluß von Isolatorketten auf die Beanspruchung und den Durchhang im Spannfelde. E.u.M. 1917. H. 41.
- Kirsten. Transmission line design. Proc. 1917. Nr. 8.
- * * * Neue franz. Vorschläge zur mech. Berechnung von Freileitungen. [R.G.E.] 1921. H. 11. Ref. E.K.B. 1921. H. 8.
- Szilas. Über d. Durchhang v. Freileitungen. Z.d.Ung.Ing.u.Arch.V. 1917. Bd. II. Nr. 16. E.T.Z. 1919. H. 38.
- Seefehlner. Kollinear Rechentafel und Nomogramm zur Ermittlung von Spannung und Durchhang einer Freileitung bei veränderlicher Temperatur und veränderlichem Gewicht für beliebige Spannweite. E.u.M. 1919. H. 51. E.K.B. 1920. H. 3.
- Fetter. Die Zustandsgleichung eines Seilzuges und deren Auflösung vermittelst der collinearen Rechentafel. E.u.M. 1920. H. 47.
- Grothe. Durchhänge von Freileitungen. E.T.Z. 1920. Bd. 41. H. 16. Ref. E.u.M. 1920. H. 42.
- Singer. Rechentafel z. Bestimmung d. Spannung u. d. Durchhanges v. Freileitungen. E.u.M. 1920. H. 35.
- Wlach. Bestimmung des Durchhanges bei Kettenfahrleitungen und deren selbsttätige Nachspannung. E.T.Z. 1920. H. 18.
- Feuer. Berechnung gegliederter eiserner Gestänge für Freileitungen. E.T.Z. 1920. H. 37.
- Ott. Rechentafel zur Berechnung von Holzmasten für elektrische Freileitungen. E.u.M. 1920. H. 43.
- Edler. Hilfswerte zur Berechnung der Freileitungen. E.u.M. 1919. H. 48.
- Jobin. Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter. Sch.E.V.B. 1919. Nr. 7.
- Donath. Die Berechnung von Isolatorstützen. E.T.Z. 1920. H. 41 und 1921 H. 17.
- Edler. Aneisungsformeln. B.S.E.V. 1920. Nr. 8.
- Seidemann. Durchbiegung von Gittermasten. E.T.Z. 1920. H. 51.
- Hals. Berechnungsgrundlagen für das Spannen von Fernleitungen. Elektro-Industrie, Kristiania 1920. H. 7. Ref. E.u.M. 1921. H. 5.
- Zeulmann. Bewegungsvorgänge in Kettenfahrleitungen elektrischer Bahnen. E.K.B. 1921. H. 8. E.u.M. 1921. H. 22.
- Egg. Der einseitige Zug bei Freileitungen. B.S.E.V. 1920. Nr. 7. Ref. E.T.Z. 1921. H. 11.
- Fetter. Der Einfluß des Gewichtes der Abspannketten auf den Durchhang von Freileitungen. E.u.M. 1921. H. 24.
- Neubert. Zeichn. Berechnung von Fahrdrähtspannungen. V.T. 1921. H. 5/6.
- Schenkel. Die größtmögliche Spannweite bei Freileitungen. E.T.Z. 1921. H. 27.
- Heinemeyer. Formeln für die Durchbiegung von Gittermasten. E.T.Z. 1921. H. 30.
- * * * Oberleitungskonstruktionen an einer Zweigstrecke der St. Paulsbahn. E.R.J. 1921. Bd. 57. S. 637. Ref. E.T.Z. 1921. H. 24.

Der Fahrdräht oder bei Vielfachaufhängung das Tragseil unterliegen beide in gleicher Weise dem Gesetz, das für zwischen zwei Stützpunkten frei

gespannte Leitungen gilt. Nachdem weiters das Bahngestänge vielfach auch Speise- und Verstärkungsleitungen zu tragen hat, ist eine allgemeine Behandlung des Durchhangproblems am Platze. Die Sonderheiten der Fahrleitung ergeben sich an Hand dieser Untersuchungen von selbst.

Der Entwurf einer Leitungsanlage auf streng wissenschaftlicher Grundlage auch in mechanischer Beziehung ist ein wirtschaftliches Erfordernis und eine Notwendigkeit für die Sicherheit der Anlagen.

Die Sicherheit des öffentlichen Verkehrs verlangt eine kleinste Höhenlage der Leitung, die durch den größten Durchhang bei Schneelast oder infolge hoher Temperatur entsteht. Gibt man den Leitungen eine zu geringe Spannung beim Montieren, werden verhältnismäßig hohe Maste nötig. Spannt man dagegen die Leitungen zu straff, ist zu befürchten, daß bei niedrigen Temperaturen unzulässige Drahtbeanspruchungen entstehen, weiter verlangt eine derartig gespannte Leitung auch verhältnismäßig stärkere Eckmaste.

Dieses Problem hat in der Fachliteratur mehrfach eingehende und gründliche Behandlung in der Hauptsache mit dem Ziele erfahren, bequeme Rechenbehelfe zu schaffen, durch die der entwerfende Ingenieur der umständlichen und zeitraubenden Arbeit der mathematischen Lösung der jeweils vorliegenden Aufgabe enthoben wird.

Die bekannt gewordenen Rechenbehelfe bedienen sich Kurvenscharen (Weil, Sumec), die mit auf einem Deckblatt befindlichen Raster in entsprechenden Zusammenhang gebracht werden müssen.

Diese Rechenbehelfe weisen den für den praktischen Gebrauch nicht belanglosen Mangel auf, daß sie sich Kurven bedienen, die mit einfachen zeichnerischen Mitteln — Zirkel und Lineal — nicht hergestellt werden können.

Die Verwendbarkeit dieser Diagramme hört auch meist auf, wenn die einzuhaltenden Bauregeln auf andere Vorschreibungen übergehen. Schließlich muß von einem allgemein brauchbaren Behelf verlangt werden, daß, wenn es besondere Verhältnisse in bezug auf Größenordnung, Baubedingungen (z. B. Leitungen in Tropen oder Polargegenden, im Hochgebirge, Fahrleitungen, Kettenwerk) verlangen, sich jedermann den Rechenbehelf selbst unschwierig herstellen kann.

Zu diesem Zwecke gelangen hier die zeichnerischen Rechenbehelfe der Nomo-graphie nach der Methode von M. d'Ocagne in Anwendung, die in dem am Schlusse des Werkes beigefügten Anhang in einer für den vorliegenden Zweck geeignet erscheinenden geometrischen Form abgeleitet werden.

Grundgleichungen. Ein gewichtsloses, mit einer Anzahl lotrechter Kräfte beanspruchtes Seil oder ein ebensolcher Draht nimmt im Gleichgewichtszustand die Gestalt eines Seilpolygons an.

Das Seilpolygon ist im Gleichgewicht, wenn die Summe der Projektionen aller Kräfte auf zwei zueinander senkrechten Richtungen gleich Null ist.

Entsprechend der Abb. 18 wird im Zustand des Gleichgewichtes

$$H_1 = H_2$$

und

$$V_1 + V_2 = P_1 + P_2 + P_3.$$

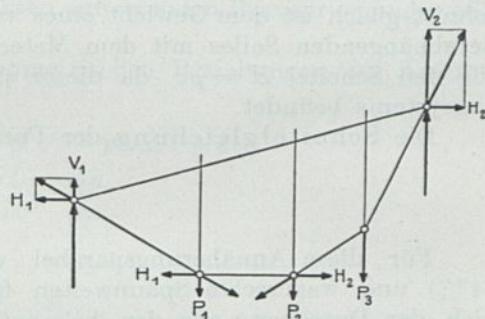


Abb. 18. Kräfteplan für einen zwischen zwei Stützpunkten gespannten, mit drei Gewichten belasteten gewichtslosen Faden.

Die wagrechten Kräfte sind gleich groß und entgegengesetzt; wäre dies nicht der Fall, könnte kein Gleichgewichtszustand eintreten, bzw. müßte eine Verformung erfolgen, bis der Zustand

$$H_1 = H_2$$

erreicht ist. Die in einer wagrechten Polygonseite herrschende Spannung ist gleich der wagrechten Teilkraft, die überhaupt die kleinste in dem System vorkommende Spannung darstellt.

Die Summe der senkrechten Kräfte (V) ist gleich dem Gesamtgewicht.

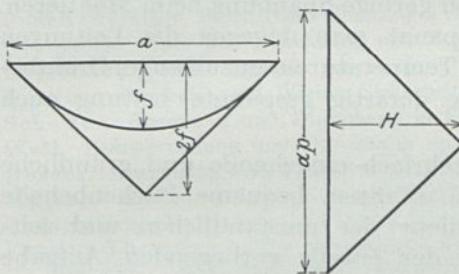


Abb. 19. Kräfteplan der Parabel der zwischen zwei Stützpunkten frei gespannten Leitung mit p kg/m Eigengewicht.

Durch gleichmäßige Lastverteilung wird das Seilpolygon zur Kettenlinie (Abb. 19).

Für die praktisch in Betracht kommenden Fälle ist die Annahme zulässig, daß die Belastung längs der Bogenlänge gleichmäßig verteilt ist. Diese Belastung sei p kg/m, gleichgültig, ob sie durch das stoffliche Eigengewicht der gespannten Leitung oder durch eine zusätzliche Belastung verursacht wird.

Nachdem mit der Gleichung der Kettenlinie

$$y = \frac{e}{2} \left(e^{\frac{x}{c}} + e^{-\frac{x}{c}} \right) \dots \quad (1)$$

unbequem zu arbeiten ist, setzt man an ihre Stelle eine Parabel, die den ersten zwei Gliedern der aus obiger Gleichung entwickelten Reihe entspricht. Für diese lautet die Gleichung

$$y = c + \frac{x^2}{2c}$$

wo c den Parameter bedeute.

Nachdem für die Kettenlinie das Gesetz gilt, daß der Zug in jedem Querschnitt gleich ist dem Gewicht eines vom betrachteten Punkt bis zur Leitlinie frei herabhängenden Seiles mit dem Metergewicht p kg, so gilt allgemein $S = py$ und für den Scheitel $H = pc$, da dieser sich in der Höhe c von der Abszisse des Bezugssystems befindet.

Die Scheitelgleichung der Parabel nimmt die Form

$$\eta = \frac{\xi^2}{2c} \text{ an.}$$

Für diese Annäherungsparabel, die für verhältnismäßig kleine Durchhänge (4%) und wagerechte Spannweiten fast mit der Kettenlinie übereinstimmt, läßt sich der Durchhang aus den bekannten Parabeleigenschaften unter Verwertung der der Abb. 19 zu entnehmenden geometrischen Beziehungen ableiten.

$$\frac{2f}{a} = \frac{ap}{2} \cdot \frac{2}{H}.$$

Hier bedeutet a die Spannweite und f den Durchhang in m. Somit

$$f = \frac{a^2 p}{8H}.$$

Wenn die wagerechte Teilkraft gleich der Seilspannung gesetzt wird,

$$H \approx S = q\sigma,$$

wo q den Leiterquerschnitt in mm^2 und σ die Drahtspannung für das mm^2 bedeutet, wird für die Parabel

$$f = \frac{a^2 p}{8 q \sigma} \text{ m}$$

oder

$$f = 12,5 \frac{a^2 p}{q \sigma} \text{ cm.}$$

Führt man für das kilometrische Gewicht von 1 mm^2 Querschnitt der Leitung das Symbol γ ein, dessen Zahlenwert dann identisch mit dem spezifischen Gewicht in kg/dm^3 wird, so ist

$$\gamma = \frac{1000 p}{q} \quad \text{und} \quad f = \frac{a^2 \gamma}{80 \sigma} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

Durch Einführung des Begriffes des kilometrischen Gewichtes für die Einheit des Querschnittes wird eine einheitliche Behandlung aller Aufgaben für die Fälle, daß nur Eigengewicht vorhanden ist oder daß man auch mit einer gleichmäßig verteilten Zusatzlast durch Winddruck oder Vereisung zu rechnen hat, ermöglicht.

Für die weitere Behandlung des Problems erweist es sich als zweckmäßig, statt des absoluten Wertes des Durchhanges den in bezug auf die Spannweite verhältnismäßigen Wert φ in $\%$ einzuführen.

In mathematisch-technischer Beziehung hat die Einführung des verhältnismäßigen Durchhanges in $\%$ als Rechnungsgröße den außerordentlichen Vorteil, daß der Grad aller Gleichungen, wo a sonst im Quadrat vorkommt, auf eine lineare Beziehung zurückgeführt wird.

Es wird dann $f = a\varphi$ und

$$\varphi = \frac{a\gamma}{80 \sigma} \quad \dots \dots \dots \quad (2a)$$

Die Höchstbeanspruchung wurde gleich der Seilspannung im Scheitel gesetzt und angenommen, daß diese an sich kleinste Beanspruchung der Leitung sich nicht wesentlich von den größten an den Stützpunkten auftretenden Beanspruchungen (S) unterscheidet.

Der Beweis läßt sich auf Grund der geometrischen Beziehungen des Kräfteplanes der Stützpunkte erbringen. Es gilt

$$S = \sqrt{V^2 + H^2} = \sqrt{p^2 L^2 + p^2 c^2} = p \sqrt{L^2 + c^2}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V}{H} = \frac{p L}{p c} = \frac{d y}{d x}$$

daher

$$L = c \frac{d y}{d x}.$$

Nachdem die Bogenlänge der Kettenlinie durch die bekannte Gleichung bestimmt ist

$$L = \frac{c}{2} \left(e^{\frac{x}{c}} - e^{-\frac{x}{c}} \right)$$

und die allgemeine Gleichung der Kettenlinie

$$y = \frac{c}{2} \left(e^{\frac{x}{c}} + e^{-\frac{x}{c}} \right)$$

lautet, wird

$$y^2 = L^2 + C^2,$$

somit

$$S = p y,$$

d. h. der Zug S in irgendeinem Punkte der Leitung ist proportional der Ordinate.

Unveränderten Querschnitt für die gespannte Leitung angenommen, gilt daselbe für die Drahtspannung:

$$\sigma = \frac{\gamma}{1000} y, \quad \text{da } S = q\sigma$$

$$y = C + \eta,$$

für den Stützpunkt wird

$$y = C + f$$

daher

$$\sigma_1 = \frac{\gamma}{1000} c + \frac{\gamma}{1000} f$$

$$\sigma_1 = \sigma + \frac{\gamma}{1000} f$$

wo f in m einzusetzen ist.

Es sei $\sigma = 12 \text{ kg}$; $\gamma = 35,3$ (für 16 mm^2 Kupferseil mit Eislast) und $f = 6 \text{ m}$ (d. s. $3,3\%$ bei einer Spannweite von 200 m), so wird

$$\frac{\gamma f}{1000} = \frac{35,3 \cdot 6}{1000} = 0,212 \text{ kg} = 1,77\%.$$

Da vorstehendes Beispiel eine ungewöhnlich ungünstige Annahme behandelt und die Änderung der Scheitelspannung bis zu den Stützpunkten nur $1,77\%$ erreicht, erscheint es erwiesen, daß es zulässig ist, mit der der wagerechten Teilkraft des Seilzuges entsprechenden Spannung zu rechnen.

Für die Bogenlänge l (m) der Parabel gilt

$$l = a + \frac{8}{3} \frac{f^2}{a} 10^{-4} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$l - a = Al = \frac{8}{3} \frac{f^2}{a} 10^{-4}$$

bzw. unter Einführung des Symbols φ

$$l = a \left(1 + \frac{8}{3} \varphi^2 10^{-4} \right) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3a)$$

Diese Beziehungen dienen als Grundlage, um das Verhalten der Leitung bei veränderlichen Temperaturen, verschiedenen Belastungen und gegebenen Drahtbeanspruchungen zu bestimmen.

Die allgemeine Zustandsgleichung. Beim Bau einer Leitung bildet die in der Regel vorkommende niedrigste Temperatur t den Ausgangspunkt der Berechnung, bei welcher die für den verwendeten Baustoff erlaubte Beanspruchung nicht überschritten werden darf. Die Sicherheitsvorschriften der mitteleuropäischen Länder schreiben -20 bis -25°C als tiefste Temperatur vor, verlangen andererseits, daß die Leitung auch bei einer Eislast, die in Österreich durch die empirische Formel $180 \sqrt{d}$ gramm/meter (ebenso in Deutschland) gegeben ist, bei -5°C nicht stärker beansprucht werde.

Nachdem es praktisch unmöglich ist, beim Bau der Leitung diejenigen durch Kälte oder Eislast gegebenen Verhältnisse herzustellen, auf welchen die genannten Vorschriften fußen, müssen auf rechnerischem Wege diejenigen Drahtspannungen und Durchhänge ermittelt werden, die der jeweils herrschenden Temperatur entsprechen und mit welchen die Leitung verlegt werden muß, damit in den betrachteten ungünstigen Belastungsfällen die zulässige Beanspruchung nicht überschritten werde.

Die Herstellung möglichst allgemein verwendbarer bequemer Behelfe für diese Zwecke ist das Ziel zahlreicher Bemühungen. Die deutschen Sicherheitsvorschriften enthalten z. B. für Kupfer die diesbezüglichen Angaben in tabellarischer Übersicht. Tabellen wie Kurvenscharen kranken an dem Übelstand, daß Werte nur für eine

beschränkte Zahl der möglichen Fälle gegeben werden können. Man muß daher oft zwischenschätzen, worunter die Genauigkeit leidet.

Derartige Rechenbehelfe sind notwendig, weil das Verhalten der Leitung von mehreren Faktoren beeinflußt wird; die mathematische Behandlung jedes einzelnen Falles ist daher sehr umständlich und zeitraubend.

Eine freigespannte Leitung dehnt sich aus oder zieht sich zusammen unter dem Einfluß des Temperaturwechsels, ebenso wenn sich aus dieser Ursache oder durch Vermehrung der Last oder der Zugspannung die Beanspruchung je mm^2 des Querschnittes ändert.

Die geometrische Längenänderung innerhalb der Elastizitätsgrenze ist gleich der physikalischen Längenänderung, die durch die Änderung der Temperatur (dt) und die Änderung der Seilspannung ($d\sigma$) verursacht wird, somit

$$dl = \alpha l dt + \frac{100}{E} d\sigma \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

wo l die Drahlänge in m,

α die lineare Ausdehnungszahl der Wärme,

E den Elastizitätsmodul kg/cm^2 bedeutet.

In diese Gleichung darf die unter den praktisch obwaltenden Verhältnissen zulässige Annäherung, daß die Spannweite (a) gleich der Bogenlänge (l) ist,

$$a \approx l$$

eingeführt werden, wodurch die Gleichung in die Form

$$dl = \alpha a dt + \frac{100}{E} d\sigma \quad \dots \dots \dots \quad (4a)$$

übergeht.

Laut Gleichung 3a ist die geometrische Längenänderung

$$dl = \frac{16}{3} \cdot 10^{-4} a \varphi d\varphi$$

und laut Gleichung 2a

$$d\sigma = \frac{a}{80} d\frac{\gamma}{\varphi},$$

daher

$$\frac{16}{3} \cdot 10^{-4} a \varphi d\varphi = \alpha a dt + \frac{100 a}{80 E} d\frac{\gamma}{\varphi}$$

und

$$dt = \frac{16}{3} 10^{-4} \frac{\varphi}{\alpha} d\varphi - \frac{1,25 a}{E \alpha} d\frac{\gamma}{\varphi}.$$

Integriert man von der dem Anfangszustand entsprechenden Temperatur t_0 bis t und für den verhältnismäßigen Durchhang φ_0 bis φ , wird

$$t - t_0 = \frac{267}{\alpha} (\varphi^2 - \varphi_0^2) 10^{-6} + 1,25 \frac{a}{E \alpha} \left(\frac{\gamma_0}{\varphi_0} - \frac{\gamma}{\varphi} \right) \quad \dots \dots \quad (5)$$

oder wenn $\gamma = \text{const.}$

$$t - t_0 = \frac{267}{\alpha} (\varphi^2 - \varphi_0^2) 10^{-6} + 1,25 \frac{a \gamma}{E \alpha} \left(\frac{1}{\varphi_0} - \frac{1}{\varphi} \right) \quad \dots \dots \quad (5a)$$

Da

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{80 \cdot \sigma}{a \cdot \gamma},$$

so gilt auch für unveränderliches γ weiters:

$$t - t_0 = \frac{267}{\alpha} (\varphi^2 - \varphi_0^2) 10^{-6} + \frac{100}{E \alpha} (\sigma_0 - \sigma) \quad \dots \dots \quad (5b)$$

Für die gebräuchlichen Baustoffe kommen nachstehende Festwerte in Betracht:
Tabelle 1.

Baustoff:	α	$\gamma \frac{\text{kg/mm}^2}{\text{km}}$	$E \text{ kg/cm}^2$	$E \alpha$	$\sigma \text{ kg/mm}^2$
Kupfer	17,0 10 ⁻⁶	8,90	1,300 10 ⁶	22,1	12—16
Aluminium . . .	23,0 " "	2,75	0,715 " "	16,4	7—9
Leitungseisen .	12,3 " "	7,79	2,000 " "	24,6	15
Stahl	11,0 " "	7,95	2,200 " "	24,2	30
Bronze	16,6 " "	8,65	1,300 " "	21,6	—

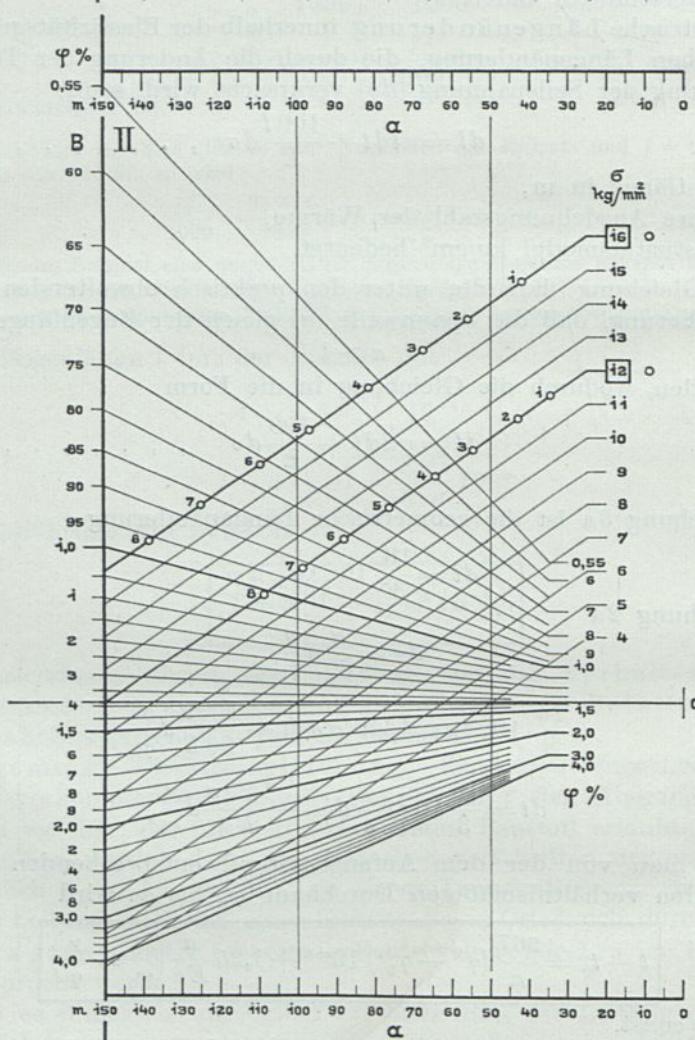
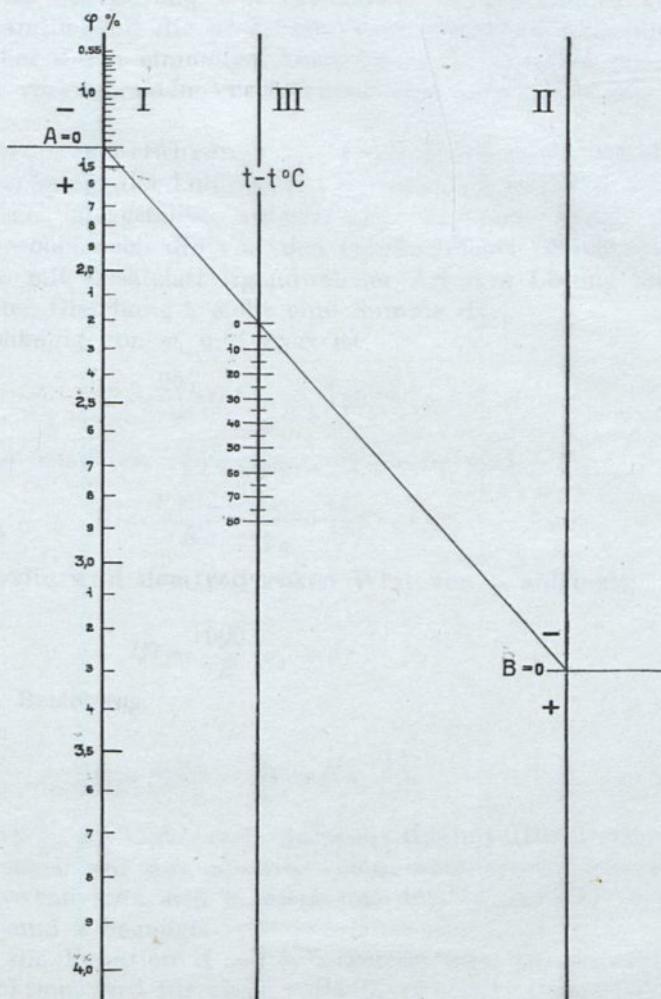


Abb. 20. Fluchtlinien-Rechentafel für die allgemeine Zustandsgleichung einer zwischen zwei Stützpunkten frei gespannten Leitung. Baustoff: Kupferdraht und -Seil.

Setzt man die obigen Festwerte in die Gleichung 5a ein, erhält man für die verschiedenen Baustoffe folgende Beziehungen:

Kupfer:	$t - t_0 =$	$15,7 (\varphi^2 - \varphi_0^2) + 0,503 a \left(\frac{1}{\varphi_0} - \frac{1}{\varphi} \right)$
Aluminium:	"	11,6 " 0,209 "
Eisen:	"	21,7 " 0,395 "
Stahl:	"	24,3 " 0,411 "
Bronze:	"	16,1 " 0,501 "



Deckblatt zur Rechentafel Abb. 20.

Ausgehend von einem durch die Temperatur t_0 , den Durchhang φ_0 und die Beanspruchung σ_0 bestimmten Anfangszustande kann man mit Hilfe der Gleichungen 5, 5a und 5b für jeden verhältnismäßigen Durchhang die Temperatur und die Drahtspannung berechnen.

Da t die unabhängige Veränderliche ist, ist die Aufgabe in Wirklichkeit umgekehrt gestellt. Man hat für gegebene Temperaturunterschiede die Durchhänge und Spannungen zu berechnen.

Diese Aufgabe setzt die Lösung einer Gleichung dritten Grades voraus; ein Vorgang, dessen Umständlichkeit die praktische Verwendbarkeit ausschließt.

Man hilft sich daher durch einmalige Ausrechnung in Tabellen oder Kurvenscharen für die meist vorkommenden Verhältnisse und interpoliert für zwischenliegende Fälle.

Zeichnerische Rechenverfahren zur Lösung der allgemeinen Zustandsgleichung. Das System der kollinearen Rechentafeln (Parallel-Koordinaten) bietet ein einfaches Mittel, die gestellte Aufgabe ganz allgemein, genau und restlos zeichnerisch zu lösen, wobei auch die von den gebräuchlichen Vorschriften vorgeesehenen Belastungsfälle mit Zusatzlast irgendwelcher Art ihre Lösung finden.

Die rechte Seite der Gleichung 5 stellt eine Summe dar.

Jedes Glied ist abhängig von φ , und zwar ist

$$A = \frac{267}{\alpha} (\varphi^2 - \varphi_0^2) 10^{-6}$$

bei einem gegebenen Baustoff bzw. Drahtlast nur von φ , und

$$B = \frac{1,25 a \gamma}{E \alpha} \left(\frac{1}{\varphi_0} - \frac{1}{\varphi} \right)$$

linear von der Spannweite und dem reziproken Wert von φ abhängig.

Es gilt auch

$$B = \frac{100}{E} (\sigma_0 - \sigma)$$

gleichfalls eine lineare Beziehung.

Die Teilfunktionen

$$A = f(\varphi^2) \quad B = f\left(a, \frac{1}{\varphi}\right)$$

sind mit einfachen Mitteln zu lösen. Die Aufgabe wird mit Hilfe einer aus drei parallelen Achsen, demnach nur aus geraden Linien bestehenden Fluchtlinientafel, Abb. 20, lösbar, wenn man sich in dieser mit der Darstellung vorläufig von zwei Veränderlichen φ und t begnügt.

Die Achse I trägt die Funktion $A = f(\varphi^2)$, kotiert wird das Argument φ , die Achse II für die B -Funktion wird für einen vorläufig zweckdienlich gewählten Festwert für die Spannweite (a) mit dem Argument φ kotiert, jedoch entsprechend der Funktion $B = f\left(\frac{1}{\varphi}\right)$ geteilt. Die Mittelskala erhält eine gleichmäßige Teilung, da

$C = t - t_0$ eine lineare Beziehung darstellt. Jede je zwei gleiche Werte von φ (auf den Skalen I und II) verbindende Suchlinie trennt auf der Skala III die den Durchhangsänderungen entsprechenden Temperaturunterschiede $\Delta t = t_1 - t_2 = C$ ab.

Da die B -Funktion von der Spannweite linear abhängt, muß für jede Spannweite eine neue Skala erstellt werden. Hierzu eignet sich eine, anschließend an die Skala II gezeichnete Strahlenskala.

*) E.T.Z. 1907, S. 901.

**) E.T.Z. 1914, S. 1109.

Die Geraden des Strahlenbündels entsprechen der Grundgleichung

$$\varphi = \frac{a\gamma}{80\sigma} \quad \dots \dots \dots \quad (2a)$$

Für jede Gerade hat φ einen bestimmten unveränderlichen Wert. Die den einzelnen Spannweiten entsprechenden Ordinaten bilden die B - bzw. φ -Skala für diese Spannweite.

Um die zusammengehörigen Werte f und t für eine beliebige Spannweite ablesen zu können wird die Summenrechentafel am besten auf ein durchsichtiges Blatt gezeichnet, dieses kann mit der II-er Achse auf die jeweils in Betracht kommende Spannweite der Netztafel gesetzt werden.

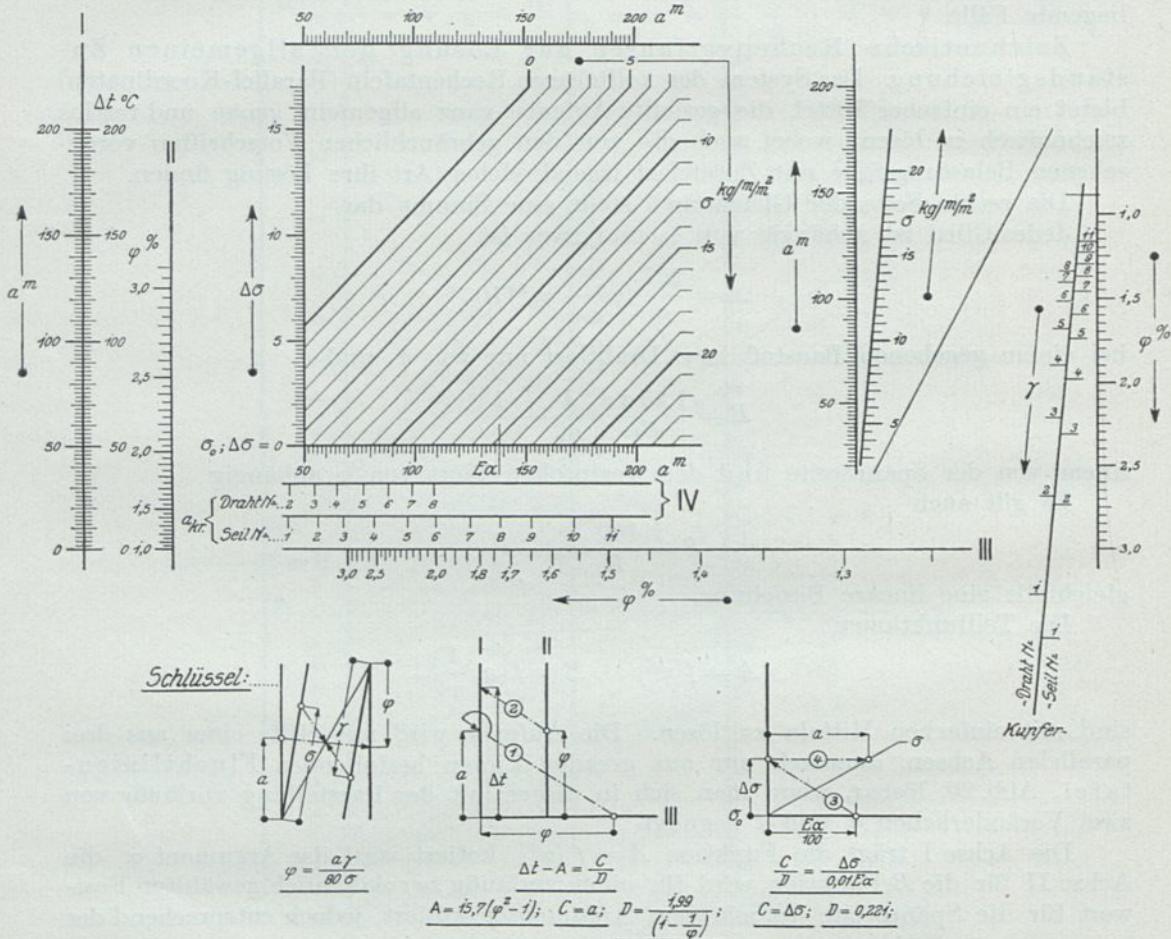


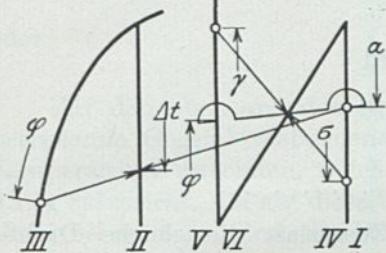
Abb. 21. Fluchlinien-Rechentafel für die allgemeine Zustandsgleichung einer zwischen zwei Stützpunkten freigespannten Leitung. Baustoff: Kupferdraht und -Seil.

Stellt man die Werte von B für bestimmte Werte von σ dar, erhält man die in der Rechentafel dargestellte parallele Geradenschar, die für jede Spannweite und den zugehörigen Durchhang für bestimmte Werte die Beanspruchung gibt.

Will man die Zerlegung der Rechentafel in zwei Behelfe vermeiden, kann man zur Lösung der allgemeinen Zustandsgleichung 5 noch andere Achsensysteme heranziehen. Abb. 21 stellt eine Verhältnistafel und Abb. 22 Fluchlinientafeln mit einem krummlinigen Skalenträger dar.

Änderung des Leitungsgewichtes (Eislast). Die Verwendbarkeit der hier abgeleiteten Rechentafeln beschränkt sich nicht auf die Lösung der Aufgabe: wie ändert sich die Drahtspannung und der Durchhang bei geänderter Temperatur. Wäre dies

Schlüssel zu Abb. 22.



der Fall, könnte dem nomographischen Rechenverfahren keine Überlegenheit gegenüber anderen Methoden zugesprochen werden.

Die geltenden Vorschriften verlangen den Nachweis der Sicherheit der Leitung unter dem Einfluß einer Eislast. Die gleiche Aufgabe liegt vielfach bei der Auslegung von Kettenfahrleitungssystemen vor, wo das Kettenwerk als gleichmäßig verteilte Belastung des Tragseiles angesehen werden kann.

Die Grundgleichung 5 berücksichtigt auch den Fall der Veränderung der Drahtlast und die hierdurch bewirkte Änderung der Beanspruchung.

Für die Drahtspannung σ gilt

$$\sigma = \frac{a\gamma}{80\varphi} \quad \dots \quad (2a)$$

Der Zusammenhang zwischen zwei durch verschiedene Drahtbelastungen verursachten Drahtspannungen bzw. bei gleichen Drahtspannungen zwischen verschiedenen Durchhängen läßt sich aus obiger Grundgleichung ableiten.

Die Spannungen sind gleich, wenn

$$\frac{a\gamma_e}{80\varphi_e} = \frac{a\gamma_0}{80\varphi_0}$$

somit

$$\varphi_e = \varphi_0 \frac{\gamma_e}{\gamma_0},$$

wo γ_e die geänderte Seilbelastung und φ_e den zugehörigen Durchhang bedeutet.

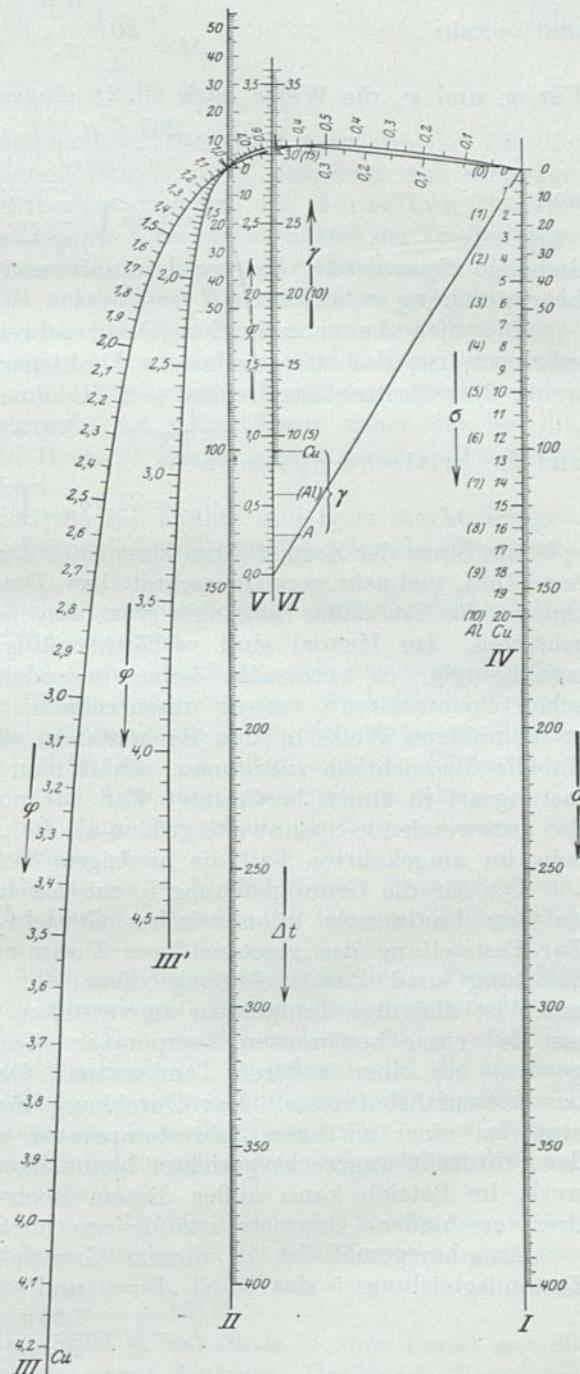


Abb. 22.
Fluchtlinienrechentafel für die allgemeine Zustandsgleichung einer freigespannten Leitung.
Baustoff: Kupfer (III), Aluminium (III').

Da

$$\frac{\gamma_e}{\varphi_e} = \frac{\gamma_0}{\varphi_0},$$

wird in diesem Fall das zweite Glied der Grundgleichung 5

$$B = 0$$

und hieraus

$$\Delta t = \frac{267}{\alpha} (\varphi_e^2 - \varphi_0^2) 10^{-6}.$$

Für φ_e und φ_0 die Werte nach Gl. 2a eingesetzt, wird

$$\Delta t = \frac{267}{\alpha} \left(\frac{\alpha}{80 \sigma} \right)^2 \left(\gamma_e^2 - \gamma_0^2 \right) 10^{-6}$$

und

$$a_{kr} = 4,9 \sigma \sqrt{\frac{\alpha \Delta t 10^6}{\gamma_e^2 - \gamma_0^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

diejenige Spannweite, bei welcher mit und ohne Zusatzlast die gleiche Drahtbeanspruchung entsteht.

Die Sicherheitsvorschriften (Oest.) schreiben z. B. vor, daß der Nachweis zu erbringen ist, daß die zugelassene Drahtspannung bei -5°C und Eislast ebenso wenig überschritten ist wie bei -25°C ohne Eislast. In diesem Fall ist

$$\Delta t = t_e - t_0 = (-5^\circ) - (-25^\circ) = +20^\circ$$

und die kritische Spannweite

$$a_{kr} = 21,9 \sigma_{max} \sqrt{\frac{\alpha 10^6}{\gamma_e^2 - \gamma_0^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (7a)$$

γ_e ist im Sinne der Formel (Zusatzlast $180 \sqrt{d} \text{ g/m}$) der Sicherheitsvorschriften keine feste Zahl, vielmehr vom Querschnitt bzw. Drahtdurchmesser abhängig. Die kritische Spannweite ist daher abhängig von den jeweils in Betracht kommenden Querschnitten. Im Handel sind verhältnismäßig wenige Draht- bzw. Seilquerschnitte marktgängig; es verursacht keine besonderen Umstände, für diese die „kritischen Spannweiten“ vorweg auszurechnen. Vermerkt man diese in irgendeiner zweckmäßigen Weise in den Rechentafeln oder faßt man diese Angaben in einer Tabelle übersichtlich zusammen, erhält man sofort Aufschluß darüber, welche Belastungsart in einem bestimmten Fall zur ungünstigeren Beanspruchung führt. Ist die anzuwendende Spannweite größer als die „kritische“, wird die Eislast maßgebend sein, im umgekehrten Fall die niedrigste Temperatur.

Die für die Grundgleichung 5 entwickelten Rechentafeln beziehen sich jeweils auf ein bestimmtes kilometrisches Gewicht des in Frage stehenden Baustoffes. Zur Feststellung des gesetzmäßigen Zusammenhangs der Durchhänge mit Eigenbelastung und Zusatzbelastung dient die äquivalente Temperatur. Hierunter ist diejenige Temperatur zu verstehen, bei welcher die Leitung mit Zusatzlast bei einer bestimmten Temperatur ebenso durchhängt, wie mit dem Eigengewicht bei einer anderen Temperatur. Der letztere Fall interessiert besonders bei Kettenfahrleitungen. Der Durchhang des das ganze System tragenden Seiles muß bei einer mittleren Jahrestemperatur ein bestimmtes Maß betragen, damit der Fahrdräht wagerecht gerichtet bleibt. Aufgelegt wird das Tragseil ohne Kettenwerk, im Betrieb kann außer diesem noch eine Eislast hinzutreten. Es müssen drei verschiedene Gewichtszustände errechnet werden.

Annahmegemäß ist in diesem Grenzfall $\varphi_z = \varphi_0$ daher in der allgemeinen Zustandsgleichung 5 das Glied $A = 0$ und

$$t_z - t_0 = \frac{1,25 \alpha}{E \alpha \varphi} (\gamma_0 - \gamma_z) \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

oder

$$t_z - t_0 = \frac{100}{E \alpha} (\sigma_z - \sigma_0) \quad \dots \dots \dots \quad (8a)$$

$$\Delta t_{z0} = \frac{100 \sigma_{max}}{E \alpha} \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma} \right).$$

Für den in den Sicherheitsvorschriften vorgesehenen Fall ist

$$t_z = -5^\circ \text{ und } t_{kr} = t_0$$

die kritische Temperatur.

$$t_{kr} = \frac{1,25a}{E\alpha\varphi}(\gamma_z - \gamma_0) - 5^\circ \quad \dots \dots \dots \quad (8b)$$

oder

$$t_{kr} = \frac{100\sigma_{max}}{E\alpha} \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_z}\right) - 5^\circ.$$

Für den oben angedeuteten Fall des Kettenwerkes wird man von der für die betreffende Gegend maßgebenden mittleren Temperatur t_z ausgehen und diejenige Temperatur t errechnen, welche dem unbelasteten Seil für denselben Durchhang entspricht. Da auf diese Weise der absolute Wert eines Punktes der Temperaturskala bekannt ist, sind die Durchhänge und Montagezüge für alle anderen Temperaturen aus der für das unbelastete Seil ausgelegten Rechentafel zu entnehmen.

Für gewöhnliche selbsttragende Leitungen liegen die den verschiedenen Querschnitten entsprechenden „kritischen“ Temperaturen ein für allemal fest, sofern die Beanspruchungen gegeben sind, indem die Temperatur der Eislast im Sinne der Sicherheitsvorschriften mit -5°C festgesetzt ist. Man kann daher die für die wenigen marktgängigen Querschnitte in Betracht kommenden kritischen Temperaturen den Rechentafeln fallweise beifügen.

Zahlenbeispiele. In Tabelle I sind die für Drähte und Seile marktgängigen Regelquerschnitte sowie die für die gebräuchlichen Baustoffe geltenden Festwerte zusammengefaßt.

Die Tabelle II enthält die der Eislast entsprechenden spez. Gewichtszahlen, dann die kritischen Spannweiten und Temperaturen.

Diesen Angaben ist zu entnehmen, daß die Mastlänge sich nur beim Kupferseil Querschnitt Nr. 1 und 2 nach der Eislast bestimmt, weil die kritische Temperatur nur bei diesen zwei Querschnitten größer als die in den Sicherheitsvorschriften vorgesehenen Höchsttemperatur von $+40^\circ\text{C}$ ist. In allen anderen Fällen wird demnach der Leistungsdurchhang bei $+40^\circ\text{C}$ besonders zu ermitteln sein.

Es sei eine Kupfer-Drahtleitung mit dem Querschnitt Nr. 2 $q = 25 \text{ mm}^2$ für Höchstspannweiten $a = 80 \text{ m}$ zu entwerfen.

$a_{kr} = 43,0 \text{ m} < 80$ somit gibt die Eislast bei -5° die höchste Beanspruchung.
 $t_{kr} = 31,1^\circ\text{C} < 40^\circ\text{C}$ der größte Durchhang entsteht bei letzterer Temperatur und nicht bei der Eisbelastung.

Der Draht soll höchstens mit $\sigma = 12 \text{ kg/mm}^2$ beansprucht werden. Frage: Mit welcher Spannung ist der Draht bei $+10^\circ\text{C}$ zu verlegen? Benutzt man die krummlinige Rechentafel Abb. 22, so findet man für $\sigma = 12$, $\gamma_e = 26,8$ und $a = 80$, $\varphi = 2,23\%$.

Von diesem Wert auf der krummlinigen Skala III ausgehend gibt die zu dem Punkt $a = 80$ auf Skala I gezogene Suchlinie in ihrem Schnittpunkt mit der Skala II (Temperaturlinie) denjenigen Punkt, dem die kritische Temperatur — in diesem Fall $+31,1^\circ\text{C}$ — d. h. diejenige Temperatur zuzuordnen ist, bei welcher der eisfreie Draht ebenso tief durchhängt wie unbelastet.

Von diesem Punkt (Skala II) $31,1 - 10 = 21,1^\circ\text{C}$ Teilstriche abtragend, findet man denjenigen Punkt der Temperaturskala, durch den der von $a = 80 \text{ m}$ gezogene Index auf Skala III den gesuchten Wert

$$\varphi = 1,94\% \text{ für } t = +10^\circ\text{C}$$

anzeigt. Der hierauf von der Kote $\varphi = 1,94\%$ auf Skala V zum Punkt $a = 80$ gezogene Index gibt auf der Hilfsachse ein neues Zentrum. Der durch dieses von $\gamma = 8,9$ gezogene Index weist auf Skala IV den gesuchten Wert

$$\sigma = 4,65 \text{ kg/mm}^2$$

an. Ebenso findet man, daß die Leitung bei -25°C mit $\varphi = 1,483\%$ durchhängt und $\sigma = 6,1 \text{ kg/mm}^2$ wird.

Tabelle II.

Quer-schnitt Nr.	Quer-schnitt mm ²	Durchmesser		K u p f e r $\gamma = 8,9$						Aluminium		
		Draht	Seil*	Draht: $\sigma = 12 \text{ kg/mm}^2$			Seil: $\sigma = 16 \text{ kg/mm}^2$			$\gamma = 2,9$, $\sigma = 7 \text{ kg/mm}^2$	a_{kr}	t_{kr}
1	16	4,5	5,2	32,75	34,5	34,4	35,3	42,2	49,2	29,3	25,3	27,0
2	25	5,7	6,5	26,80	43,0	31,1	27,3	56,0	43,8	21,3	35,0	25,8
3	35	6,7	7,7	22,15	54,5	27,6	23,2	67,5	39,6	17,2	43,5	24,6
4	50	8,0	9,2	19,00	64,5	23,9	19,8	81,7	34,9	13,8	54,5	23,1
5	70	9,4	10,9	16,80	76,2	20,3	17,4	97,0	30,4	11,4	67,0	21,5
6	95	11,0	12,7	15,20	88,0	17,5	16,0	109,5	27,2	10,0	77,5	20,3
7	120	—	14,2	14,15	98,6	15,2	14,6	125,0	23,3	8,7	90,5	18,7
8	150	—	15,9	13,35	108,5	13,0	13,7	138,4	20,4	7,7	103,5	17,2
9	185	—	17,7	—	—	—	13,0	152,3	18,2	7,0	116,0	15,9
10	240	—	20,1	—	—	—	12,3	172,0	15,1	6,3	132,8	14,2
11	310	—	22,9	—	—	—	11,7	189,5	12,4	5,7	150,0	12,5

Einen besonderen Fall bildet die selbsttragende Straßenbahnfahrleitung, bei welcher die Wahl der Spannweite nicht in Betracht kommt, indem diese aus

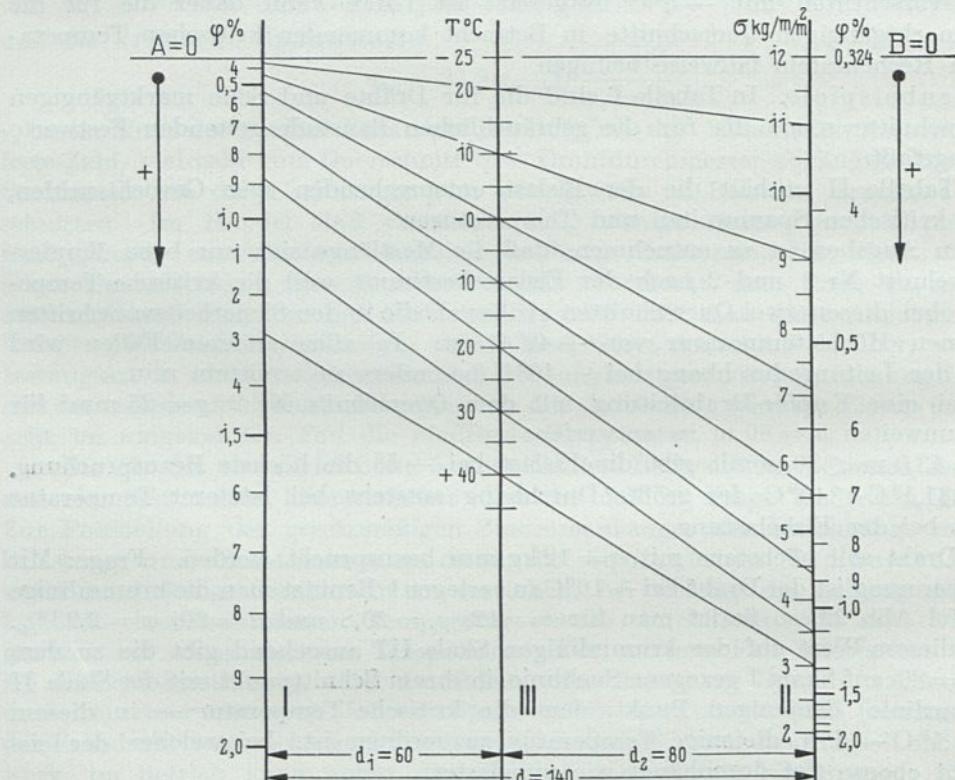


Abb. 23. Rechentafel für Bestimmung der Montagezüge im Fahrdraht einer selbsttragenden Fahrleitung.

Temperatur °C	Zugspannung $\sigma \text{ kg/mm}^2$	Drahtzug kg mm^2				Temperatur °C	Zugspannung $\sigma \text{ kg/mm}^2$	Drahtzug kg mm^2			
		50	65	80	100			50	65	80	100
25	12,0	600	780	960	1200	+10	5,6	280	364	448	560
20	11,0	550	715	880	1100	20	4,4	220	286	352	440
-10	9,0	450	585	720	900	30	3,5	175	228	280	350
0	7,1	355	462	568	710	40	3,0	150	195	240	300

Festwerte: $a_{max} = 35 \text{ m}$, $\sigma_{max} = 12 \text{ kg/mm}^2$, $\varphi = 0,324 \text{ \%}$ bei $T = -25^\circ\text{C}$
 $\gamma = 8,9 \text{ kg/km/mm}^2$, $\alpha = 17 \times 10^{-6}$, $E = 1,3 \times 10^6$.

Gründen der ungestörten Stromabnahme mit dem Höchstwert von 35 m gegeben ist. Die Untersuchung der Eislast scheidet bei dieser Spannweite aus. Die Rechentafel erhält die einfachste Form eines Parallel-Koordinaten-Systems (Abb. 23).

Mit Hilfe der Rechentafel lassen sich noch andere, sonst nur durch umständliche Rechnungen lösbarer Fragen rasch beantworten.

Besonders umständlich sind die Verhältnisse bei Kettenfahrleitungen. Es sei z. B. eine Kettenfahrleitung mit 75 m Spannweite mit einem im Hinblick auf die allgemeinen Anlageverhältnisse zweckmäßig erscheinenden mittleren Durchhang von $1,6 \text{ m} = 2,14\%$ auszulegen. Dabei sei aus Gründen der sicheren Bügelführung verlangt, daß weder bei der zusätzlichen Eislast noch bei der höchsten Temperatur von $+40^\circ\text{C}$, der Durchhang der Kette und damit die Absenkung des Tragwerkes ein bestimmtes für die gute Bügelführung zulässiges Maß überschreite.

Mit Hilfe der Rechentafel (Abb. 24) seien für eine Fahrleitung, bestehend aus einem $38,5 \text{ mm}^2$ Stahlseil und 100 mm^2 Kupferfahrdrat $\gamma_k = 34,3$ und $\gamma_e = 64,6 \text{ kg/km/mm}^2$ (öst. Formel) $a = 75 \text{ m}$ die Montagespannungen und Beanspruchungen zu ermitteln.

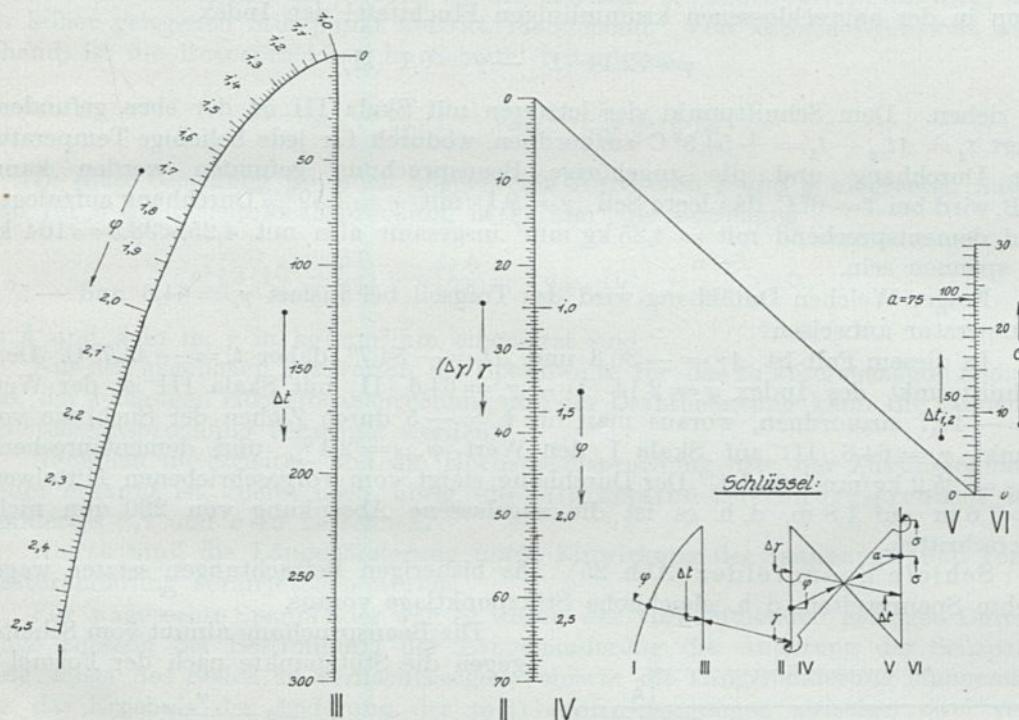


Abb. 24. Krummlinige Fluchlinien.

Rechentafel für die allgemeine Zustandsgleichung einer Kettenfahrleitung.

$$\text{Gleichungen: } \sigma = \frac{a\gamma}{80\varphi}; \quad \Delta t = 24,3 \left(\varphi^2 - 1 \right) + 3,87 \gamma \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right)$$

$$\Delta t_{1,2} = t_2 - t_1; \quad \Delta \gamma = \gamma_1 - \gamma_2; \quad \Delta t_{1,2} = \frac{3,87}{\varphi} \Delta \gamma.$$

Festwerte: $a = 75 \text{ m}$; $f = 1,6 \text{ m}$ ($\varphi = 2,14\%$); $t_{\text{mittel}} = +10^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 1\%$.

Tragseil: $q = 38,5 \text{ mm}^2$, Stahl;

Fahrdrat: $q = 100 \text{ und } 65 \text{ mm}^2$, Kupfer.

$\gamma \text{ kg/km/mm}^2$	Belastung	
9,1	Seilgewicht	
26,5	"	+ 65 mm ² Fahrdrat
34,3	"	+ 100 " "
54,7	"	+ 65 " "
64,6	"	+ 109 " " + "

Die allgemeine Zustandsgleichung übergeht in diesem Fall, wenn man die Rechentafel für den Anfangszustand $\varphi = 1,0\%$ auslegt, in die Form

$$\Delta t = 24,3 (\varphi^2 - 1) + 3,87 \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right).$$

Die äquivalente Temperatur wird

$$\Delta t_{12} = \frac{3,87}{\varphi} \Delta \gamma,$$

wo $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$ und $\Delta \gamma = \gamma_1 - \gamma_2$.

In der Fluchtlinientafel scheidet a als Veränderliche aus.

Wünscht man zunächst die Montagespannung für das unbelastete Seil für $t = +10$ zu kennen, hat man im Produkt-Nomogramm (Abb. 24) die Indices

$$a = 75 \text{ (V)} - \varphi = 2,14 \text{ (IV)}$$

und $\Delta \gamma = 25,2$ d. i. $(34,3 - 9,1)$ (II) — $\Delta t_{12} = 44,5^\circ$ (V)

dann in der angeschlossenen krummlinigen Fluchttafel den Index

$$\varphi = 2,14 \text{ (I)} - \gamma = 9,1 \text{ (II)}$$

zu ziehen. Dem Schnittpunkt des letzteren mit Skala III ist der eben gefundene Wert $t_2 = \Delta t_{12} + t_1 = +54,5^\circ$ C zuzuordnen, wodurch für jede beliebige Temperatur der Durchhang und die zugehörige Beanspruchung gefunden werden kann. Z. B. wird bei $t = 0^\circ$ C das leere Seil ($\gamma = 9,1$) mit $\varphi = 1,59\%$ Durchhang aufzulegen und dementsprechend mit $= 4,25 \text{ kg/mm}^2$ insgesamt also mit $4,25 \times 38,5 = 164 \text{ kg}$ zu spannen sein.

Frage: Welchen Durchhang wird das Tragseil bei Eislast $\gamma_e = 64,6$ und -5° C Temperatur aufweisen?

In diesem Fall ist $\Delta \gamma = -30,3$ und $\Delta t = -54,7^\circ$, daher $t_2 = -44,7^\circ$ C. Dem Schnittpunkt des Index $\varphi = 2,14$ (I) — $\gamma_e = 64,6$ (II) mit Skala III ist der Wert $t = -44,7$ zuzuordnen, woraus man für $t_2 = -5$ durch Ziehen der Suchlinie von Punkt $\gamma_e = 64,6$ (II) auf Skala I den Wert $\varphi_{-5} = 2,4\%$ und dementsprechend $\sigma_{-5} = 25,2 \text{ kg/mm}^2$ findet. Der Durchhang steigt vom vorgeschriebenen Mittelwert $f = 1,6 \text{ m}$ auf $1,8 \text{ m}$, d. h. es ist die zugelassene Absenkung von 200 mm nicht überschritten.

Schiefe Spannfelder (Abb. 25). Die bisherigen Betrachtungen setzten wagrechte Spannweiten, d. h. gleichhohe Stützpunktlage voraus.

Die Beanspruchung nimmt vom Scheitel gegen die Stützpunkte nach der Formel

$$\sigma_1 = \sigma + \frac{\gamma}{10^5} f_1$$

zu, wo f_1 den Durchhang bezogen auf den höheren Stützpunkt bedeutet und

$$\sigma = \frac{\gamma}{10^5} c.$$

Hieraus folgt, daß die Spannung an den beiden Stützpunkten verschieden und am höheren Stützpunkt stets größer sein wird als im Scheitel.

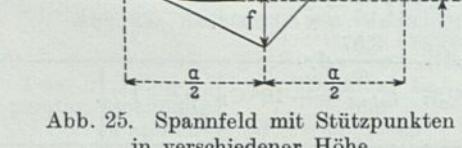


Abb. 25. Spannfeld mit Stützpunkten in verschiedener Höhe.

Um den für die tiefste Stelle maßgebenden Durchhang f_1 , der mit dem in der halben Spannweite entstehenden Durchhang (f) nicht identisch ist, ermitteln zu können, ist die sog. virtuelle Spannweite zu berechnen. Das ist diejenige

Spannweite, zu welcher die wirkliche Spannweite mit der gegebenen Parabel ergänzt werden muß, damit die Stützpunkte die gleiche Höhenlage haben (Abb. 25).

$$AC = a + (a - x) = 2a - x,$$

$$f_2 = \frac{x^2 \gamma}{80 \sigma},$$

$$f_1 = f_2 + h = \frac{\gamma (2a - x)^2}{80 \sigma}.$$

Für Scheitel innerhalb der Spannweite ist

$$x = a - \frac{20h\sigma}{a\gamma^2}$$

und außerhalb a

$$x = \frac{20h\sigma}{a\gamma^2} - a.$$

Für die Auslegung der Leitung ist die zulässige Höchstbeanspruchung, die am höher gelegenen Stützpunkt auftritt, maßgebend. Von diesem Grenzwert ausgehend, ist die Beanspruchung im Scheitel festzulegen.

$$\sigma = \sigma_{\max} - \frac{\gamma}{10^5} f_1 = \sigma_{\max} - \frac{\gamma}{10^5} (h + f_2).$$

In diese Gleichung die oben abgeleiteten Werte von f und x eingesetzt, findet man für σ die Scheitelbeanspruchung in kg/mm^2 die Beziehung

$$\sigma^2 \left(2 \cdot 10^4 + \frac{h^2}{a^2} \right) + \sigma \left(\frac{\gamma h}{10} - 2 \sigma_{\max} 10^4 \right) + \frac{a^2 \gamma^2}{400} = 0,$$

wo h und a in m, γ in $\text{kg/mm}^2/\text{km}$ eingesetzt sind.

Aus den gegebenen Festwerten der Spannweite für das zu untersuchende Spannungsfeld, der zulässigen Höchstbeanspruchung und der Drahtbelastung kann die gesuchte Scheitelbeanspruchung berechnet werden.

Nachdem die Scheitel- und die Höchstbeanspruchung bzw. der Zusammenhang beider erkannt ist, bleibt noch übrig, die allgemeine Zustandsgleichung für geändertes γ, t und σ zu berechnen.

Hierzu muß die Längenänderung unter Einwirkung der Spannungs- und Temperaturänderung herangezogen werden.

Für wagerechte Spannfelder war es wegen der vorkommenden geringen Durchhänge zulässig bei Bestimmung der Längenänderung die Änderung der Seilspannung längs des Seiles zu vernachlässigen, obzwar die Längenänderung sinngemäß nur das Ergebnis der Änderung der mittleren Spannungen zwischen zwei verschiedenen Zuständen sein kann.

Die mittlere Beanspruchung ist die Beanspruchung längs der Parabel

$$\sigma' = \sigma + \gamma y'$$

integriert über die wagerechte Spannweite. Wenn man die Spannungswerte längs der wagerechten Spannweite in einer Kurve aufträgt, so wird die Höhe des Rechteckes mit derselben Basis a und gleicher Fläche den gesuchten Wert geben. Es sei in einem beliebigen Punkt die Beanspruchung

$$\sigma' = \sigma + \gamma y',$$

wobei

$$y' = \frac{\gamma x^2}{2 \sigma} + \frac{\gamma^3 x^4}{24 \sigma^3},$$

so folgt, daß

$$\sigma' dx = \sigma dx + \frac{\gamma^2 x^2}{2\sigma} dx + \frac{\gamma^4 x^4}{24\sigma^3} dx,$$

$$\begin{aligned} \sum_{x_1}^{x_2} \sigma' dx &= \sigma \int_{x_1}^{x_2} dx + \frac{\gamma^2}{2\sigma} \int_{x_1}^{x_2} x^2 dx + \frac{\gamma^4}{24\sigma^3} \int_{x_1}^{x_2} x^4 dx \\ &= \sigma(x_2 - x_1) + \frac{\gamma^2}{2\sigma} \left(\frac{x_1^3 + x_2^3}{3} \right) + \frac{\gamma^4}{24\sigma^3} \left(\frac{x_1^5 - x_2^5}{5} \right). \end{aligned}$$

Das dritte Glied kann vernachlässigt werden und hieraus die mittlere Beanspruchung

$$\sigma^* = \sigma + \frac{\gamma^2}{6\sigma} (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2)$$

bzw. mit den für das Spannfeld kennzeichnenden Größen

$$h = f_1 - f_2 = y'_1 - y'_2 = \frac{\gamma x_1^2}{2\sigma} - \frac{\gamma x_2^2}{2\sigma}$$

und

$$a = x_2 - x_1$$

wird, unter Einsetzung der gebräuchlichen Maßstäbe (a m, h cm, γ kg/mm²/km)

$$\sigma^* = \sigma + \frac{\sigma h^2}{2a^2 10^4} + \frac{\gamma^2 a^2}{24\sigma 10^6} = \frac{\sigma}{2} \left(2 + \frac{h^2}{a^2 10^4} \right) + \frac{\gamma^2 a^2}{24\sigma 10^6}.$$

Hieraus ist zu entnehmen, daß für schiefe Spannfelder die mittlere Spannung wesentlich größer ausfallen kann als die Scheitelpfannung. Dieser Wert kann nunmehr in die allgemeine Zustandsgleichung eingesetzt werden.

Für wagerechte Spannfelder wird

$$h = c$$

daher

$$\sigma^* = \sigma + \frac{\gamma^2 a^2}{24\sigma} 10^{-6} = \sigma + \frac{\gamma}{3 \cdot 10^5} \cdot f.$$

Die allgemeine Zustandsgleichung lautet, alles einheitlich auf cm bezogen,

$$l - l_0 = (t - t_0) l_0 \alpha + (\sigma^* - \sigma_0^*) \frac{l_0}{E}.$$

Für die Länge gilt allgemein

$$l = (x_2 - x_1) + \frac{1}{6} \gamma^2 \frac{x_1^3 - x_2^3}{\sigma^2},$$

$$l = a + \frac{a \gamma^2}{6\sigma^2} (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2),$$

und da

$$x_1 = \frac{\sigma h}{\gamma a} + \frac{a}{2} \quad \text{und} \quad x_2 = \frac{\sigma h}{\gamma a} - \frac{a}{2}$$

wird

$$l = a + \frac{h^2}{2a} + \frac{\gamma^2 a^3}{24\sigma^2} \quad \text{und für} \quad l_0 = a + \frac{h^2}{2a} + \frac{\gamma_0^2 a^3}{24\sigma_0^2}.$$

Diesen Wert für l und l_0 in die Grundgleichung eingesetzt, lautet diese

$$\Delta t = \frac{a}{b} \cdot \frac{800}{3\alpha} (\varphi^2 - \varphi_0^2) 10^{-6} + \frac{a}{E\alpha} \left\{ \frac{1,25}{2} \left(\frac{\gamma_0}{\varphi_0} - \frac{\gamma}{\varphi} \right) \left[1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] + \frac{1}{3000} (\gamma_0 \varphi_0 - \gamma \varphi) \right\},$$

wo a und b in m und φ in % eingesetzt sind. b ist die schief gemessene Spannweite.

Die Formel übereinstimmt in dieser Gestalt mit derjenigen für wagerechte Spannfelder. Sie übergeht auch in diese für

$$a = b$$

bis auf das dritte Glied, das der für wagerechte Spannweiten zulässigen Vernachlässigung entspricht.

Messung des Durchhanges. Die Feststellung des Durchhanges im Wege der Messung ist unter allen Umständen schwierig oder oft nicht durchführbar. Vom Standpunkt der sicheren Beanspruchung der freigespannten Leitung ist es aber von Wichtigkeit, dieses Maß zu kennen.

Hierzu dient das Verfahren von Dreisbach, nach welchem der Durchhang einer Leitung durch ihre Schwingungszahl bestimmt werden kann.

Die frei durchhängende Leitung wird als physikalisches Pendel angesehen, für dessen Schwingungszeit die Formel gilt

$$T = \pi \sqrt{\frac{J}{M g e}}$$

wo T die Dauer einer einfachen Schwingung in sek,

M die Masse des Pendels in kg sec²/cm,

J das Trägheitsmoment in cm/kg/sek²,

e den Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse in cm und

g die Erdbeschleunigung cm/sek² bedeutet.

Für die Parabel ist

$$e = \frac{2}{3} f \quad \text{und} \quad J = \frac{8}{15} M f^2,$$

so daß die Zahl der einfachen Schwingungen wird

$$n_{\text{sek}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{M g \frac{2}{3} f}{\frac{8}{15} M f^2}}$$

und der Schwingungen in der min

$$n = \frac{60}{\pi} \frac{70}{20} \frac{1}{\sqrt{f}},$$

schließlich der Durchhang in m

$$f = \left(\frac{66,9}{n} \right)^2 = \frac{4474,61}{n^2}.$$

Wahl des Durchhanges für das Tragseil einer Fahrleitung. Unberührt ist in den bisherigen Betrachtungen die Frage geblieben, welche Gesichtspunkte für die Wahl des mittleren Durchhanges der Kettenleitung, bei welchem demnach die Fahrleitung gerade gestreckt hängt, maßgebend sind. Die sachlich einwandfreie Lösung liegt nicht ohne weiteres klar zutage. Die genaue mathematische Untersuchung ist auch nicht möglich, weil eine große Anzahl verschiedener Gesichtspunkte mitgesprochen. Es ist ohne weiteres zu erkennen, daß verhältnismäßig große Durchhänge geringe Zugkräfte bedeuten, daher leichtes Seil und in den Kurven Maste mit geringem Widerstandsmoment, die dem Durchhang entsprechend große Länge erhalten müssen, verlangen. Was daher in einer Beziehung an Gewicht erspart wird, muß andererseits wieder zugesetzt werden. Einfache Verhältnisse vorausgesetzt, läßt sich über den Zusammenhang ein Überblick gewinnen.

Berücksichtigt man als maßgebende Beanspruchung den Kurvenzug (N) allein, verursacht dieser ein Biegungsmoment (M).

$$M = N(h + f),$$

wenn h die Fahrdrahthöhe in m und
 f den Durchhang m bezeichnet,
 $h + f$ somit den Hebelarm des Kurvenzuges (N) darstellt. Für N gilt

$$\frac{N}{2} : S = \frac{a}{2} : R \quad N = S \frac{a}{R},$$

wo S die Spannung im Seil ist.

Für S gilt bekanntlich

$$S = \frac{a^2 p}{8f}.$$

Die Substitutionen durchgeführt, wird

$$M = \frac{a^3 p}{8R} \left(\frac{h}{f} + 1 \right).$$

Diese Formel stellt eine gleichschenkelige Hyperbel dar, und zeigt, daß durch Veränderung des Durchhangs unter einem gewissen Wert das Drehmoment sehr rasch anwächst; unterhalb dieses Wertes wird dagegen nichts mehr gewonnen. Der kritische

Punkt ist durch mit einem Winkel von 45° geneigte Tangente bestimmt. Es ist demnach zweckmäßig, den Wert des Durchhangs in dieser Höhe zu wählen.

Die Kurve (Abb. 26) bezieht sich auf das auf S. 73 durchgerechnete Beispiel einer Kettenfahrleitung und zeigt, daß der theoretisch günstigste Wert bei etwa $f = 1,3$ m liegt.

Die Formel gibt auch Aufschluß über den Einfluß der Spannweite auf die Mastbeanspruchung; diese wächst mit der dritten Potenz der Spannweite und linear mit dem Metergewicht des Kettenwerkes.

Setzt man weiterhin noch die Vereinfachung voraus, daß das Widerstandsmoment der verwendeten Masttypen mit dem Querschnitt proportional wächst, welche Annahme für Handelsquerschnitte annähernd zutrifft, läßt sich auch

Abb. 26.
Biegemoment eines Kurvenmastes
in Abhängigkeit vom Durchhang des
Tragseiles.

noch ein Zusammenhang mit dem Gewicht (G kg) — demnach dem Preis — der freitragenden Mastlänge ($h + f$) ableiten

$$G = \frac{(h + f)q\gamma}{1000}.$$

Das Widerstandsmoment ist

$$W = qC \quad \text{und} \quad M = W\sigma,$$

daher

$$\frac{a^3 p}{8R} \left(\frac{h}{f} + 1 \right) = \frac{G 1000 \cdot C \cdot \sigma}{(h + f)\gamma},$$

hieraus

$$\frac{\gamma}{1000 C \sigma} \cdot \frac{a^3 p}{8R} \cdot \frac{1}{f} (h + f)^2 = G.$$

G wird ein Minimum für $\frac{dG}{df} = 0$

$$\frac{d \frac{1}{f} (h + f)^2}{df} = -\frac{h}{f} + 1,$$

d. h. $h = f$.

Für die vereinfachten Annahmen erhält man das Ergebnis, daß im Bogen das geringste Mastgewicht für ein Kettenwerk benötigt wird, dessen Durchhang gleich der Fahrdrähthöhe wäre. Eine derartige Anordnung ist aber praktisch unbrauchbar, weil insbesondere unter der Einwirkung des Windes eine klaglose Bügelführung unmöglich wäre. Würde man in dieser Ableitung auch den Winddruck berücksichtigen, wäre das Ergebnis ein wesentlich anderes. Für die Wahl eines mäßigen Durchhangs sprechen auch Rücksichten der bequemen Instandhaltung und der Baukosten. Sind die Stützpunkte der Isolatoren wesentlich über Manneshöhe ober dem Fahrdräht angebracht, wird es umständlich, das Tragseil und die Stützpunkte zu erreichen. Man geht daher in der Bemessung des Durchhangs zugleich des zwischen dem Fahrdräht und tiefsten Punkt des Seiles erforderlichen Raumes für Konstruktionsteile nicht viel über 2 m.

Verschiedene Belastungen in benachbarten Spannweiten. Aus der Erkenntnis, daß mit gleicher Zugspannung verlegte Leitungen mit Eintritt von Temperaturänderungen verschiedene Zugkräfte erhalten, wenn die Spannweiten ungleich sind, ist zu folgern, daß es zweckmäßig ist Anordnungen zu treffen, die einen Ausgleich der Zugspannungen in benachbarten Feldern ermöglichen. Diese Bedingungen erfüllen Bauarten, bei welchen das Tragseil bzw. die Leitung abteilungsweise in Längen bis zu 2000 m in einem Stück über Rollen geführt oder auf frei schwebenden Isolatoren aufgehängt ist. Diese Anordnung weist neben diesen Vorteilen auch gewisse Gefahren auf. Es ist zweckmäßig, sich über diese klare Rechenschaft zu geben. Es gehört nicht zu den besonders außergewöhnlichen Fällen, daß eine zunächst vereiste Leitung sich streckenweise ihrer Last entledigt, etwa zufolge Einwirkung der Sonnenwärme oder Erschütterungen, andere Felder dagegen weiter vereist bleiben. Die beträchtlichen Gewichtsunterschiede bewirken Verzerrungen im Kettenwerk, Schieflistung der Isolatoren u. dgl. Die zu erwartenden Vorgänge lassen sich auch rechnerisch verfolgen.

Als Anfangszustand legt man der Rechnung eine gleichmäßig vereiste Leitung (γ_e) mit der zulässigen Höchstbeanspruchung σ_e zugrunde; bei nur teilweiser Vereisung der Spannfelder entsteht eine andere, kleinere Beanspruchung σ .

Es seien insgesamt n Spannfelder untereinander in Verbindung, von welchen m Felder vereist sind. Die Bogenlänge der durchhängenden Leitungen sei l , die gesamte Leitungslänge über n gleichmäßig gespannte vereiste Felder wird $L = nl$. Zwischen Eislast γ_e und Eigengewicht γ der Leitung besteht ein festes Verhältnis,

$$\zeta = \frac{\gamma_e}{\gamma},$$

φ_e und σ_e seien die der in allen Feldern gleicher Spannweite gleichmäßig vorhandenen Vereisung entsprechenden Kennwerte.

Entledigt sich die über reibungslose Rollen geführte gedachte Leitung in $n - m$ Feldern ihrer Eislast, tritt eine, zwar in allen Feldern gleichgroße, jedoch von σ_e verschiedene Beanspruchung (σ) auf. Auch die Durchhänge ändern sich, indem die eisfreien Felder nachgespannt werden und die vereisten Felder tiefer durchhängen.

Nachdem für die Drahtgewichte die Beziehung

$$\gamma_e = \zeta \gamma$$

besteht, folgt, daß zwischen den Durchhängen der eisfreien Felder und denjenigen der vereist gebliebenen die Gleichung besteht

$$\frac{\gamma_e}{\gamma} \varphi = \zeta \varphi,$$

weil

$$\sigma = \frac{a \gamma_e}{80 \zeta \varphi} = \frac{a \gamma}{80 \varphi}.$$

Die betrachteten beiden Belastungsfälle können miteinander dadurch in Verbindung gebracht werden, daß

$$\frac{\varphi \sigma}{\gamma} = \frac{\varphi_e \sigma_e}{\gamma_e} = \frac{a}{80},$$

somit

$$\varphi \sigma \zeta = \varphi_e \sigma_e.$$

Aus den Durchhängen können die Seillängen errechnet werden.

Die Seillänge für m vereiste und $n-m$ entlastete Felder ist

$$L = m l_1 + (n-m) l_2,$$

wo

$$l_1 = a \left(1 + \frac{8}{3} \zeta^2 \varphi^2 10^{-4} \right).$$

und

$$l_2 = a \left(1 + \frac{8}{3} \varphi^2 10^{-4} \right)$$

$$L_2 = ma \left(1 + \frac{8}{3} \zeta^2 \varphi^2 10^{-4} \right) + (n-m)a \left(1 + \frac{8}{3} \zeta^2 \varphi^2 10^{-4} \right)$$

gegenüber der gesamten Seillänge

$$L_1 = na \left(1 + \frac{8}{3} \varphi_e^2 10^{-4} \right)$$

bei gleichmäßiger Vereisung aller Felder.

Die geometrische Längenänderung für die beiden Belastungsfälle

$$L_1 - L_2$$

wird, da vorweg mit Beanspruchungen innerhalb der Elastizitätsgrenze zu rechnen ist, der Änderung der Beanspruchung in beiden Fällen entsprechen und gleich der physikalischen Längenänderung sein

$$L_1 - L_2 = (\sigma_e - \sigma) \frac{100 L_1}{E}.$$

Im Hinblick auf die geringen Durchhänge kann auch $L_1 = na$ gesetzt werden, dann ist

$$L_1 - L_2 = (\sigma_e - \sigma) \frac{100 na}{E} = \left(\sigma_e - \frac{\varphi_e \sigma_e}{\varphi \zeta} \right) 100 \frac{na}{E},$$

schließlich

$$\begin{aligned} L_1 - L_2 &= \left(1 - \frac{\varphi_e}{\varphi \zeta} \right) 100 \frac{na \sigma_e}{E} \\ \left(1 - \frac{\varphi_e}{\varphi \zeta} \right) 100 \frac{na \sigma_e}{E} &= a \left[n \left(1 + \frac{8}{3} \varphi_e^2 10^{-4} \right) - m \left(1 + \frac{8}{3} \zeta^2 \varphi^2 10^{-4} \right) - \right. \\ &\quad \left. - (n-m) \left(1 + \frac{8}{3} \varphi^2 10^{-4} \right) \right]. \end{aligned}$$

Nach einigen Umformungen erhält diese Gleichung die Form

$$n \left[\frac{\sigma_e}{E 10^{-6}} - \frac{8}{3} \varphi_e^2 \right] = \frac{1}{\varphi} \frac{\varphi_e \sigma_e}{\zeta E} 10^6 n - \frac{8}{3} \varphi^2 (m \zeta^2 + n - m).$$

Setzt man

$$A = \frac{8}{3} (m \zeta^2 + n - m) \quad C = \frac{\varphi_e n \sigma_e}{\zeta E 10^{-6}}$$

und

$$B = n \left[\frac{\sigma_e}{E 10^{-6}} - \frac{8}{3} \varphi_e^2 \right]$$

wird

$$B = \frac{C}{\varphi} - A \varphi^2,$$

schließlich

$$A \varphi^3 + B \varphi = C$$

diejenige kubische Gleichung, aus welcher das gesuchte φ zu errechnen ist.

Es sei $a = 150$, $\gamma_e = 9,7$, $\gamma = 2,9$, $n = 5$ und $m = 1$, der gefährlichste Fall, indem bis auf ein Spannfeld alle übrigen eisfrei sind. Die Leitung bestehe aus Aluminium-Querschnitt, 45 mm².

$A = 40,6$, $B = 11,5$, $C = 37,5$ und $\varphi = 1,07\%$; $\zeta = 3,35$, $\zeta\varphi = 3,6\%$ gegen $\varphi_e = 2,25$, wobei die Beanspruchung von 8,0 kg/mm² auf 5,0 kg/mm² zurückgeht.

Der Ausgleich benachbarter Felder ist demnach durchaus zweckmäßig, eine bedenkliche Vermehrung des Durchhangs ist um so weniger zu befürchten, als bei den gebräuchlichen Querschnitten die kritische Temperatur niedriger ist als die Höchsttemperatur ($+40^\circ\text{C}$), für welche die Masthöhe auszulegen ist.

Ahnlich sind die Verhältnisse bei Kupferleitungen.

3. Der Lageplan der Fahrleitung für Rollenstromabnehmer.

Literatur:

Poschenrieder. Oberleitungen elektrischer Bahnen. Verl. Oldenbourg, München 1904.

Wahle. Kurvenabspannung des Fahrdrähtes bei elektrischen Straßenbahnen mit Rollenkontakt.

E.T.Z. 1904. H. 35.

Richey. Electric Railway Handbook. Verl. The Graham Hill B.C. New York 1915.

Der Lageplan der Fahrleitung für Rollenstromabnehmer muß, wie bereits angedeutet, unvermittelte Richtungsänderung vermeiden, soll ein Entgleisen der Rolle selbst bei mäßigen Geschwindigkeiten vermieden werden. Der geometrische Zusammenhang zwischen Krümmungshalbmesser, Teilung, Wagen- und Stangenlänge, Form der Rolle ist umständlich. Es ist praktisch unmöglich, die Leitung so zu verlegen, daß sie den theoretischen Voraussetzungen in allen Fällen entspricht, denn es läßt sich nicht vermeiden, daß auf ein und derselben Strecke Wagen verschiedenster Größe und Bauart verwendet werden. Für die Austeilung der Stützpunkte in Krümmungen haben sich Erfahrungswerte eingelebt, von welchen je nach den erzielten Ergebnissen mehr oder weniger abgewichen wird. Im allgemeinen wird von der Austeilung der Fahrleitung verlangt, daß die Richtungswechsel an den Knickpunkten etwa 11° nicht überschreiten. In Abb. 27 ist eine amerikanische Regelbauart dargestellt. Diese Ausführung des Spannwerkes entspricht folgender Tabelle:

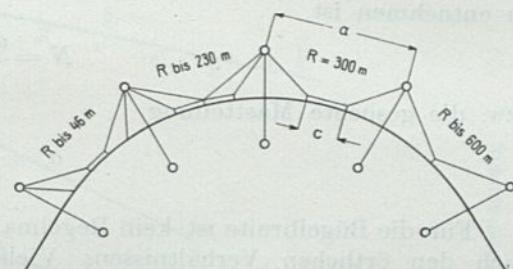


Abb. 27. Verspannung der Fahrleitung für Rollenstromabnehmer in Krümmungen.

Halbmesser des Bogens m	Teilung $C \text{ m}$ der Auszüge	Mastteilung $A \text{ m}$	Anzahl der Auszüge in der Teilung
18	2,7	13,7	4
20	2,9	14,7	
25	3,4	17,0	
30	3,9	19,4	
35	4,4	20,9	
40	4,7	22,0	3
50	4,9	23,4	
60	5,1	24,2	
75	5,5	25,0	2
150	6,4	29,0	1

Die in den Spanndrähten herrschenden Züge ergeben sich auf Grund der Zerlegung der im Fahrdräht als gegeben betrachteten Höchstspannung.

4. Der Lageplan der Fahrleitung für Bügel- oder Walzenstromabnehmer. Die Leitung ist in gerader Bahn entsprechend der nutzbaren Bügelbreite in Zickzacklinie zu verlegen, um eine gleichmäßige Abnutzung der Schleifstücke bzw. Walzen zu erzielen. Hierbei ist insbesondere bei großen Spannweiten darauf zu achten, daß der Draht in der Mitte der Spannweite genau oberhalb der Bahnachse liegt, denn nur so kann die Gefahr der Bügelentgleisung bei starkem Wind gebannt werden. Die Zickzackführung ist demnach in jeder Spannweite symmetrisch zur Bahnachse anzurufen.

Für Krümmungen läßt sich die richtige Lage der Fahrleitung bei voller Ausnutzung der Schleifbreite aus der in Abb. 28 dargestellten Figur ohne weiteres ableiten.

b ist die nutzbare Bügelbreite, R der Halbmesser des Bogens der Bahnachse und a die gesuchte Mastteilung. Demnach gilt

$$a = \sqrt{8Rb}.$$

Die in der Fahrleitung von Straßenbahnen gebräuchlichen Isolatoren vertragen einen höchsten Kurvenzug von 150 bis 250 (äußerst 300) kg, die Mauerhaken 250 kg, die Rosetten 500 kg, äußerst 1000 kg, die Wirbelisolatoren bis 1000 kg.

Nachdem der Kurvenzug vom Zentriwinkel der beiden durch den Auszug abgelenkten Fahrdrähten abhängt, unterliegt die Mastteilung auch insofern einer Einschränkung, als in jedem Fall zu untersuchen ist, ob die zulässige Beanspruchung der genannten Bestandteile nicht überschritten ist.

Für den Kurvenzug N gilt, wie dem in Abb. 28 dargestellten Kräfteplan zu entnehmen ist,

$$N = \frac{aS}{R}$$

bzw. die gesuchte Mastteilung

$$a = \frac{N}{S} R.$$

Für die Bügelbreite ist kein Regelmaß eingeführt, dieselbe richtet sich vielmehr nach den örtlichen Verhältnissen. Vielfach verlangen vorhandene Kunstbauten, Brücken, Tunnels, Tore und dergl. schmälere Typen als vom Standpunkt des wirtschaftlichen Leitungsbauwerks erwünscht wäre.

Bügel für Straßenbahnen erhalten etwa 1100 bis 1200 mm lange Schleifstücke, so daß im Hinblick auf vorkommende Unregelmäßigkeiten mit einer nutzbaren Schleifbreite von 0,9 bis 1,0 m zu rechnen ist.

Vollbahnen arbeiten mit Bügeln bis zu 2,000 breiten Schleifstücken. Walzen sind aus konstruktiven Gründen wesentlich kürzer, insbesondere für Drehstromoberleitungen. Die zwei Fahrleitungen der italienischen Staatsbahnen sind mit einer Entfernung von 870 bis 1020 mm Abstand zwischen den beiden Fahrdrähten verlegt, womit auch die Walzenbreite festgelegt ist.

Alle einschlägigen Verhältnisse beherrschen die Rechentafeln (Abb. 28 und 29), in welchen die Beziehung

$$a = \sqrt{8Rb},$$

und die Gleichung für den Kurvenzug

$$a = \frac{N}{S} R$$

zur Darstellung gelangen.

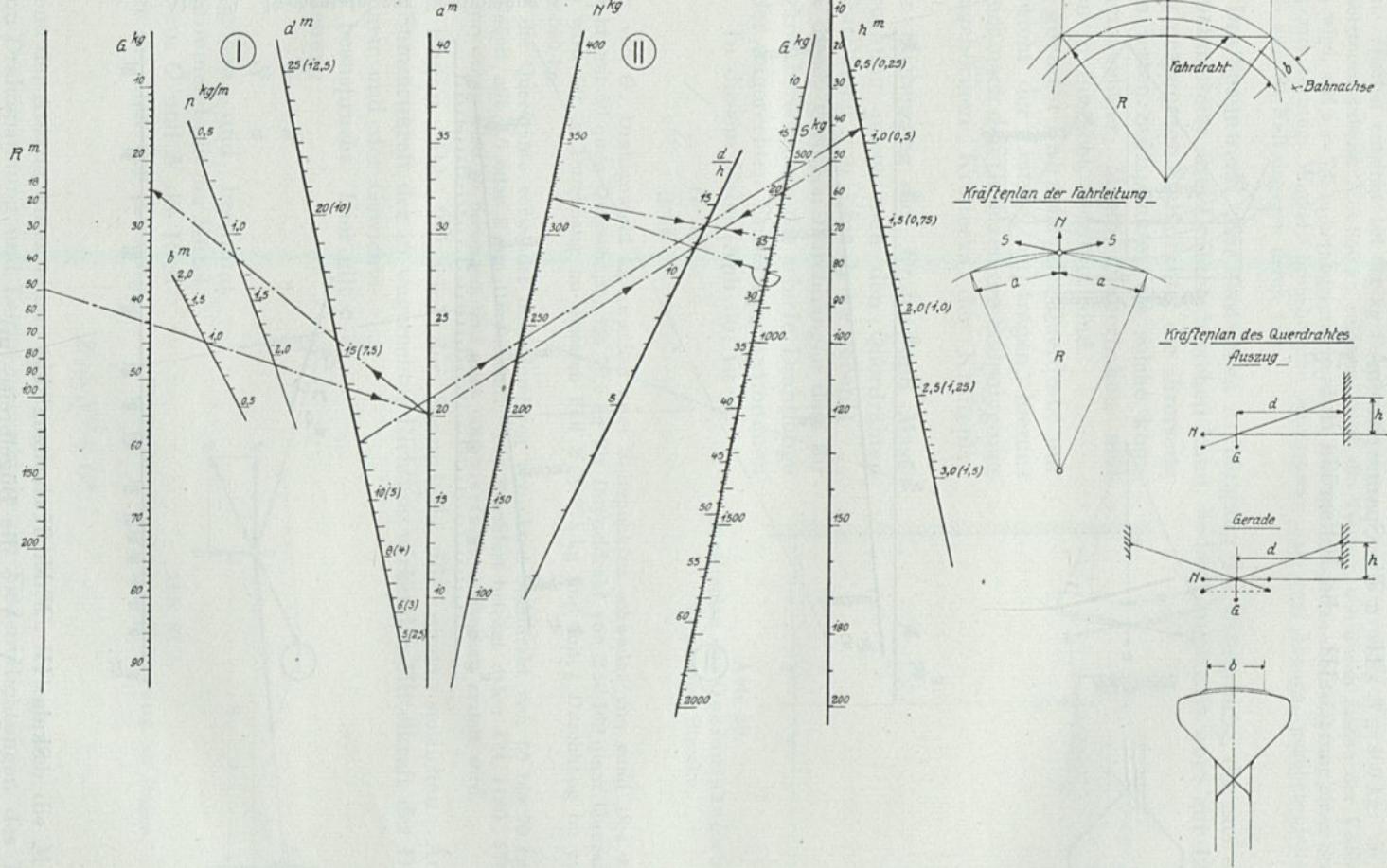
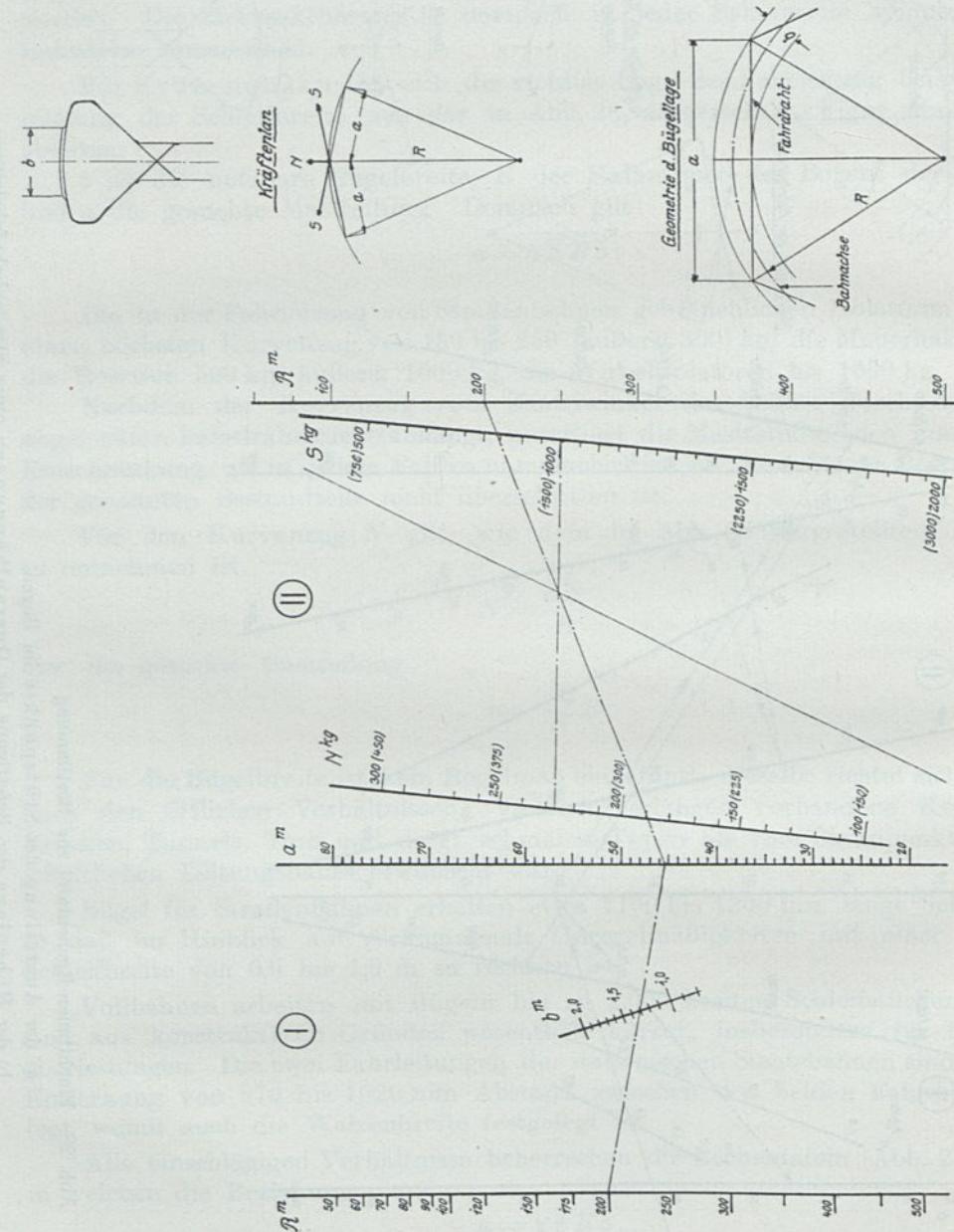


Abb. 28. Fluchtlinien-Rechentafel zur Bestimmung

- der Asteilung der Stützpunkte im Bogen,
- der Höhenlage der Befestigung der Queraufhängungen einer Straßenbahnfahrleitung.

Im Nomogramm wird aufgetragen auf

- Skala I \sqrt{R} der Krümmungshalbmesser (m)
- „ II a die Spannweite (m)
- „ III die Hilfsgröße $H = \frac{N}{S}$



- Skala IV N der Kurvenzug (kg)
- „ V $\sqrt{8b}$ die Bügelbreite (m)
- „ VI R der Krümmungshalbmesser (m)
- „ VII S die Zugspannung in der Fahrleitung (kg).

Abb. 29. Rechentafel zur Bestimmung
 a) der Mastteilung (a) aus der Bügelbreite (b),
 b) des Kurvenzuges (N) aus der Mastteilung (a) in Abhängigkeit vom Krümmungshalbmesser (R) und dem Drahtzug (S) für eine Vollbahneitung.

An Hand des Nomogrammes (Abb. 28) läßt sich durch Untersuchung einiger Beispiele sofort erkennen, welchen Nachteil die Beschränkung des Kurvenzuges in bezug auf die Baukosten bedeutet. Ein 1,0 m breiter Bügel gestattet in einem Bogen $R = 18$ m eine Mastteilung $a = 12$ m anzuwenden. Hierbei entsteht bei 600 kg Fahrdrähtspannung ein Kurvenzug $N = 400$ kg; da Hartgummi-Isolatoren äußerst $N = 250$ kg zulassen, muß die Teilung, wie durch Ziehen der Visierlinien gefunden wird, auf $a = 7,5$ m herabgesetzt werden. Handelt es sich um die Befahrung einer Straßenkreuzung mit rechtem Winkel, braucht man im ersten Fall zwei Abzüge, gegebenenfalls zwei Maste, im zweiten Fall dagegen deren vier.

5. Das Spannwerk. Zur elastischen Aufhängung der Fahrleitung, die aus einem bis ausnahmsweise drei Drähten bestehen kann, bedient man sich quer zur Längsrichtung gespannter Stahldrähte, die ihrerseits auf dem festen Stützpunkte, als solche kommen Armausleger, Maste, Mauerhaken und Rosetten in Betracht, befestigt sind.

In gerader Bahn hat der Querdraht nur das Gewicht der Leitung zu tragen, hieraus ergibt sich nach den Gesetzen des Seilpolygones und zugehörigen Kraftecks der Kräfteplan Abb. 30.

Zur Begrenzung der Draht- und Mastbeanspruchung pflegt man den Querdrähten einen Durchhang von $\frac{1}{9}$ bis $\frac{1}{15}$ zu geben.

Bei diesen geringen Durchhängen darf für die Zugkraftberechnung die schiefe Drahlänge gleich der wagerechten Entfernung genommen werden. In diesem Falle (Abb. 30) ist

$$Z = \frac{G}{2} \cdot \frac{d}{h}.$$

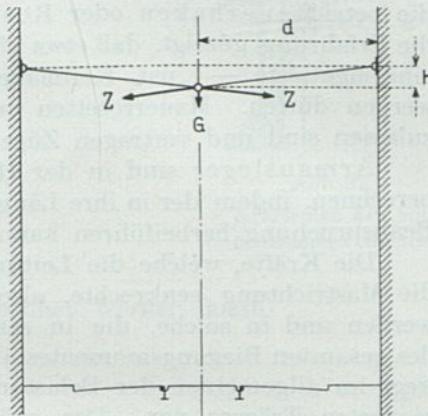


Abb. 30.
Kräfteplan der Queraufhängung
in gerader Strecke.

Der Wert von G , Drahtgewicht kg zwischen zwei Stützpunkten schwankt von rund 18,4 kg für Einfachdraht mit 50 qmm Querschnitt, bis 70,5 kg für Doppeldraht von 2×100 qmm Querschnitt. Demnach wird für $\frac{1}{9}$ Durchhang im ersten Fall $Z \approx 275$ kg und mit $\frac{1}{15}$ Durchhang im zweiten Fall $Z \approx 560$ kg.

Für die Querdrähte verwendet man durchweg verzinkten Stahldraht von 60 bis 70 kg/qmm Bruchfestigkeit mit 3,5 oder 6 mm Durchmesser. Die Bruchlast beträgt daher 424, 1180, 1700 kg; die Beanspruchung wird so bemessen, daß etwa eine vierfache Sicherheit erzielt wird.

Im Bogen (Abb. 28) wird der Spanndraht für einen seitlichen Auszug von der Summenkraft der in wagerechter Richtung wirkenden Mittelkraft der Drahtspannungen und der Gewichtsteilkraft beansprucht. Hier gilt die Beziehung

$$\frac{G}{N} = \frac{h}{d}$$

streng genau und bestimmt übereinstimmend mit der Mittelkraft Z aus G und N die Richtung, in die sich der Auszug einstellt.

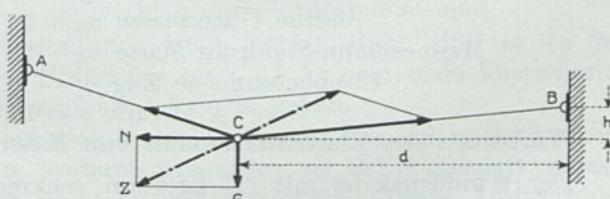


Abb. 31.
Kräfteplan der Queraufhängung im Bogen.

$$Z = N^2 + G^2.$$

Dient der Auszug unter einem als Tragdraht (Abb. 31), zerlegt sich die Mittelkraft von Drahtspannung und Leitungsgewicht in die beiden Richtungen des Tragdrahtes. Die Richtung der beiden Querdrähte kann innerhalb gewisser Grenzen frei gewählt werden; die gewählten Richtungen sind bestimmd für die Größe der

beiden Teilkräfte von Z in den beiden Querdrähten. Legt man den Querdraht BC , den eigentlichen „Auszug“, in die Richtung von Z , wird die Teilkraft in Richtung $AC = 0$. Es besteht die Gefahr, daß dieser Draht schlaff durchhängt und an den Bügel anschlägt. Es ist daher zweckmäßig, den weniger gespannten Zweig so steil als möglich zu verlegen, wobei selbstverständlich vermieden werden muß, daß der andere Querdraht so tief zu liegen kommt, daß nun dieser vom Bügel gestreift wird.

6. Berechnung der Stützpunkte. Mit der Ermittlung der in einem Spanndraht herrschenden Zugspannung ist unter einem auch die Beanspruchung gegeben, welcher die betr. Mauerhaken oder Rosetten gewachsen sein müssen. Diesbezüglich hat die Erfahrung gezeigt, daß etwa 150 mm tief in gesundes Mauerwerk eingelassene — einzementierte — „pat. Keilmauerhaken“ mit in der Regel 250 kg beansprucht werden dürfen. Mauerrosetten erhalten vier Steinschrauben, die bis 200 mm einzulassen sind und vertragen Züge von 250 und 500 kg (äußerst 1000 kg).

Armausleger sind in der Hauptsache nur für die Gewichtsbeanspruchung zu berechnen, indem der in ihre Längsrichtung fallende Kurvenzug keine nennenswerte Beanspruchung herbeiführen kann.

Die Kräfte, welche die Leitung tragenden Maste beanspruchen, können in auf die Mastrichtung senkrechte, also in wagerechter Ebene wirkende Kräfte zerlegt werden und in solche, die in senkrechter Richtung wirken. Für die Berechnung des gesamten Biegmomentes und der auftretenden Druck- und Zugbeanspruchung liegt im allgemeinen der Belastungsfall eines freitragenden an einem Ende eingemauerten Trägers vor. Der gefährliche Querschnitt tritt an der Einmauerungsstelle ein.

Im senkrechten Sinne wirken die Gewichte der vom Maste getragenen Leitungen; ihre Drehmomente entsprechen den von den Stützpunkten gemessenen wagerechten Entfernungen.

In wagerechter Richtung wirken: der Winddruck auf die Leitungen und den Mast, weiters der Kurvenzug aller Leitungen für den ungünstigsten Belastungsfall.

Dem hieraus berechneten Gesamtmoment hält die Materialspannung σ des Mastes das Gleichgewicht

$$M = W\sigma$$

die zulässige Materialbeanspruchung wird in den jeweils geltenden Bau- und Sicherheitsvorschriften festgelegt.

Für Holzmaste ist $\sigma_H = 0,7 \text{ kg/qmm}$,

eiserne Gittermaste $\sigma_E = 15 \text{ "}$ und für

Mannesmann-Stahlrohr-Maste $\sigma_S = 20 \text{ "}$

Eisenbetonmaste Zug $\sigma_z = 0,35$

Druck $\sigma = 10,0$ (für das Eisen)

(Verhältnis des Elastizitätsmoduls von Eisen und Beton 15.)

Der Winddruck ist mit 125 kg/qmm senkrecht getroffener Fläche einzusetzen. Für runde Querschnitte gilt die Verminderungszahl 0,5.

Im allgemeinen erscheint es technisch begründet, die Maste mit höchstens $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ ihrer Bruchlast im Betriebe zu beanspruchen.

In dieser Beanspruchung ist außer der obigen Beanspruchung durch Biegung auch die Knickung einzubeziehen.

Für diese gilt die Tetmayersche Formel

$$S_k = \frac{S}{q} \cdot \frac{1}{\alpha}$$

wo S_k die Knickbeanspruchung für den qcm des Querschnittes.
 S die Stabkraft und
 α den Reduktionsfaktor,
 q den Querschnitt in qcm bedeutet.

Für S gilt im Falle des Gitterträgers $S = \frac{M}{2e}$,

M ist die Summe aller Momente,
 e der halbe Abstand der Trägheitsachsen.

Bedeutet weiterhin l (cm) die Entfernung der Knotenpunkte eines Gittermastes am unteren Ende, wird die freie Knicklänge

$$l_0 = 0,7 l.$$

Ist weiters der Trägheitsradius (cm)

$$r^{\text{cm}} = \sqrt{\frac{i}{q}}$$

wo i das Trägheitsmoment in cm^4 , dann ist

$$\frac{l_0}{r} = \alpha$$

der Reduktionsfaktor, so daß σ_k hiernach berechnet werden kann.

$$\sigma_b + \sigma_k \leq \sigma$$

die zulässige Beanspruchung für das qcm.

Vierendel-Rechnung. Nach einem anderen Verfahren rechnet man bei Gittermasten zunächst die vertikalen Lasten einschließlich dem Eigengewicht des Mastes und den hieraus sich ergebenden spez. Druck. Dann ermittelt man das Exzentrizitätsmoment entsprechend den senkrechten Kräften, dann das Biegemoment der wagerechten Kräfte und schließlich die Biegebeanspruchung in der frei eingespannt gedachten Länge der Masten. Wenn diese Querkraft Q kg beträgt, wird

$$M_b = \frac{Ql}{4}$$

wo l die Einspannlänge bedeutet.

Beide Berechnungsarten führen zu ziemlich gleichen Ergebnissen.

Die Standfestigkeit der Maste ist jeweils einer Nachrechnung zu unterziehen. Erfahrungsregeln besagen, daß Holzmaste mit etwa $\frac{1}{5}$ ihrer Länge bzw. auf 1,5 bis 2,5 m einzugraben und in Steinschlag gut einzurammen sind.

Eisenmaste werden stets in Betonfundamente gesetzt; diese sind so zu bemessen, daß die Beanspruchung des Erdreiches etwa 2,5 kg/qcm nicht überschreite. Im festen tragfähigen Boden kann man bis 5 kg/qcm gehen.

Zweckmäßig ist dem Betonklotz eine breite Basis und eine sich nach oben verjüngende Pyramidenform zu geben, wodurch wesentlich an Beton gespart werden kann. Das aufgeschüttete Erdreich ist dann festzustampfen. Diese Ausführungsform ist der Rechnung schwer zugänglich.

Dem Kippmoment der äußeren Kräfte wirkt das Moment des Erddruckes entgegen.

Auf Grund der diesbezüglichen Annahmen, die in Abb. 32 zur Darstellung gelangten, wird $M_e = 2Ee$,

wo E den result. Erddruck in kg und

$$e = \frac{2}{3} \frac{t}{2} \quad \text{den Hebelarm und } t \text{ die Eingrabtiefe des Fundamentes bedeutet.}$$

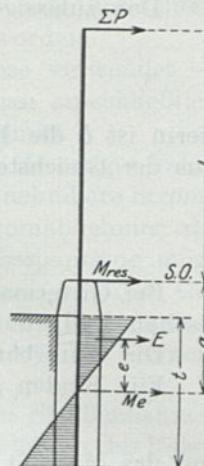


Abb. 32.

Kräfteplan des eingemauerten Mastes.

Den zulässigen Höchstwert des Erddruckes σ_e kg/qcm angenommen, wird

$$E = b \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{\sigma_e}{2},$$

hierin ist b die Breite des Betonprismas senkrecht zur Richtung des Kurvenzuges. Aus der Gleichstellung des Momentes der äußeren Kräfte und des Erddruckes folgt:

$$M_e = \frac{b t^2}{6} \cdot \sigma_e.$$

Bei Gittermasten ist für die Gitterbänder, oder wenn einfache Binden vorgesehen sind, für diese der Nachweis der auftretenden Beanspruchung zu erbringen.

Die Gitterbänder sind nach der Tetmayerschen Knickformel zu rechnen.

Für Binden gilt mit den früheren Symbolen

$$T = Ql$$

und das Moment $M = T \cdot e$.

B.

V. Der Leitungsbau.

1. Der Zweck der Fahrleitung.

Literatur:

- Arns. Die Entwicklung der Stromführungseinrichtungen elektrischer Bahnen. E.K.B. 1912. H. 32.
 Braun. Die unterirdische Stromführung für elektrische Bahnen. E.T.Z. 1898. H. 38.
 Bussebaum. Umbau der Oberleitung von Rollen- auf Schleifbügelbetrieb. E.K.B. 1920. H. 26.
 Ertel. Handbuch für den Bau und die Unterhaltung der Oberleitung elektrischer Bahnen. Verl. Jänecke. Leipzig 1907.
 Hixson. Contact Conductors and Collectors for electric railways. Proc. 1915.
 Rziha & Seidener. Starkstromtechnik. Verl. W. Ernst & Sohn, Berlin 1912.
 Poschenrieder. Oberleitungen elektrischer Bahnen. Verl. Oldenbourg. München 1904.
 Seefehlner. Berichte über das amerikanische Eisenbahnwesen. E.K.B. 1916. H. 16.
 Winterhalter. Der Umbau von Rollenkontakt auf Bügelkontakt bei der städt. Straßenbahn Zürich. Sch.B.Z. Mai 1918.

Speise- und Fernleitungen dienen rein elektrischen Aufgaben: beim Entwurf und dem Bau derselben sind die elektrotechnischen Gesichtspunkte richtunggebend. Mechanische Fragen spielen nur insofern mit, als die getroffenen Anordnungen mit der für die Betriebssicherheit notwendigen mechanischen Festigkeit ausgeführt werden müssen. Die mechanischen Fragen sind daher rein statischer Natur.

Die Fahrleitung hat in erster Linie in Verbindung mit geeignet gestalteten Stromabnehmern die Aufgabe der ununterbrochenen Stromzuführung zu dem in Bewegung befindlichen Fahrzeug zu lösen; es tritt ihre gleichzeitige Eignung zur elektrischen Kraftübertragung oft an Bedeutung zurück.

Die Fahrleitung ist durch diese Aufgabe in ihrer Anordnung vorweg gekennzeichnet; sie ist nicht freizügig, sie ist vielmehr der Bahnachse folgend außerhalb des Lichtraumprofiles derartig anzuordnen, daß die klaglose Stromabnahme von dem auf dem Bahnkörper in Bewegung befindlichen Fahrzeug bei jeder Geschwindigkeit gesichert sei.

Die Arbeitsleitungen erfordern auch insofern eine unterschiedliche Behandlung gegenüber anderen Leitungen für Kraftübertragung, als man aus naheliegenden Gründen auf die gute Leitfähigkeit des Gleises zur Rückleitung des Stromes — von besonderen Anlagen abgesehen — in der Regel nicht verzichtet. Die Hin- und Rückleitung ist daher im Wesen ganz verschieden geartet und verlangt daher gesonderte Behandlung.

Vom Standpunkt der räumlichen Anordnung der Fahrleitung betrachtet, sind im Eisenbahnwesen grundsätzlich drei Bauarten entwickelt worden.

a) Die oberhalb des Gleises angeordnete Fahrleitung. Diese verwendet — nach einigen bald verlassenen Übergangsformen — als Leitungsorgan ausschließlich Drähte von nicht unter 50 qmm und nicht über 120 qmm Querschnitt.

Entsprechend den verhältnismäßig kleinen Berührungsflächen derartiger Fahrleitungen mit dem Stromabnehmer ist die von einem Fahrdräht abnehmbare Stromstärke begrenzt. Die Steigerung der Leistung, die mit einem Stromabnehmer abgenommen werden kann, ist daher nur durch Erhöhung der Betriebsspannung möglich. Zur Anwendung hoher Spannungen ist die Oberleitung auch von dem Gesichtspunkte berufen, als durch ihre Höhenlage alle spannungsführenden Teile außerhalb des Bereiches der Gefährdung von Mensch und Gut gelegt werden können.

Die Oberleitung wird in zwei Bauformen ausgeführt:

1. Aus ästhetischen und wirtschaftlichen Gründen müssen bei Straßenbahnen im bebauten Stadtgebiet die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Fahrdrähtes voll ausgenutzt werden. Diesem Zwecke dient die selbsttragende Fahrleitung. Der Fahrdräht wird mit der zulässigen größten mechanischen Zugbeanspruchung über diejenige Spannweite gespannt, bei welcher ein für die klaglose Stromabnahme noch zulässiger Durchhang entsteht. 35, äußerst 38 m haben sich als praktischer Grenzwert eingebürgert. Die ausnahmslos elastischen Stützpunkte sind als Queraufhängungen ausgebildet.

Die verhältnismäßig geringen Spannweiten und dementsprechend große Zahl der Stützpunkte und Isolatoren spielt bei den gebräuchlichen Mittelspannungen keine große Rolle. Die mäßigen Fahrgeschwindigkeiten lassen auch den unvermeidlichen Durchhang der Fahrleitung zu.

2. Bei hohen Leistungen, demnach hohen Spannungen und gegebenen Falles höheren Geschwindigkeiten ist beides unerwünscht. Weiter verlangt die öffentliche Sicherheit, daß der Bestand der Leitung nicht einem in bezug auf Bruchlast verhältnismäßig minderwertigen Baustoff — Kupfer — anvertraut wird. Die Behebung des Durchhangs würde für selbsttragende Leitungen von den in Betracht kommenden Baustoffen unzulässige Beanspruchungen und damit entsprechend widerstandsfähige Stützpunkte verlangen.

Die Fahrleitung mit Längsaufhängung (Vielfachaufhängung), bei welcher der Fahrdräht in kurzen Abständen — 3 bis 6 m — von einem mit reichlichem Durchhang verlegten Seil oder Draht getragen wird, ist von diesen Mängeln frei.

Das Tragseil — die Kette — kann mit praktisch beliebiger Sicherheit beansprucht werden, da der Durchhang ohne Rücksicht auf andere Umstände rein im Hinblick auf die mechanische Sicherheit bemessen werden kann.

b) Insolange Hochspannungssysteme für den Bahnbetrieb nicht entwickelt waren, konnte die Steigerung der vom Bahnbetrieb verlangten Leistung nur durch eine Bauart erzielt werden, welche die Ausführung der Fahrleitung mit praktisch unbegrenzten Querschnitten in wirtschaftlicher Weise und mit konstruktiv einwandfreien Mitteln ermöglichte. Dieser Sachlage verdankt das Stromzuführungssystem mit seitlich in geringer Höhe über Schienenoberkante angeordneter sog. „Dritter Schiene“ sein Entstehen und seine große Verbreitung, namentlich in Amerika. Diese Bauart hat auch fast ausschließliche Verwendung für Stadtbahnen gefunden, weil die räumliche Unterbringung der dritten Schiene in dem verfügbaren beschränkten Querschnitt, namentlich von Untergrundbahnen, unschwierig durchführbar ist.

c) Als dritte, wegen der hohen Erhaltungskosten und verhältnismäßig geringen Betriebssicherheit meist verlassene Bauart ist die unterirdische Stromzuführung zu nennen, zu der man bei städtischen Straßenbahnen insolange Zuflucht nahm, als

man aus ästhetischen Gründen gegen eine Oberleitung Stellung nehmen zu müssen glaubte. Seitdem Fahrleitungen auch in diesem Belange einwandfrei gebaut werden, hat dieses System, das durch hohe Bau- und Betriebskosten des erforderlichen Kanales gekennzeichnet ist, seine Berechtigung verloren.

2. Die selbsttragende Fahrleitung.

Literatur:

* * * Die Große Berliner Straßenbahn und ihre Nebenbahnen. Verl. Julius Springer, Berlin 1911.
Gusgenheim. Mitteilungen über die Eigenschaften von Fahrleitungen. E.K.B. 1912. H. 18.
(Phonolectric Draht.)

Le. Erfahrungen der italienischen Staatseisenbahnen mit Drehstrom-Fahrleitungen. E.T.Z. 1918. H. 12.
Moellendorf. Modernisierung der Elemente zur Stromabnahme bei elektrischen Bahnen. E.T.Z.
1913. H. 48.

Die selbsttragende Fahrleitung für Straßenbahnen stellt die wohlfeilste Anordnung für die gebräuchlichen Mittelspannungen bis etwa 800 Volt dar, indem die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Fahrdrähtes voll ausgenutzt werden.

Im Vollbahnwesen bedienen sich nur Drehstrombahnen dieser Bauart, weil die an sich umständliche Leitungsanlage durch Anordnung von Tragseilen und Hängedrähten eine weitere Verschlechterung in diesem Belange erfahren würde.

Als Arbeitsdraht kommt Hartkupfer von 38 bis 40 kg Bruchfestigkeit in Betracht.

Der Hartkupferdraht wird mit 97 % Leitfähigkeit des reinen Kupfers (spez. Widerstand 1,75 Mikroohm/cent) und 38 kg/qmm Bruchfestigkeit hergestellt.

Die im Kriege verwendeten Ersatzstoffe sind unbedingt minderwertig; sie nützen sich selbst stark ab und verursachen einen großen Verschleiß der Stromabnehmer.

Der Fahrdräht wird bei Bahnen für öffentlichen Verkehr in einer Höhe von nicht weniger als 5 m angeordnet. 5,5 m sind die Regel, 7 m kommen in vereinzelten Fällen vor. Bei Bahnen, die den „technischen Vereinbarungen“ unterliegen, ist die Freihaltung des Lichtraumprofiles zu beachten, so zwar, daß der Fahrdräht selbst in seiner tiefsten Lage noch außerhalb des Lichtraumprofiles bleibe.

Querschnittsformen. (Abb. 33.) Der Fahrdräht hatte ursprünglich kreisrunden Querschnitt und wurde in die „Ösen“ eingelötet. Die Lötösen waren

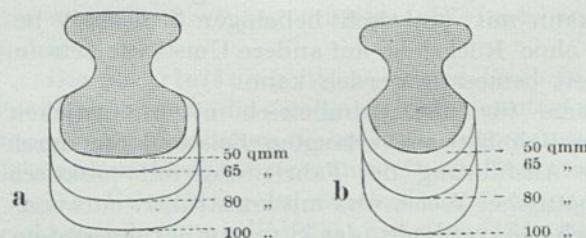


Abb. 33. Regelquerschnitte für den Fahrdräht:
a Schleifbügelbetrieb,
b Rollenbetrieb.

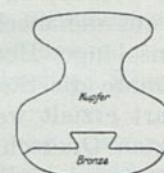


Abb. 34. Fahrdräht aus Kupfer mit eingesetzter Schleiffläche aus harter Bronze.

wegen ihres geringen Querschnittes besonders für Rollenstromabnehmer erwünscht. Mit Einführung des Schleifbügels kamen Klemmösen auf, bei denen das lästige Löten vermieden wird. Für Klemmösen ist eine Querschnittsform des Fahrdrähtes erwünscht, die für das Klemmen besser geeignet ist als die kreisrunde Querschnittsform. Es haben sich zu diesem Zwecke Fahrdrähtformen mit zwei seitlichen

Rillen oder Achterquerschnitt eingeführt. Zur Verbesserung der Berührung und Verringerung der Abnutzung gibt man der vom Stromabnehmer berührten Drahtfläche eine dem Stromabnehmer entsprechende Form. Für Rolle wird der Unterteil des Querschnittes abgerundet; für Bügel und Walze breit und flach gestaltet. Eingepreßte Einsätze aus widerstandsfähigem Material (Bronze) sind auch vorgeschlagen und versucht worden (Abb. 34).

Als Regelquerschnitte sind gebräuchlich in Europa:

50, 65, 80, 100, (120) qmm;

in Amerika:

53, 67, 85, 107 qmm

Nr.: 0 00 000 0000.

Auf die Herabsetzung des Durchhanges der selbsttragenden Fahrleitung zielen Bestrebungen ab, die Baustoffe mit höherer Festigkeit verwenden. Der in Amerika verbreitete Phono-Electric-Draht ist diesbezüglich zu erwähnen.

Derselbe wird als Rund- und Formdraht im Querschnitt von 50 bis 100 qmm erzeugt und ist aus einer Zinnbronze hergestellt. Die Zerreißfestigkeit wird mit 57 kg/qmm, der spezifische Widerstand mit 4,2 bis 4,3 Mikroohm/cm (2,5 fache des Kupfers) bei 20°C angegeben.

Es ist naheliegend, Löt- und Verbindungsstellen im Fahrdräht tunlichst zu vermeiden. Tatsächlich können bis einschließlich 100 qmm Querschnitt Längen von 400 m in ungelötzten Stücken geliefert werden. Die größeren Längen sind verhältnismäßig teuer, daher begnügt man sich im allgemeinen mit Drahtlängen von 250 bis 300 m.

In diesem Belange ist insbesondere der Weicheisendraht minderwertig, weil derselbe in geringen Längen von oft nur 40 bis 60 m Länge erhältlich ist und die Verbindung der einzelnen Stücke nur durch Klemmen bewirkt werden kann.

Es ist versucht worden, für diesen Zweck Weicheisenseile zu verwenden. Ein günstiges Ergebnis ist nicht zu erwarten, weil ein gerissener Draht aus dem Querschnitt hinaustritt, andererseits mit fortschreitender Abnutzung alle außenliegenden Drähte rund herum in Mitleidenschaft gezogen sind.

Für Fahrleitungen mit verhältnismäßig geringen Stromstärken verspricht die Anwendung verschlossener Stahlseile als Fahrleitung gute Ergebnisse. Verschlossene Seile werden aus Formdrähten hergestellt, bei Bruch eines Drahtes kann dieser nicht aus dem Seilquerschnitt heraustreten. Andrerseits kann hochwertiges Material verwendet werden, so daß auch keine allzu große Abnutzung zu befürchten ist. Derartige Seile können in beliebigen Längen hergestellt werden. Selbstverständlich sind die Drähte mit Feuerverzinkung zu versehen, um der Rostgefahr vorzubeugen.

In Fällen, wo die Abnahme besonders großer Stromstärke die Regel ist, wie z. B. auf starken Steigungen, kann man die von einem Stromabnehmer abnehmbare Stromstärke dadurch verdoppeln, daß man zwei Fahrdrähte verlegt. Dieses Mittel kommt nur für Schleifbügel oder Walzenstromabnehmer in Betracht. Durch diese Anordnung erreicht man im Bedarfsfalle auch die Verdoppelung des elektrisch notwendigen Querschnittes.

Findet man vom Standpunkt des Spannungsabfalles mit je einem Fahrdräht für jedes der beiden etwa vorhandenen Gleise das Auslangen, benötigt jedoch vom Standpunkt der klaglosen Stromabnahme Doppeldraht, kann man sich ohne überflüssige Vermehrung des aufgewandten Kupfers so helfen, daß in der Richtung „Bergfahrt“ zwei kupferne Fahrleitungen verlegt werden, auf dem Talfahrtgleise dagegen nur einen Weich-Eisendraht, der lediglich die Bügelführung und die Zufuhr des nötigen Lampen-, Steuer- oder Heizstromes zu besorgen hat.

Das Klemmwerk. An der Befestigungsstelle des Fahrdrähtes entsteht, entsprechend dem beiderseitigen Durchhang, eine Knickstelle, die vom bewegten Stromabnehmer, insbesondere bei Bauarten mit schweren Bestandteilen entsprechend der Fahrgeschwindigkeit übersprungen wird. Es entsteht hierdurch ein Schlag auf den Fahrdräht und eine Stromunterbrechung; beides machen den Stützpunkt zur gefährlichen Stelle. Stützpunkte müssen so gebaut sein, daß dieser Mangel möglichst gemildert wird, andererseits soll die freie Beweglichkeit des Fahrdrähtes nicht behindert sein. In dieser Hinsicht ist es wichtig, den Stützpunkt so leicht als möglich zu gestalten, damit der Stromabnehmer den Draht in demselben Maße anheben kann wie die Fahrleitung, was eine Vorbedingung für die gleichmäßige Abnutzung des Arbeitsdrahtes ist.

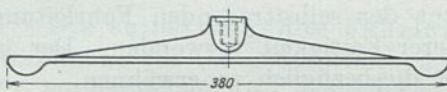


Abb. 35. Lötöse
für Rollenstromabnehmer-Betrieb.

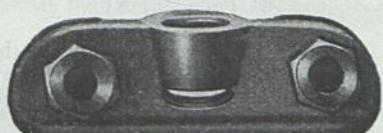


Abb. 36. Kurze Fahrdrahtklemme
für Bügelbetrieb. (S.S.W.)

Der Knick in der Fahrleitung wird durch möglichst lange und federnde Ösen gemildert. In dieser Hinsicht waren die für Rollenstromabnehmer verwendeten Lötösen (Abb. 35) von etwa 38 cm Länge vorzüglich geeignet. Diese waren vergleichsweise sehr teuer, weil sie aus Rotguß oder Messing hergestellt werden mußten.

In Schleifbügel-Oberleitungen hat sich die Verwendung verhältnismäßig kurzer Klemmösse erhalten (Abb. 36).

Den theoretischen erkannten Anforderungen, daß bei Temperaturänderungen ein Längsausgleich der Leitung mit verschiedenen Spannweiten nötig wird, ent-



Abb. 37. Fahrdräht-Klemmösse für gerade Strecke
mit losen Klemmstücken (A.E.G.).

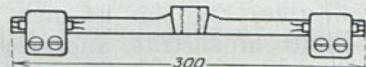


Abb. 38. Öse mit freibeweglichen
Klemmstücken für gerade Strecke.

spricht die sehr verbreitete frei bewegliche Öse, die mit zwei auf einem Längsbalken verschiebbaren und auch nach oben ein freies Spiel aufweisenden Klemmen (Abb. 37 u. 38) versehen ist. Der Stromabnehmer hat bei dieser Anordnung nur das ganz geringfügige Gewicht der einen Klemmbacke anzuheben.

Die Klemmbäckchen können gegossen, geschmiedet oder geprägt werden. Temperguß ist am

meisten gebräuchlich, nur dort, wo Verrostungen zu befürchten sind, verwendet man Messing (geprägt oder gegossen) oder man verzinkt auf elektrischem Wege die Klemmen.

Um die aus Eisen erzeugten Ösen jederzeit leicht lösen zu können, empfiehlt es sich, wenn Schlitzschrauben mit versenktem Kopf verwendet sind (für Rolle) (Abb. 39 u. 40), diese oder bei Kopfschrauben die Muttern aus Messing herzustellen.



Abb. 39. Klemmösse für Kurve (Rollenbetrieb).

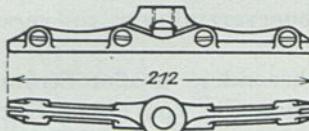
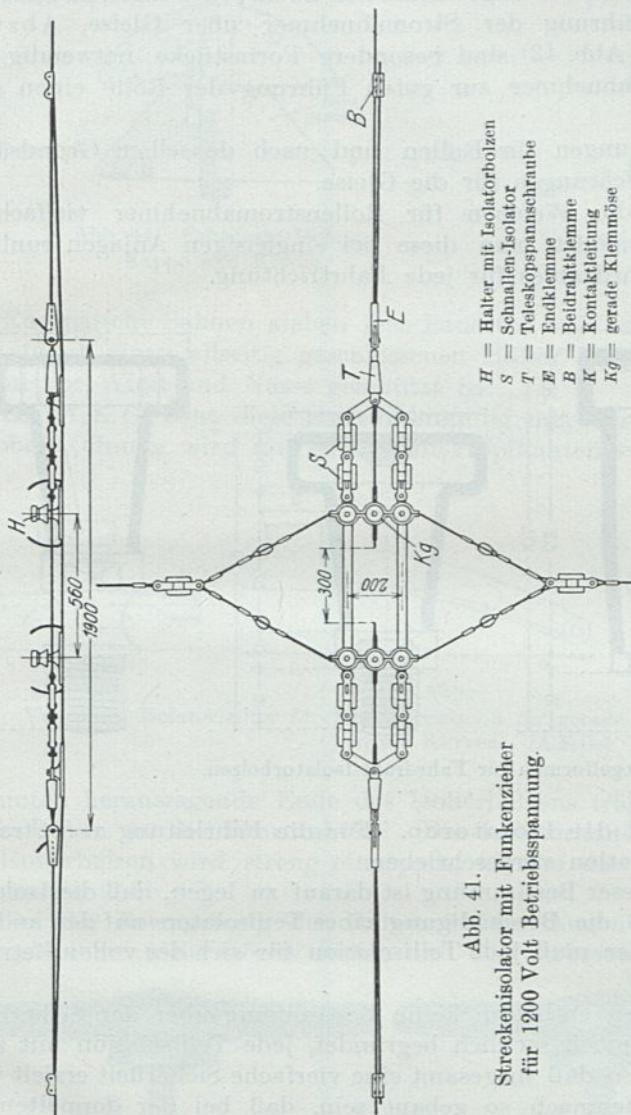


Abb. 40. Fahrdräht-Klemmösse für Kurven (A.E.G.).

Desgleichen sind aus Messing diejenigen Klemmösen herzustellen, die zur Stromzuführung dienen (Speiseösen).

In Kurven können die erwähnten frei beweglichen Ösen nicht verwendet werden,



Abt. 41.
Streckenisolator mit Funkenzieher
für 1200 Volt Betriebsspannung.



Abb. 42. Schmiedeeiserne Fahrdrahtweiche für Rollenbetrieb (A.E.G.).

weil sie sich entsprechend dem Seitenzug schief einstellen würden. Zu diesem Zwecke dienen besondere Ösen (Abb. 39), die die Leitung entsprechend sicher halten können.

Aus Gründen der Betriebssicherheit muß die Fahrleitung bei Straßenbahnen unter Zwischenschaltung von Abteilungsisolatoren in abschaltbare Teilstrecken von etwa 500 m unterteilt werden. Die Abteilung isolatoren müssen so eingerichtet sein, daß die ununterbrochene Führung der Stromabnehmer gesichert sei und daß die Isolation für die volle Fahrdrahtspannung auch für den Fall ausreiche, daß der volle Strom eines Fahrzeuges unterbrochen werden muß. Neuere Bauarten sind daher mit besonderen Funkenziehern ausgerüstet (Abb. 41).

Die mechanische Widerstandsfähigkeit der Streckenisolatoren war ursprünglich ein wunder Punkt der Fahrleitungsanlage; man hat daher stets beiderseits der Abteilung isolatoren Verankerungen angeordnet, um für den Fall eines Leitungsbruches diesen heiklen Bestandteil vor ungewöhnlichen Beanspruchungen zu schützen.

Zur ununterbrochenen Führung der Stromabnehmer über Gleise, Abzweigungen und Kreuzungen (Abb. 42) sind besondere Formstücke notwendig, die insbesondere für Rollenstromabnehmer zur guten Führung der Rolle einen sorgfältigen Entwurf erfordern.

Die Weichen und Kreuzungen für Rollen sind nach denselben Grundsätzen gebaut wie die gleichen Einrichtungen für die Gleise.

Nachdem insbesondere die Weichen für Rollenstromabnehmer vielfach zu Störungen Anlaß geben, vermeidet man diese bei eingleisigen Anlagen tunlichst durch Verlegung je eines Fahrdrähtes für jede Fahrtrichtung.

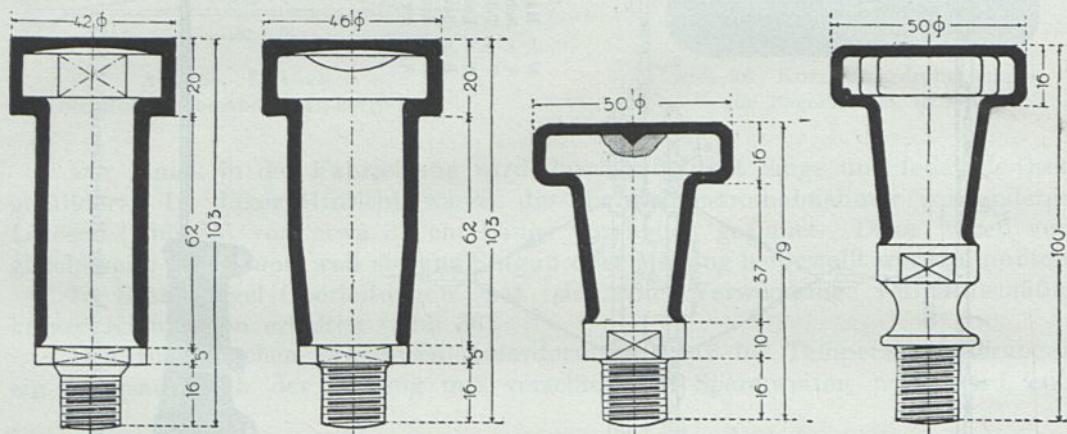


Abb. 43. Regelformen für Fahrdräht-Isolatorbolzen.

Die Isolatorhalter und die Isolatoren. Für die Fahrleitung von Straßenbahnen ist eine doppelte Isolation vorgeschrieben.

Das Hauptgewicht bei dieser Bestimmung ist darauf zu legen, daß die Isolation derartig unterteilt werde, daß die Beschädigung eines Teilsisolators auf den anderen nicht übergreifen kann. Weiter muß jede Teilsolation für sich der vollen Betriebsspannung standhalten können.

Die geltenden Vorschriften enthalten keine Bestimmung über den Sicherheitsgrad der Isolation. Es ist jedoch sachlich begründet, jede Teilsolation mit zweifacher Sicherheit auszulegen, so daß insgesamt eine vierfache Sicherheit erzielt wird.

Jeder Teilsisolator muß demnach so gebaut sein, daß bei der doppelten Betriebsspannung weder ein Durchschlag noch ein Überschlag eintritt.

Die bei Straßenbahnen üblichen Mittelspannungen von nicht über 800 Volt gestatten die Anwendung von Hartgummi zur Herstellung der Isolation. Dieser Baustoff wird deshalb anderen vorgezogen, weil sich derselbe bei genügender Wetterbeständigkeit mit geringen Dimensionen in zweckmäßige Formen bringen läßt und sich insbesondere zur Umformung von Eisenkörpern eignet.

Es ist die Regel, zur ersten Isolation (gerechnet vom Fahrdräht) mit Hartgummi umpreßte Bolzen zu verwenden, die in geeignete Halter eingesetzt werden (Abb. 43).

Die ursprüngliche, zurzeit in Amerika immer noch bevorzugte Bauart sieht zweiteilige Isolatorkörper (Abb. 44 u. 45) — sog. Kappe und Konus — vor; zwischen beide Teile wird die Schelle des Halters geschraubt. Abgesehen davon,

daß diese Bauart zwei mit Hartgummi umpreßte Bestandteile verlangt, weist sie den Nachteil auf, daß der Hartgummi vollständig den Unbilden der Witterung ausgesetzt ist.

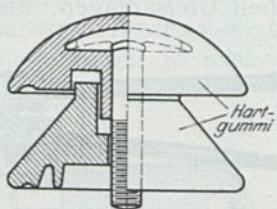


Abb. 44. Fahrdräht-Isolator:
Kappe und Konus.



Abb. 45. Fahrdräht-Isolator:
Kappe und Konus.

Europäische Bahnen ziehen jene Bauarten vor, bei welcher ein Isolatorbolzen (Abb. 46) in einen allseitig geschlossenen Halter eingesetzt wird, so daß der Hartgummi vor Wind und Nässe geschützt ist.

Die A. E. G. baut diese Halter einteilig mit oben eingesetzten Bolzen (Abb. 46); die obere Öffnung wird mit einem mit Tropfkanten versehenen Deckel verschraubt;

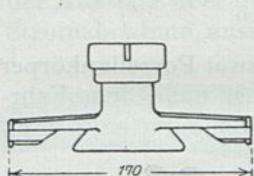


Abb. 46 a.

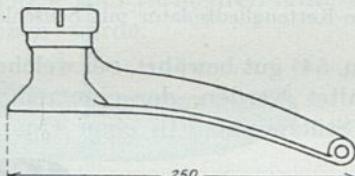


Abb. 46 b.

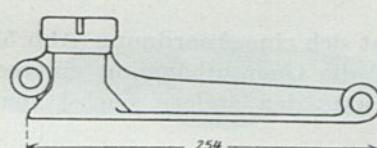


Abb. 46 c.

Fahrdräht-Isolatorhalter für Bügelbetrieb: a für gerade Strecke, b für halbe Züge,
c für Kurven. (A.E.G.)

das unten herausragende Ende des Isolierbolzens trägt Vierkant und Gewinde zum Einschrauben in die Fahrdrähtöse. Die Isolatorhalter der S. S. W. sind zweiteilig, der Isolierbolzen wird streng eingepaßt, hierauf die zwei Teile fest vernietet bzw verschraubt (Abb. 47).

Bei der Formgebung der Halter ist vor Augen zu halten, daß sie die glatte Stromabnahme nicht stören dürfen und daß insbesondere in Kurven die Richtung

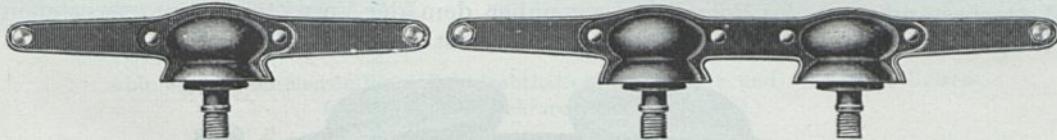


Abb. 47. Regelformen der S. S. W. für Isolatorhalter.

des Kurvenzuges eingehalten sein muß, damit sich der Halter nicht schief stellt und gegebenenfalls der Stromabnehmer anschlägt.

Als zweite Isolation herrscht der Hartgummi nicht mehr allgemein. Es sind zwar noch vielfach sog. „Nüsse“, Spannkugeln, im Wesen zwei durch Hartgummi gegeneinander isolierte Kettenglieder, gebräuchlich, die auch daran kranken, daß der Hartgummi vollständig frei liegt (Abb. 48). In zahlreichen Betrieben ist man auf Porzellanspannkugeln übergegangen (Abb. 49 bis 52).

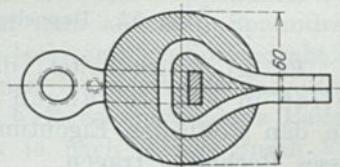


Abb. 48. Spannisolator
aus Hartgummi.

Die beschriebene Anordnung der Isolation ist dadurch gekennzeichnet, daß — guten Zustand der ersten Isolation vorausgesetzt — die Quer- und Spanndrähte, die die Lage der Leitung festlegen, spannungsfrei sind. Dieser Grundsatz hat einen gewissen Wert, insbesondere bei umständlichen Gleisanlagen; dies läßt sich



Abb. 49. Porzellan-Spannkugel mit Drahtschlaufen. (A.E.G.)

meist gerade bei diesen nur schwer ausführen, weil die Weichen und Kreuzungen isoliert nicht hergestellt werden. Die Betriebssicherheit der Anlage wird dadurch nicht beeinträchtigt, wenn die erste Isolation nicht unmittelbar an der Öse sitzt. Es

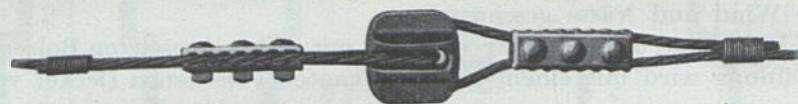


Abb. 50. Porzellan-Kettengliedisolator mit Seilschlaufen.

hat sich eine Anordnung (Abb. 53 u. 54) gut bewährt, bei welcher zwei Porzellankörper in die Queraufhängung eingeschaltet werden, der eine möglichst nahe dem Fahrdräht, der andere nächst dem Stützpunkt. In einer Queraufhängung sind dann



Abb. 51. Porzellan-Kettenglied-Abspannisolator. (West.)

Größe	Prüfspannung trocken KV.	naß	Überschlag naß	Bruchlast kg
1		10	13	7250
2	20	15	19	7250
3		15	20	10500

allerdings statt insgesamt drei deren vier Stück notwendig, aber im Preis stellt sich die erste Anordnung wesentlich teurer, abgesehen von der unbeschränkten Wetterbeständigkeit des Porzellans gegenüber dem der Verwitterung unterworfenen Hartgummi. Die Drahthalter haben keine Isolation.

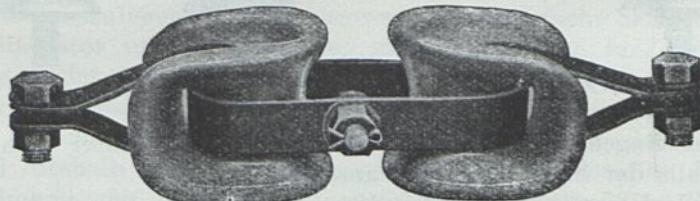


Abb. 52. Doppelter Kettenglied-Abspannisolator für 3000 V. (A.E.G.)

Es sei eingeschaltet, daß die Abneigung gegen die Verwendung von Porzellan in Fahrleitungen ganz unbegründet ist, sofern man Bauformen wählt, die den stofflichen Eigentümlichkeiten und der Art der Erzeugung dieses Erzeugnisses Rechnung tragen.

Der starke Schwund, dem der Scherben im Ofen unterworfen ist, verlangt unvermittelte Querschnittsänderungen zu vermeiden. Porzellan darf vernünftigerweise

nur auf Druck, niemals aber auf Zug oder Scherung beansprucht werden. Gestaltet man die Isolatoren diesen Grundsätzen entsprechend, kann man ihnen jede Aufgabe anvertrauen.

Insbesondere entfallen diejenigen Einschränkungen, die in bezug auf die seitliche mechanische Beanspruchung der mit Hartgummi bewehrten Isolierbolzen bestehen. Diese halten je nach der Type seitliche Züge von nicht über 150 und

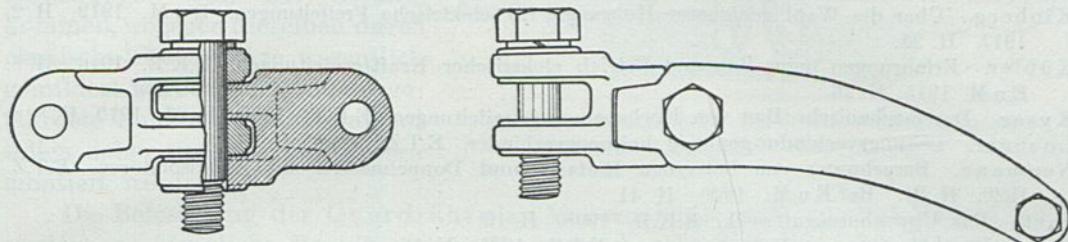


Abb. 53. Fahrdrähtthalter mit unisoliertem Bolzen. a) für gerade Strecke, b) für Kurven.

250 kg aus; hieraus folgt, daß man insbesondere bei schweren Fahrdrähtquerschnitten die Kurventeilung kleiner nehmen, d. h. die Anzahl der Stützpunkte bzw. der Auszüge über dasjenige Maß vermehren muß, das vom Standpunkt der sichereren Stromabnahme ausreichen würde.

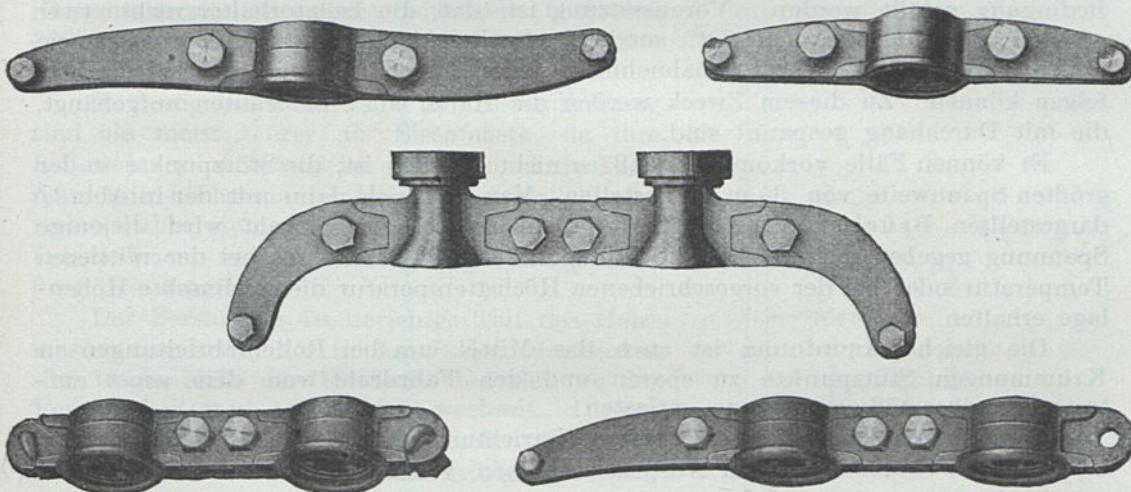


Abb. 54. Zusammenstellbare Fahrdrähtthalter für isolierte und unisolierte Bolzen für einen oder mehrere Drähte. (A.E.G.)

Dieser Gesichtspunkt ist auch dann von Wichtigkeit, wenn die Fahrleitung mit Doppeldraht ausgeführt werden muß. Der Hartgummibolzen wird in den meisten Fällen dem seitlichen Zug von zwei Drähten nicht standhalten können, es müssen daher deren zwei und dementsprechend ein teurer und schwerer Doppelhalter vorgesehen werden. Im anderen Fall befestigt man auf dem auf dem Spanndraht aufgehängten Querstück die beiden Ösen und ordnet die Isolatoren im Spanndraht an.

In den Abb. 46, 47, 53 u. 54 sind verschiedene Typen Isolatorhalter dargestellt.

Besonderes Interesse verdient eine während des Krieges entstandene Bauart, die aus einzelnen Regelstücken besteht, aus welchen je nach Bedarf durch Verschraubung die benötigten Typen zusammengestellt werden können. Dieses System eignet sich auch zur Verwendung von unisolierten Bolzen (Abb. 54).

Das Tragwerk und die Stützpunkte.

Literatur:

- Donath. Die Berechnung der Isolatorstützen. E.T.Z. 1920. H. 41.
 Edler. Berechnung der Holzmaste für elektrische Freileitungen. E.u.M. 1919. H. 28.
 Feuer. Berechnung gegliederter eiserner Gestänge für Freileitungen. E.T.Z. 1920. H. 37.
 Kallir. Hochspannungsleitungen mit eisernen Masten. E.u.M. 1906. H. 43.
 Kallir. Über Hochspannungsfreileitungen. Z.O.J.A.V. 1909. Nr. 35.
 Kinberg. Über die Wahl geeigneter Holzmaste für elektrische Freileitungen. E.u.M. 1919. H. 2, 1917. H. 29.
 Kübler. Erfahrungen beim Bau und Betrieb elektrischer Kraftfernleitungen. E.K.B. 1916. H. 8. E.u.M. 1915. H. 26.
 Kyser. Der mechanische Bau von Hochspannungsfreileitungen. E.K.B. 1909. H. 27. 1910. H. 8.
 Loebner. Leitungsverbindungen und Leitungsverbinder. E.T.Z. 1917. H. 32.
 Neumann. Berechnung von hölzernen Einfach- und Doppelmasten mit Stützisolatoren. E.T.Z. 1920. H. 21. Ref.E.u.M. 1920. H. 41.
 Nieß. Das Uppenbornkraftwerk. E.K.B. 1908. H. 19.
 Otto. Durchbiegung von Leitungsmasten. E.T.Z. 1905. H. 16.
 Seehase. Ein neuer Hochspannungsmast. E.T.Z. 1913. H. 17.
 Wahn. Der verankerte und verstrebte Leitungsständer. E.T.Z. 1920. H. 50.
 — Seilklemmen und Seilverbindungen. P.M.K. 1916. H. 45.

Die gleichmäßige Geschmeidigkeit der Fahrleitung ist eine der wesentlichen Voraussetzungen für die klaglose Stromabnahme und gleichmäßig geringe Abnutzung der Fahrleitung. Je leichter die Fahrdrähthalter, umso vollkommener kann diese Bedingung erfüllt werden. Voraussetzung ist, daß die Isolatorhalter nicht starr an den Stützpunkten befestigt, sondern elastisch aufgehängt sind, so daß sie unter dem Einfluß des Stromabnehmers jeder Lagenänderung des Fahrdrähtes folgen können. Zu diesem Zweck werden die Halter auf Stahldrähten aufgehängt, die mit Durchhang gespannt sind.

Es können Fälle vorkommen, daß es nicht möglich ist, die Stützpunkte in der größten Spannweite von 35 m aufzustellen. Man hilft sich dann mit der in Abb. 27 dargestellten Brückenkonstruktion. Dem Tragseil oder Draht wird diejenige Spannung gegeben, bei welcher die Stützpunkte des Fahrdrähtes bei der mittleren Temperatur oder bei der vorgeschriebenen Höchsttemperatur die gewünschte Höhenlage erhalten.

Die gleiche Anordnung ist auch das Mittel, um bei Rollenfahrleitungen in Krümmungen Stützpunkte zu sparen und den Fahrdräht von dem sonst auftretenden übermäßigen Zug zu entlasten.

In verkehrsreichen Städten müssen Einrichtungen, die namhafte Flächen der beschränkten Straßenbreite in Anspruch nehmen, vermieden werden. Hierauf und auf die im allgemeinen niedrigeren Kosten ist es zurückzuführen, wenn man Maste, wo irgend möglich vermeidet, und die Gebäudemauern zur Befestigung der Querdrähte heranzieht.

Für diesen Zweck sind Mauerhaken für Zugkräfte bis 250 kg verwendbar. Für größere Kräfte, namentlich Verankerungen, sind mit vier Steinschrauben befestigte Rosetten nötig. Die Rosetten werden für Zugkräfte bis 500 bis 600, äußerst bis 1000 kg gebaut. In allen Fällen wird gesundes tragfähiges Mauerwerk vorausgesetzt.

Die Stromabnehmer selbst schwingen, andererseits versetzen sie auch den Fahrdräht in geräuschvolle Schwingungen, die sich durch die Mauern fortpflanzen und von den Bewohnern der nächstgelegenen Räume als lästige Störungen empfunden werden. Mauerhaken und Rosetten müssen daher stets mit Schalldämpfern (Abb. 55) ausgerüstet sein. Gummipuffer, Holz- oder Filzzwischenkörper haben sich für diesen Zweck als geeignet erwiesen. Die Zwischenschaltung dieses elastischen Bestandteiles ist auch von einem anderen Standpunkt notwendig.

Es läßt sich bei Fahrleitungen trotz genauer Berechnung nicht vermeiden, daß etwa durch spätere bei den Instandsetzungsarbeiten vorgenommenen Änderungen unvorhergesehene Beanspruchungen auftreten. Wenn die Stützpunkte absolut starr sind, wie es bei Mauerhaken und dergleichen der Fall ist, können diese gefährlichen Beanspruchungen voll zur Geltung kommen, wogegen dieselben durch elastische Stützpunkte wesentlich gemildert werden. Besonders gefährdete Punkte (Verankerungen) sollen daher tunlichst auf Masten montiert werden.

Die Befestigung der Querdrähte an Mauern leidet auch an dem Mangel, daß etwaige nachträgliche Regulierungen die gänzliche Wiederholung der Montage bedeuten, indem sich die Mauerhaken nicht verrücken lassen.

Wenn die in der Bahnnähe befindlichen Bauten keine geeigneten Stützpunkte für das Tragwerk der Fahrleitung bieten oder das durchfahrene Gebiet überhaupt unbebaut ist, sind zur Anbringung der Leitung eigene Stützpunkte zu schaffen. Außerhalb des Stadtgebietes und für leichte Fahrleitungsanlagen (Gesamtquerschnitt aller Leitungen höchstens 300 qmm) sind Holzmaste (Abb. 56) die billigste Ausführung.

In bezug auf die Kosten der Instandhaltung sind sie meist teurer als Eisenmaste, da ihre Lebensdauer beschränkt ist. Im Durchschnitt kann man mit höchstens 10 Jahren rechnen. Eisenmaste haben zumindest die drei- bis vierfache Lebensdauer, verlangen sorgfältige Instandhaltung des Anstriches.

Der Zerstörung ist derjenige Teil des Holzmastes ausgesetzt, der in den Boden eingelassen sich in der Nähe der Oberfläche befindet, wo der Feuchtigkeitsgrad am meisten wechselt. Diesem Schaden trachtet man mit Asphalt- und Teerumhüllungen vorzubeugen; der Erfolg ist zweifelhaft, weil das Holz unter hermetischem Verschluß erstickt und auch auf diese Art seine Festigkeit einbüßt.

Die sog. Verbundbauart sieht für Holzmaste besondere Füße aus Formeisen oder Sockel aus Beton vor. Diese Ausführungen sind zweckentsprechend; ihr Preis steht zwischen denjenigen der Holz- und Eisenmaste.

Für mäßige Kräfte und nicht zu lange Maste können breitflanschige I-Formeisen verwendet werden; diese Typen weisen in der Flanschrichtung sehr geringe Widerstandsmomente auf, so daß alleinstehende Maste in Gegenden, die stark vom Wind bestrichen werden, geknickt werden.

Für Außenstrecken und Vollbahnen finden meistens eiserne Gittermaste Verwendung, die bei geringem Gewicht für die verschiedensten Zwecke unschwierig zu erzeugen sind.

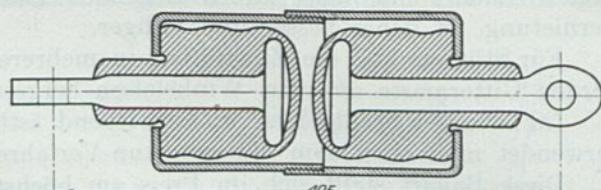


Abb. 55. Längsschnitt durch einen Schalldämpfer mit Gummipuffer. Gew. 1,2 kg.

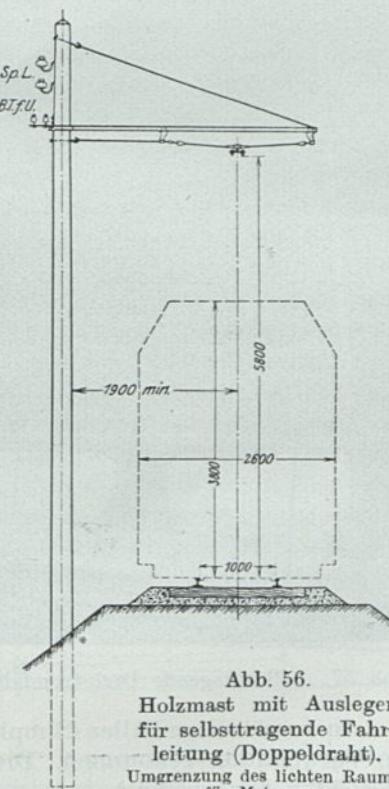


Abb. 56.
Holzmast mit Ausleger
für selbsttragende Fahr-
leitung (Doppeldraht).
Umgrenzung des lichten Raumes
für Meterspur.

Für einfache Stützpunkte hat sich die Type mit zwei U-Eisen als Regelbauart eingeführt. Die gegeneinander geneigt angeordneten Formeisen können mit Gitterbändern oder mit auf die Längsachse senkrechten Bindern verbunden werden. Die letztere Bauart mit nach außen liegenden Flanschen ermöglicht eine maschinelle Vernietung, ist daher besser und billiger.

Für Stützpunkte, die Zugkräften in mehreren Richtungen widerstehen müssen, werden Gittermaste aus vier Winkeleisen hergestellt.

Im bebauten Stadtgebiet, wo vorwiegend ästhetische Gesichtspunkte entscheiden, verwendet man nach dem Mannesmann-Verfahren hergestellte nahtlose Rohrmaste.

Diese Bauart stellt sich im Preis am höchsten.

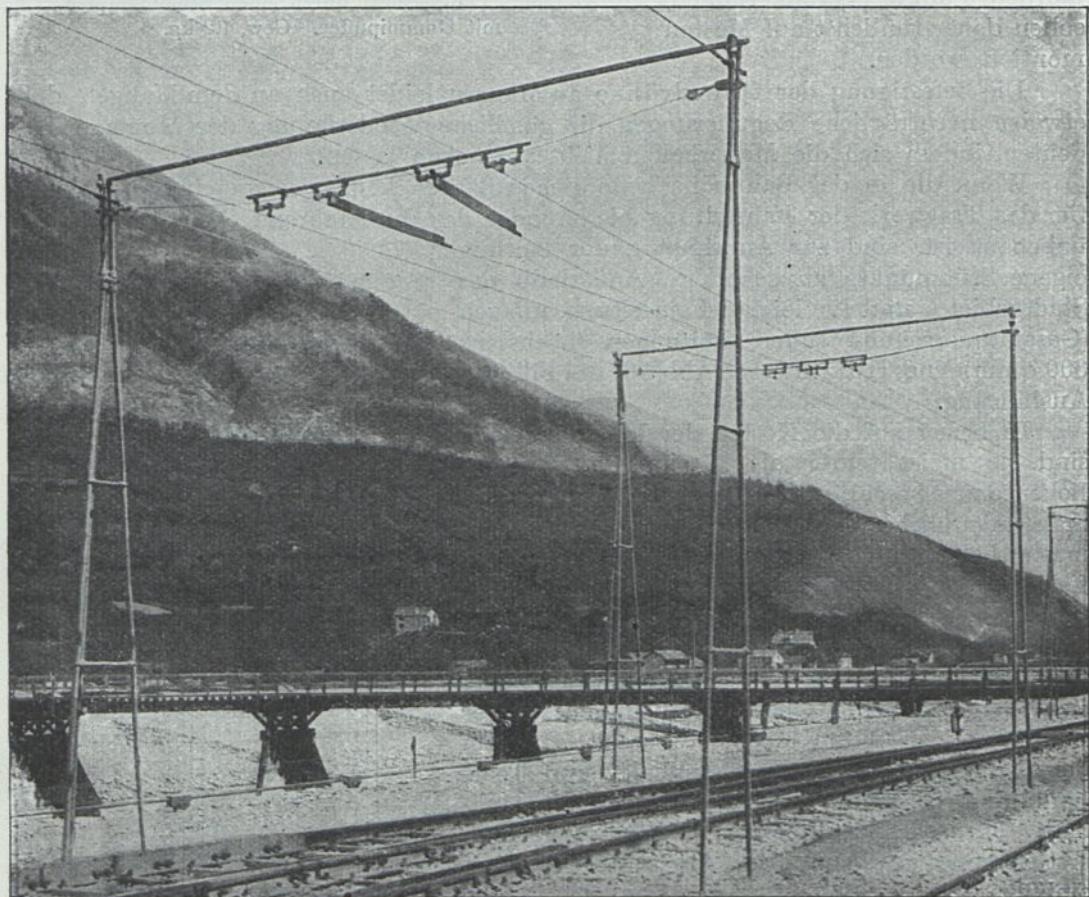


Abb. 57. Selbsttragende Drehstromfahrleitung mit aus Rohren zusammengesetzten Masten. (B.B.C.)

In vereinzelten Fällen (Simplon) sind zusammengesetzte Rohrmaste (Abb. 57) zur Verwendung gekommen. Diese Bauart ist durch gefällige Formen und geringes Gewicht gekennzeichnet.

Diesbezüglich steht dieselbe in scharfem Gegensatz zu den Betonmasten, deren Verwendung trotz ihrer sonstigen Eignung an dem großen Gewicht scheitert. Man kann die Eisenbetonmaste, wenn geeigneter Sand und Schotter zur Verfügung steht, am Bauort herstellen; darunter leidet aber die Sorgfalt der Erzeugung.

Die Anordnung der Fahrleitung an Armauslegern gibt die günstigste Mastbeanspruchung. Diese Anordnung wird auch bei zweigleisigen Bahnen zu bevorzugen sein, wenn die Entfernung der Bahnachsen Raum für die Unterbringung

frei lässt. Ist dies nicht der Fall, sind Doppelmaste mit Jochen vorzusehen, weil die Queraufhängung ohne Joche bei schweren Leitungsanordnungen sehr ungünstige Beanspruchungen gibt. Um diesen entgegenzuwirken, verwendet man namentlich bei Holzmasten Erdanker. Die Amerikaner pflegen überdies die Maste stark nach außen geneigt zu setzen.

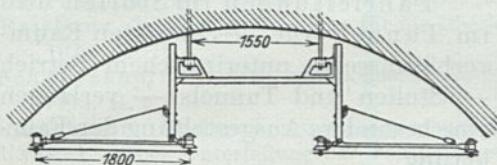


Abb. 58. Anordnung der Fahrleitung im Mont-Cenis- und Giovi-Tunnel.
Drehstrom 3300 V.

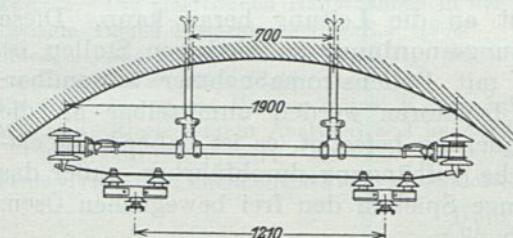


Abb. 59. Anordnung der Fahrleitung im Mont-Cenis- und Giovi-Tunnel.
Drehstrom 3300 V.

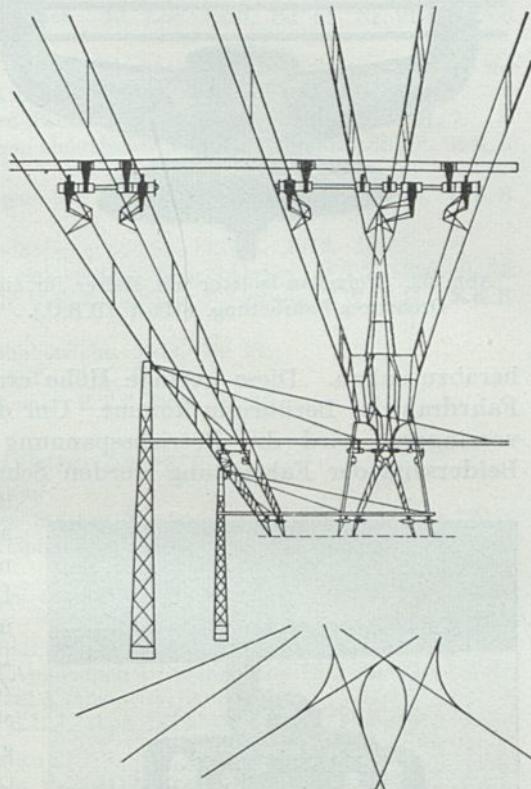


Abb. 60. Ansicht der Drehstromfahrleitung mit Längsaufhängung in einer englischen Weiche (Italien. Staatsb.).

Fahrleitungen für Drehstrombahnen. Drehstrombahnen verwenden wegen Umständlichkeit der Anordnung meist selbsttragende Oberleitungen, die wegen der Nähe der zwei den vollen Spannungsunterschied aufweisenden Fahrdrähte sehr sorgfältig verlegt und gegeneinander isoliert werden müssen (Abb. 58 bis 61). Die meist vorhandenen Tunnels verhindern die sonst wünschenswerte Auseinanderlegung der beiden Fahrleitungen. Die Entfernung der beiden Leitungen der mit 3000 Volt Drehstrom betriebenen italienischen Bahnen beträgt 870 bis 1020 mm. Die Stromabnehmerwalzen und -bügel sind nur 650 bzw. 820 mm breit, verlangen daher sehr dichte Mastfolge in Krümmungen.

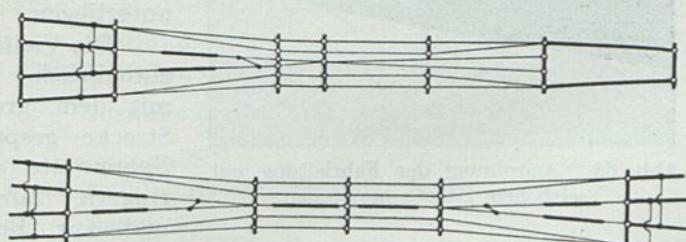


Abb. 61. Lageplan einer Drehstromfahrleitung in einer englischen Weiche (Italien. Staatsb.).

Die ursprünglich angewendete Hartgummi-Isolation ist durchweg verlassen; man ist auch hier auf Porzellan übergegangen (Abb. 62). Zur strengen Einhaltung der Drahtentfernung sind die Isolatorhalter an dem Stützpunkt als feste Rahmen ausgebildet, die ihrerseits elastisch aufgehängt und noch einmal isoliert sind (Abb. 58).

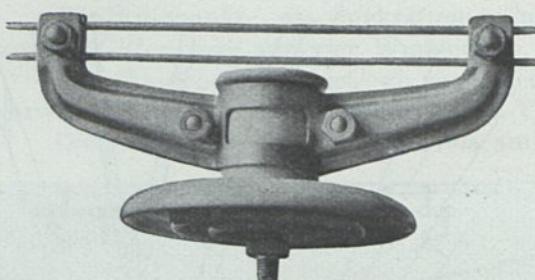


Abb. 62. Porzellan-Isolator mit Halter für eine Drehstrom-Fahrleitung, 3300 V (B.B.C.).

herabzusenken. Diese geringe Höhe ermöglicht es, daß die Belegschaft mit dem Fahrdrähten in Berührung kommt. Um die hiermit verbundene Gefahr möglichst zu verringern, wird die Betriebsspannung bis auf 110 bis 220 Volt herabgesetzt. Beiderseits der Fahrleitung werden Schutzbretter vorgesehen, die unter den Fahrdrähten reichen und die so nahe aneinander angeordnet sind, daß der Kopf eines Mannes nicht an die Leitung heran kann. Diese Leitungsanordnung in niedrigen Stollen ist nur mit Rollenstromabnehmer anwendbar. Die Isolatoren werden unmittelbar an die Zimmerung befestigt, es ist daher keine elastische Aufhängung durchführbar, außer das geringe Spiel in den frei beweglichen Ösen. (Abb. 63.)

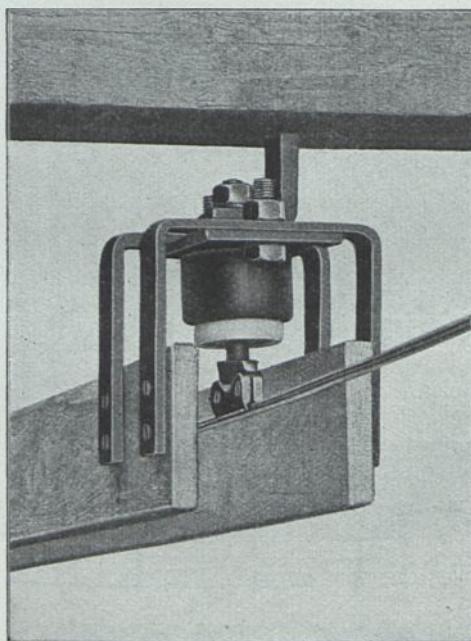


Abb. 63. Anordnung der Fahrleitung mit seitlichem Schutz im Stollen.

der Tunneldecke streift, ist es meist nötig, zwei Fahrdrähte anzubringen.

Die Isolation ist tunlichst nicht in der Bahnachse, sondern seitlich anzuordnen, um zu vermeiden, daß die Isolatoren unter dem zeitweilig noch vorhandenen Dampfbetrieb zu sehr leiden, andererseits ist es aus Gründen der Erhaltung der Tunneldecke unerwünscht am Scheitel wichtige Teile der Leitung zu festigen.

Die schwierigsten Stellen bilden die Weichen, die nur einpolig befahren werden und bei denen eine Überbrückung durch den Stromabnehmer unzulässig ist (Abb. 61).

Fahrleitungen im Stollen und im Tunnel. Die beschränkten Raumverhältnisse in unterirdischem Betrieb — Stollen und Tunnels — verlangen eine besondere Ausgestaltung der Fahrleitung.

Oft wird es in Grubenbetrieben nötig, die Fahrleitung bis etwa 1,80 m herabzusenken. Diese geringe Höhe ermöglicht es, daß die Belegschaft mit dem Fahrdrähten in Berührung kommt. Um die hiermit verbundene Gefahr möglichst zu verringern, wird die Betriebsspannung bis auf 110 bis 220 Volt herabgesetzt. Beiderseits der Fahrleitung werden Schutzbretter vorgesehen, die unter den Fahrdrähten reichen und die so nahe aneinander angeordnet sind, daß der Kopf eines Mannes nicht an die Leitung heran kann. Diese Leitungsanordnung in niedrigen Stollen ist nur mit Rollenstromabnehmer anwendbar. Die Isolatoren werden unmittelbar an die Zimmerung befestigt, es ist daher keine elastische Aufhängung durchführbar, außer das geringe Spiel in den frei beweglichen Ösen. (Abb. 63.)

Die Bauformen der Fahrleitungen öffentlicher Eisenbahnen in Tunnels unterliegen ebenfalls stark den räumlichen Einschränkungen. Hier kann die elastische Aufhängung nicht entbehrt werden, weil die Fahrgeschwindigkeiten gegenüber denjenigen der offenen Strecke keinen Einschränkungen unterliegen.

Die Vielfachaufhängung ist daher nicht entbehrlich. Die Kette kann jedoch nicht mit dem großen Durchhang der offenen Strecke gespannt werden; man muß die Spannweite auf etwa 25 bis 30 m verringern. Zur sicheren Führung des Bügels und zur Behinderung, daß derselbe an

3. Fahrleitungen mit Vielfachaufhängung.

Allgemeine Bauregeln.

Literatur:

- Aluminium-Kettenaufhängung. E.K.B. 1919. H. 20.
 Amberg. Overhead Contact Systems, Construction and Costs. Proc. 1915. H. 7.
 Cox. Contact System of the Butte, Anaconda and Pacific Railway. Proc. 1915. H. 7. S. 1447.
 Dawson. Über Stromzuführung bei elektrischen Bahnen. El. Lon. 1920. Bd. 85. Nr. 2199—2200.
 Ref.E.u.M. 1920. H. 43.
 Kuntze. Neue Fahrdrahtaufhängung der mit 10000 Volt Wechselstrom betriebenen Strecke der New York, New Haven and Hartfordbahn. E.K.B. 1912. H. 1.
 Lebenbaum. The Contact System of the Southern Pacific Co. Portl. Div. Proc. 1915. H. 7.
 Reishaus. Vielfach-Aufhängung für die Oberleitungen elektrischer Bahnen. Bauart „SSW“. E.K.B. 1920. H. 18.
 Schwarzkopff. Neuere amerikanische Ausführungen von Oberleitungen für Vollbahnen. E.K.B. 1915. H. 4.
 Seefehlner. Hochspannungsleitungsanlagen für elektrische Bahnen. E.T.Z. 1913. H. 6.
 Usbeck. Über Unterteilung der Fahrleitungen bei elektrischen Hauptbahnen. E.T.Z. 1920. H. 25.
 Westphal. Fahrleitung mit Vielfachaufhängung für Vollbahnen der Bergmann E.W.-A.G. E.K.B. 1919. H. 33.
 Die Kettenaufhängungen der A.E.G. Mitteil. für Bahnbetriebe. 1914. Nr. 12.
 Einfachdraht für elektrische Bahnen. E.K.B. 1915. E.T. 1915. S. 229.
 Neue Stromzuführungsanlage für elektrische Vollbahnen. E.T.Z. 1904. H. 15.

Beschreibung ausgeführter Anlagen:

Amerika.

- Törpisch. Die elektrischen Bahnen der Vereinigten Staaten Nordamerikas. G.A. 1907. Nr. 726.
 Zehme. Die elektrischen Hauptbahnen in den Vereinigten Staaten. G.A. 1909. Nr. 768.
 Cascade Tunnel Electrification. E.R.J. 1909.
 Chicago, Lake Shore & South Bond Ry. Seven years of operating experience. E.R.J. 1915. Nov.
 Ref. E.K.B. 1916. H. 15.
 Electrification of the Hoosac Tunnel E.R.J. Juli 1911.
 Murray. Electrification Analysed and its practical Application to trunk Line Electrification. Proc. 1911. B.I.E.K.V. 1912. Bd. VIII. E.R.J. Mai 1912, Apr. 1910, Aug. 1907.
 Pennsylvania Rr. Philadelphia-Paoli Electrification. E.R.J. Apr. 1916. Jan. 1916. Nov. 1916.

Deutschland.

- Freund. Der elektrische Betrieb auf der Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf III. Kraftwerk und Fahrleitung. E.T.Z. 1909. H. 52. Glinski, Z.V.D.J. 1908. S. 1581.
 Usbeck. Die Fahrleitung der A.E.G. auf der Strecke Dessau-Bitterfeld.
 Heyden. Die elektrische Zugförderung auf der Strecke Dessau-Bitterfeld. E.T.Z. 1911. H. 25.

England.

- Singlephase Electrification of the London, Brighton & South Coast Ry. E.R.J. Mai 1911.
 Midlandbahn, E.T.Z. 1909. H. 39. E.R.J. Juli 1908. E.K.B. 1907. H. 7.

Frankreich.

- Elektrisierungen der französischen Midi-Eisenbahngesellschaft. B.I.E.K.V. 1914. Nr. 6. E.R.J. Juli 1914.

Holland.

- Rotterdam-Haag-Scheveningen. E.R.J. Apr. 1916, Jan. 1916, Nov. 1915.

Norwegen.

- Rjukanbahn. E.K.B. 1912. H. 34.

Österreich.

- Mittenwaldbahn. E.T.Z. 1914. H. 23 u. E.K.B. 1913. H. 6. E.T.Z. 1912. H. 39.

Schweiz.

- Lang. Von der Elektrifizierung der Rhätischen Bahn. Sch.B.Z. Mai 1920.

Die theoretischen und praktischen Gesichtspunkte, die für eine Führung der Fahrleitung in ungebrochener, der Bahnachse im senkrechten Längsschnitt paralleler Linie sprechen, sind schon in früheren Abschnitten behandelt worden. Dieses Ziel kann grundsätzlich durch Aufhängung des Fahrdrähtes in verhältnismäßig kurzen

Entfernungen — 5 bis 6 m — erzielt werden. Es bildet für eine gute Stromabnahme, die in langer Lebensdauer des Stromabnahmegerätes und geringer Abnützung des Fahrdrähtes zum Ausdruck kommt, eine Voraussetzung, daß die dynamischen Eigenschaften der Fahrleitung grundsätzlich in der ganzen Länge des Drahtes überall dieselben seien. Mit anderen Worten, die Fahrleitung kann mit einem streng starren System ausgeführt sein oder man wählt ein durchaus elastisches geschmeidiges System.

Die Vermischung beider Bauarten hat sich als minderwertig erwiesen; im weiteren ist hieraus zu folgern, daß in einem elastisch gedachten System keine durch Gewicht oder sonstige Einrichtungen verursachten starren Stellen vorkommen dürfen, weil an solchen Stellen die Leitung den Druck des Stromabnehmers ganz anders erwidert, als an einer daneben befindlichen elastischen Stelle. Es stößt auch auf praktisch große Schwierigkeiten in der üblichen Höhe einer Fahrleitung, eine wirklich starre Anordnung auszuführen; mit wenigen Ausnahmen gehören die ausgeführten Fahrleitungen des Vielfachaufhängungssystems der rein elastischen Bauart an. Bei dieser strebt man im ganzen Lauf eine gleichmäßige Geschmeidigkeit und Elastizität des Arbeitsdrahtes bei durchhangloser Höhenlage an.

Für diese Bauart ist es eine wesentliche Voraussetzung, daß der Stromabnehmer außer dem Fahrdrähten und den möglichst leicht gehaltenen Klemmvorrichtungen keine anderen Gewichte anzuheben hat.

Die senkrechten Aufhängungen des Fahrdrähtes müssen grundsätzlich ein freies Spiel nach oben zulassen (Abb. 64). Zu diesem Zweck sind starre, aus einem Stück hergestellte, an das Tragseil festgeklemmte Hängevorrichtungen grundsätzlich ungeeignet. Für die senkrechten Aufhängungen eignen sich vielmehr nur kettenartig gegliederte Drähte, welche den Tragdraht oder das Tragseil locker umfassen, bandförmige Schlaufen oder Klemmen mit Spiel in senkrechter Richtung, wie sie bei den frei beweglichen Ösen angewendet sind.

Außer der Schmiegksamkeit der Fahrleitung ist von besonderer Wichtigkeit, daß das mit der Vielfachaufhängung erreichte Ziel, die Führung der Leitung in gestreckter Linie, auch wirklich erreicht werde.

Wenn das Tragseil zunächst auf den einzelnen Stützpunkt unverrückbar festigt gedacht wird, ist es klar, daß die durchhanglose Lage des auf dem Seil mit Aufhängungen bestimmter Länge befestigten Fahrdrähtes nur bei einer einzigen dem Entwurfe zugrunde liegenden Temperatur vorhanden sein kann.

Bei niedrigeren Temperaturen als die im Entwurf angesetzte wird entsprechend der Zusammenziehung des Drahtseiles ein geringerer Durchhang auftreten und der Fahrdräht hochgezogen werden. Der Durchhang wird negativ; die tiefste Stelle der Fahrleitung befindet sich beim Stützpunkt. Über ein gewisses Maß darf dieser negative Durchhang nicht wachsen, weil sonst die seitlichen Abstützungen hochgezogen werden und an den vorbeifahrenden Bügeln anschlagen. Bei Zunahme der Temperatur wird der Fahrdräht etwas durchsacken.

Außer diesem sich auf die ganze Spannweite verteilenden Durchhang entstehen auch von Aufhängung zu Aufhängung Einsenkungen des Fahrdrähtes. Um diese an sich niedrig zu halten, darf der Fahrdräht nicht ohne nennenswerte Zugspannung verlegt werden.

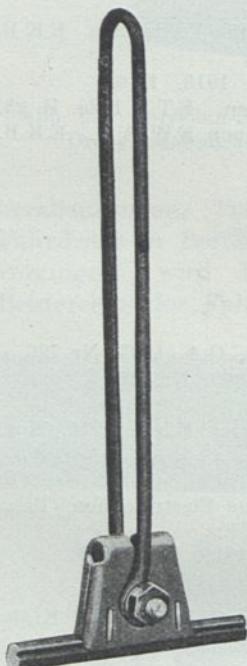


Abb. 64.

Fahrdrähteklemme mit lockerem Hänger.

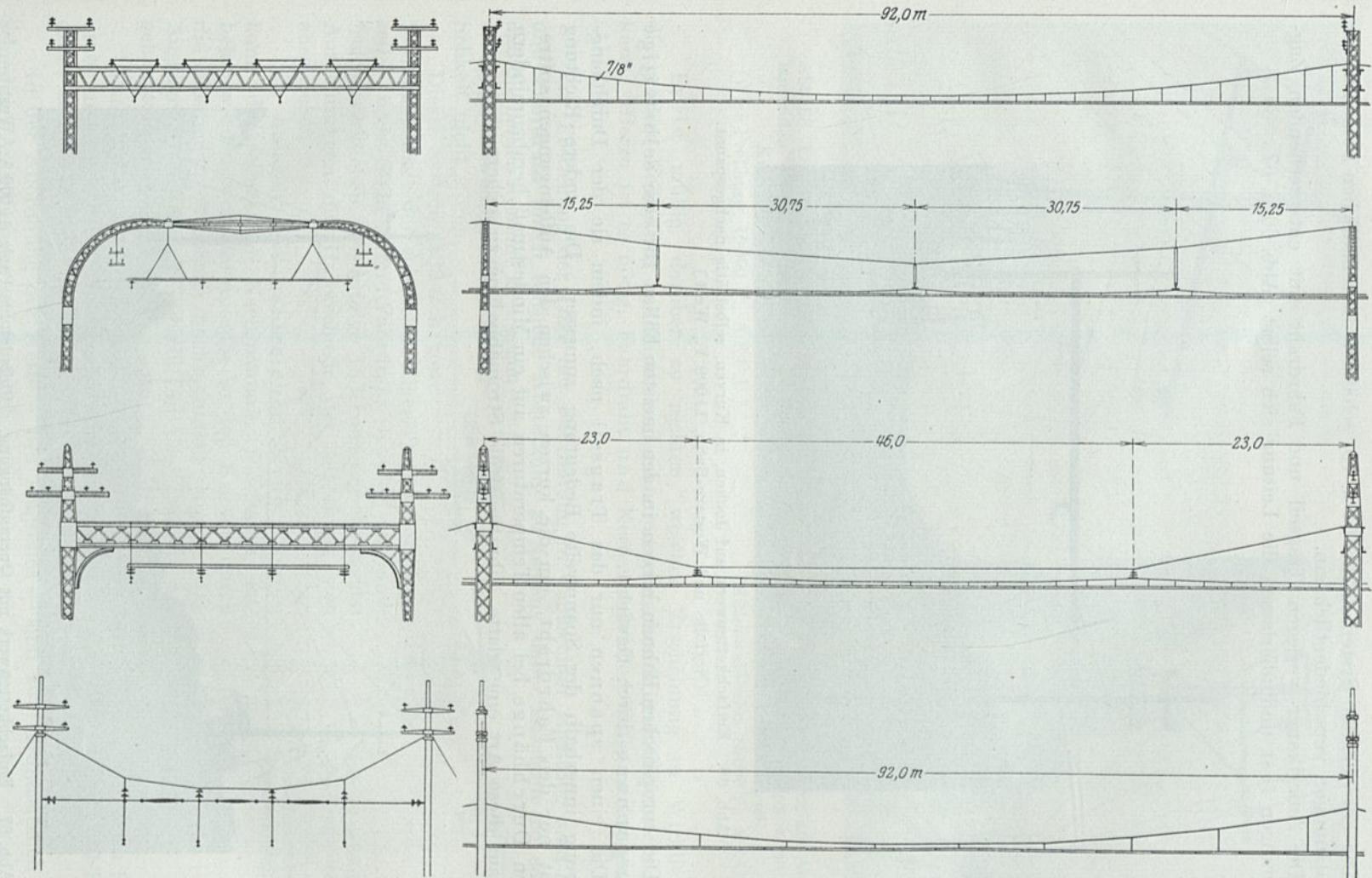


Abb. 65. Fahrleitungsanordnungen für Vielfach-(Längs-)Aufhängung der New Haven-Bahn. a) Doppelkettenwerk; b) Verbundkettenwerk mit geerdetem Tragseil, zwei Tragseile für vier Gleise; c) wie vor, jedoch ein Tragseil für jede Fahrleitung; d) Einfachkettenwerk.

Die entwickelten Systeme (Abb. 65 u. 75) schätzen die schädlichen Folgen dieser Erscheinungen verschiedentlich ein.

Die Amerikaner verlegen Tragseil und Fahrdräht mit entsprechenden Zugspannungen fest und überlassen die Leitung sich selbst (Abb. 66 u. 67).

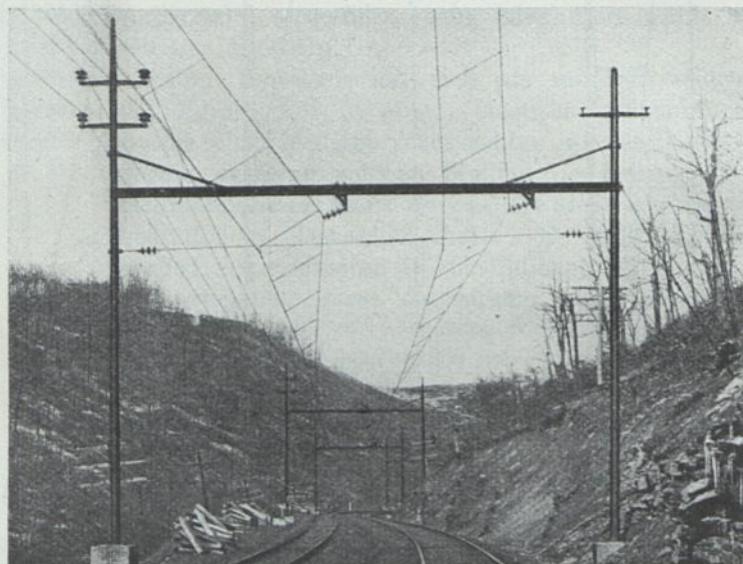


Abb. 66. Einfachkettenwerk auf Jochen, in Kurven, selbstdäig nachgespannt.
(Norfolk- und Western-Bahn, 11000 V., West.)

Die europäischen Bahnen sorgen in den meisten Fällen für eine selbstdäig Nachspannung durch Gewichte.

Die einen spannen nur das Tragseil nach, indem sie der Durchhangänderung innerhalb der Spannweite Bedeutung zumessen. Die andere Richtung spannt nur den Fahrdräht, um die kurzen, zwischen den Aufhängungen auftretenden Durchhänge bei allen Temperaturen auf ein Mindestmaß herabzumindern und auf diese Art eine glatte, vibrationsfreie Stromabnahme zu sichern.

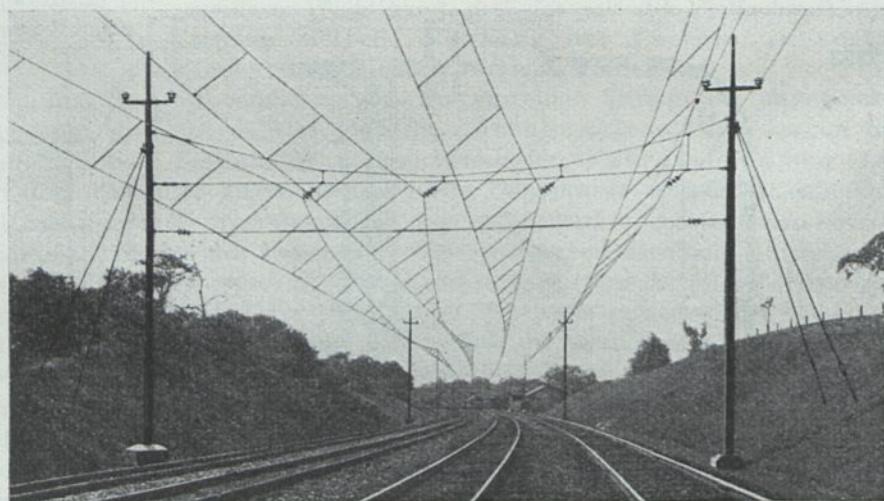


Abb. 67. Einfachkettenwerk mit Queraufhängung. (Philadelphia-Paoli, 11000 V., West.)

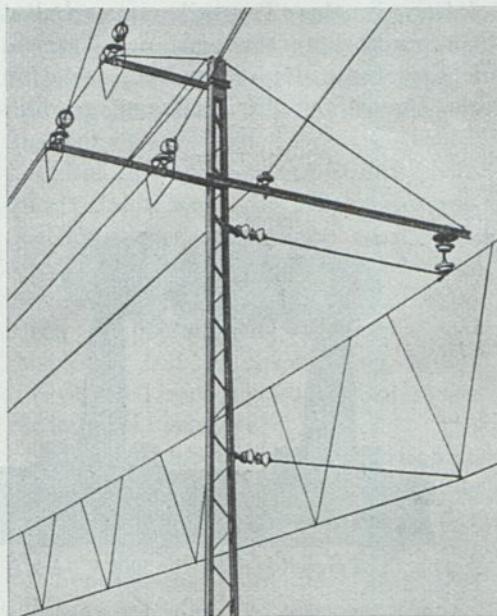


Abb. 68. Einfachkettenwerk mit durchlaufendem Tragseil. Fahrdrat und Kette nachgespannt.
(Wien-Preßburg, 15000 V., A.E.G.U.)

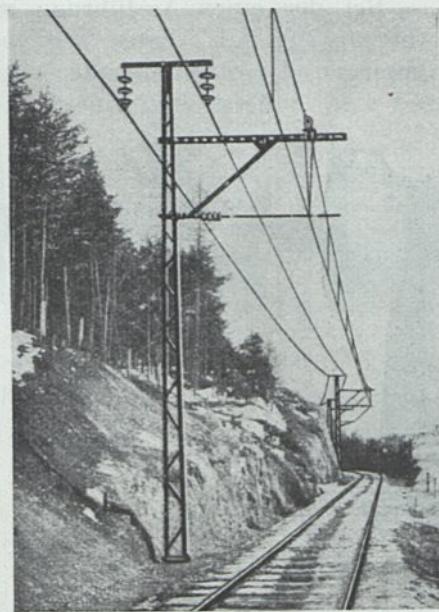


Abb. 69. Einfachkettenwerk auf Armauslegern mit auf den Stützpunkten unterbrochenem Tragseil.
(Mittenwaldbahn, 15000 V., A.E.G.U.)

Es ist müßig, darüber zu rechten, welcher Erscheinung in Wirklichkeit die größere Bedeutung zukommt, weil man mit einfachen Mitteln beides erreichen kann. Hierzu ist es nötig, Fahrdrat und Kette in gleicher Weise nachzuspannen (Abb. 68).

Zur Festlegung der Lage der Fahrleitung in wagerechter Richtung sind Kette und Fahrdrat durch seitliche Abstützung zu fassen, dabei ist dafür zu sorgen, daß die beiden Systeme sich gegenseitig die notwendige freie Beweglichkeit nicht stören.

Dieses System läßt sich trotz Verschiedenheit der stofflichen Eigenschaften von Tragseil — meist Stahl — und Fahrdrat (Kupfer) einwandfrei verwirklichen, weil zufolge Änderung der elastischen Ausdehnungen die Unterschiede der Streckung sich ausgleichen.

In Anlagen mit zahlreichen Krümmungen kann die selbsttätige Nachspannung überhaupt entbehrt werden, weil die Auszüge in den Kurven durch die Elastizität der Maste nachspannend wirken. Die Auszüge werden durch schiefe, an das Tragseil angehängte Drähte bewirkt.

Das Einfachkettenwerk besteht aus Tragseil, Hängedrähten und dem Fahrdrat und kann mit oder ohne selbsttätiger Nachspannung von Tragseil und Fahrdrat ausgeführt werden.

In der Anordnung der Kette — des Tragseiles — sind zwei grundsätzlich verschiedene Anordnungen gebräuchlich.

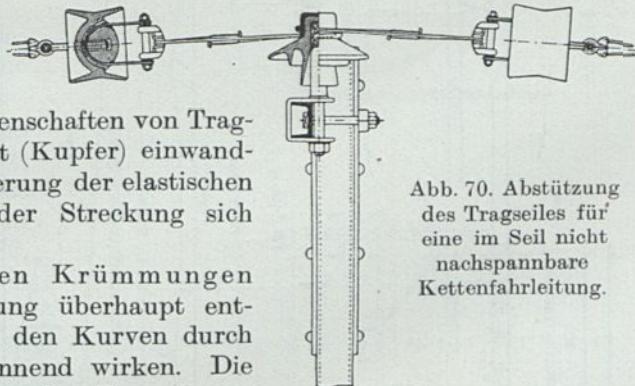


Abb. 70. Abstützung des Tragseiles für eine im Seil nicht nachspannbare Kettenfahrleitung.

Bei der einen Ausführung wird die Isolation in das Tragseil eingeschaltet (Abb. 69, 70), d. h. dieses wird bei jedem Stützpunkt unterbrochen, das Tragseil nimmt an der Stromführung kaum teil. Zur Erzielung der doppelten Isolation sind vier, äußerst drei Isolatoren nötig. Diese Bauart ist für Anlagen gewählt

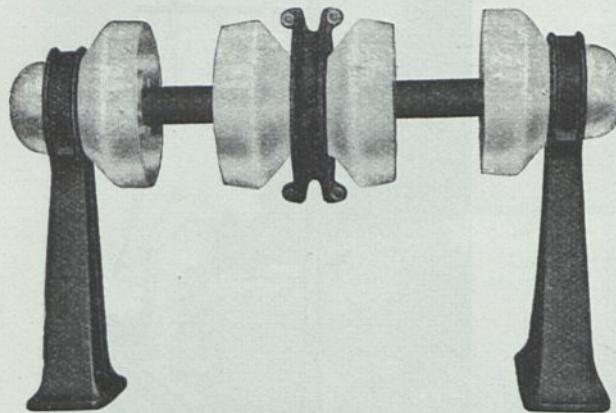


Abb. 71. Tragseil-Isolator für 15 000 V. (A.E.G.)

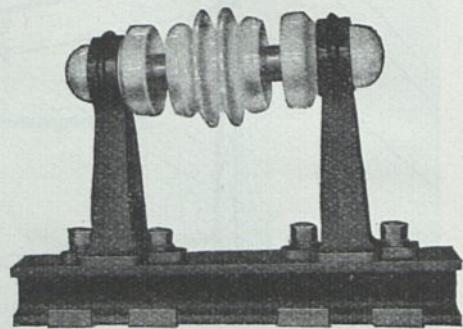


Abb. 72. Tragseil-Isolator für 3000 V. (A.E.G.)

worden, in welchen auf die selbsttätige Nachspannung vorweg verzichtet wurde. (Stubaitalbahn, Mittenwaldbahn, Southern Pacific Railway, Portland Division und andere.)

Derartige Leitungsanlagen sind mit Holzmasten mit Spannweiten bis 50 m, mit eisernen Masten mit Spannweiten bis 80 m ausgelegt worden. So sehr es wünschenswert ist, die Anzahl der Stützpunkte herabzusetzen, so wenig empfiehlt

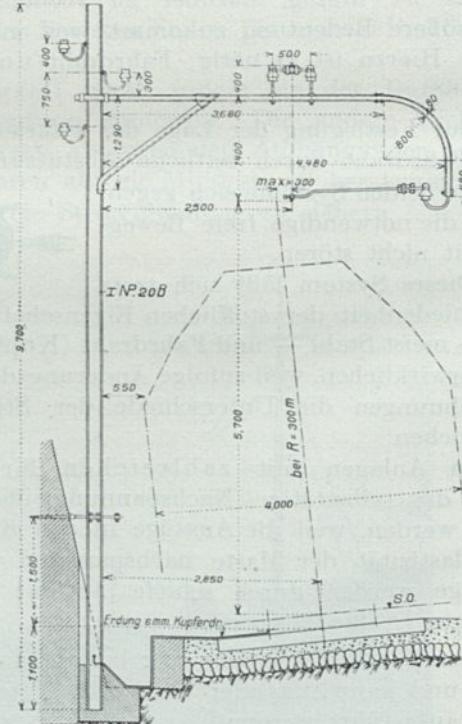
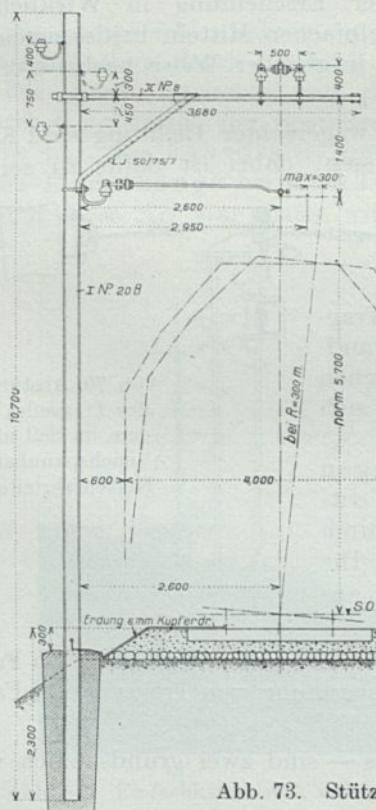


Abb. 73. Stützpunkte der Lötschbergbahn-Fahrleitung.

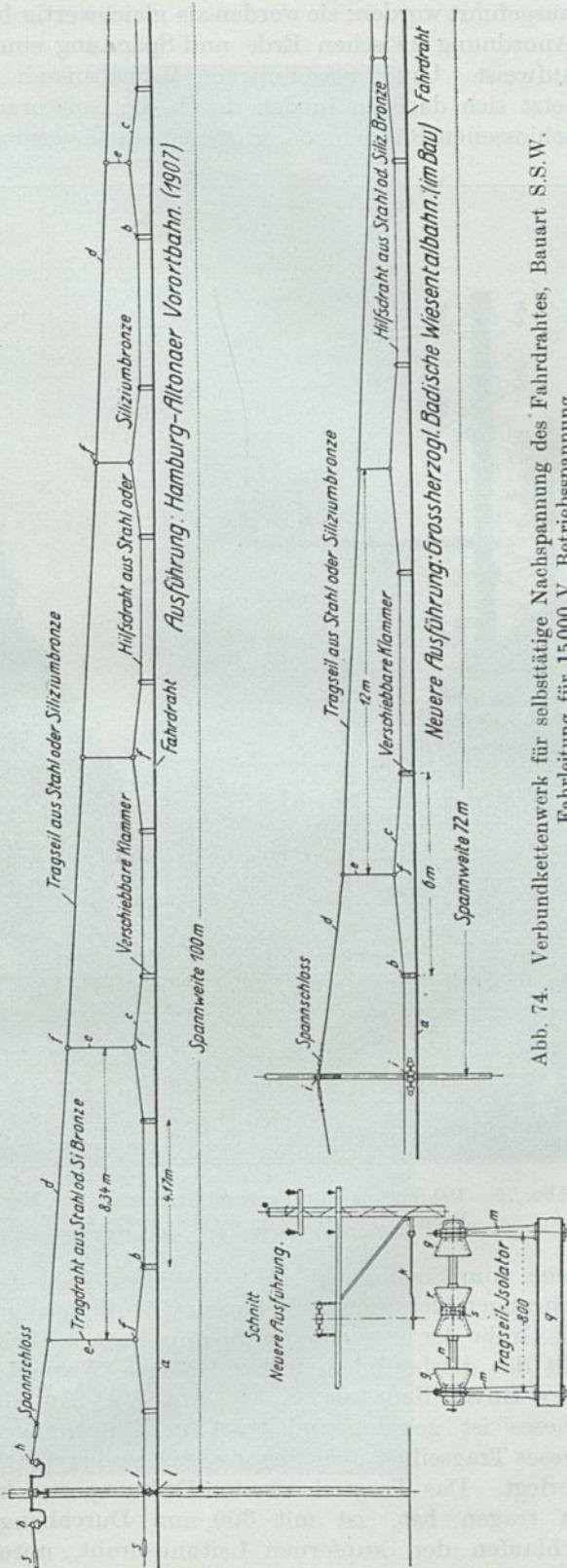
sich, die Mastentfernung über die angegebenen Maße zu steigern, weil Bügelentgleisungen bei starkem Wind und gegebenenfalls schlaffen Leitungen unvermeidlich sind.

Bei der zweiten Anordnung, die unter einem auch die Nachspannung des Tragseiles ermöglicht, wird letzteres nicht unterbrochen, sondern ungeteilt auf geeignet gestaltete Isolatoren aufgelegt oder gehängt. Bei Systemen mit Nachspannung bildet für das Seil eine drehbare Rolle den Stützpunkt (Abb. 68).

Mit festen Seilstützpunkten ist z.B. das Einfachkettenwerk der Norfolk- und Westernbahn (Abb. 66), sowie der Linie Philadelphia—Paoli (Abb. 67) der Pennsylvaniabahn ausgeführt. Das Kettenwerk der bei diesen Bahnen ausgeführten Bauart dient unter einem dazu, den Fahrdrähten in Bogen in die richtige Lage über der Gleisachse zu bringen. Das Kettenwerk befindet sich nicht in senkrechter Ebene oberhalb des Fahrdrähtes, vielmehr stellen sich die Hängedrähte als fächerförmige Strahlen in die Richtung der jeweiligen Mittelkraft aus dem anteiligen Drahtgewicht und dem seitlichen Zug. Diese Bauart spannt sich im Bogen innerhalb jeder Spannweite von selbst nach.

In Europa ist vielfach eine Anordnung in Gebrauch, bei welcher die Isolation mit wagerechter Achse angeordnet ist. Auf einer Achse sind drei Isolatoren konzentrisch aufgesetzt; auf dem mittleren Isolator ruht das Tragseil, die beiden äußeren Isolatoren werden von Böcken gefäßt (Abb. 71, 72, 73), die ihrerseits am Ausleger stehen oder hängen. Diese Bauart erfordert sehr genaue Arbeit, sonst entstehen Klemmungen in den Isolatoren. Der mittlere Isolator kann mit einer Rolle armiert und drehbar angeordnet werden, um die freie Beweglichkeit des Tragseiles in der Längsrichtung zu sichern.

Die beiden beschriebenen Anordnungen sind in ausgedehntem Maße



Abh. 74. Verbundkettenwerk für selbsttätige Nachspannung des Fahrdrähtes, Bauart S.S.W.
Fahrleitung für 15000 V. Betriebsspannung.

ausgeführt worden; sie werden als gleichwertig betrachtet, obzwar die zweitbeschriebene Anordnung zwischen Erde und Spannung einen wesentlich kürzeren Überschlagsweg aufweist. Unter gewöhnlichen Verhältnissen ist ein Überschlag nicht zu erwarten, setzt sich dagegen in den durch die Isolatorachse und den Ausleger gebildeten geschlossenen Rahmen ein größerer Vogel, verursacht dieser im Moment des Auffliegens

meist einen Kurzschluß. Dieser Fall kann bei der erstbeschriebenen Bauart nicht vorkommen.

In diese Gruppe gehört auch eine in Amerika für starke Ströme und hohe Geschwindigkeit ausgeführte Anordnung. Es sind zwei Fahrdrähte vorhanden, die durch entsprechende Distanzstücke in geringer Entfernung etwa 10—15 cm von einander gehalten und auf einem gemeinsamen Seil durch lockere Schlaufen aufgehängt werden. Zur Erzielung einer größtmöglichen Schmiegsamkeit und glatten Stromabnahme sind die Aufhängungen der beiden Fahrdrähte gegeneinander um je eine halbe Teilung versetzt.

Das Verbundkettenwerk. Mit diesem Namen wird eine Gruppe von Anordnungen bezeichnet, bei welchen drei, gegebenenfalls vier Drahtsysteme vorhanden sind: das mit Durchhang verlegte Tragseil, auf diesem hängt ein in gerader Bahn gespannter Hilfsdraht oder ein Hilfsseil. Auf diesem hängt mit kurze Längs- und Höhenverschiebungen zulassenden Klemmen der eigentliche vom Stromabnehmer bestrichene Fahrdräht. Der letztere wird bei den Ausführungen der Siemens-Schuckert-Werke nachgespannt (Abb. 74 u. 75). In bezug auf die Größe der anwendbaren Spannweiten, seitliche Abstützung, Größe des Durchhangs gilt das diesbezüglich früher Gesagte. Varianten dieser Anordnung wurden bei der New Haven-Bahn ausgeführt (Abb. 76). Auf den Masten ruht ein schweres Tragseil. Dieses ist geerdet und trägt in Entfernen von je etwa 30 m die Isolatoren; dieses Tragseil ist über Spannweiten von etwa 90 m mit großem Durchhang (1883 mm) verlegt. Das Tragseil zweiter Ordnung, welches nur über Spannweiten von 30 m zu tragen hat, ist mit 300 mm Durchhang gespannt und trägt mit lockeren Schlaufen den kupfernen Leitungsdräht, unterhalb welchem noch ein stählerner

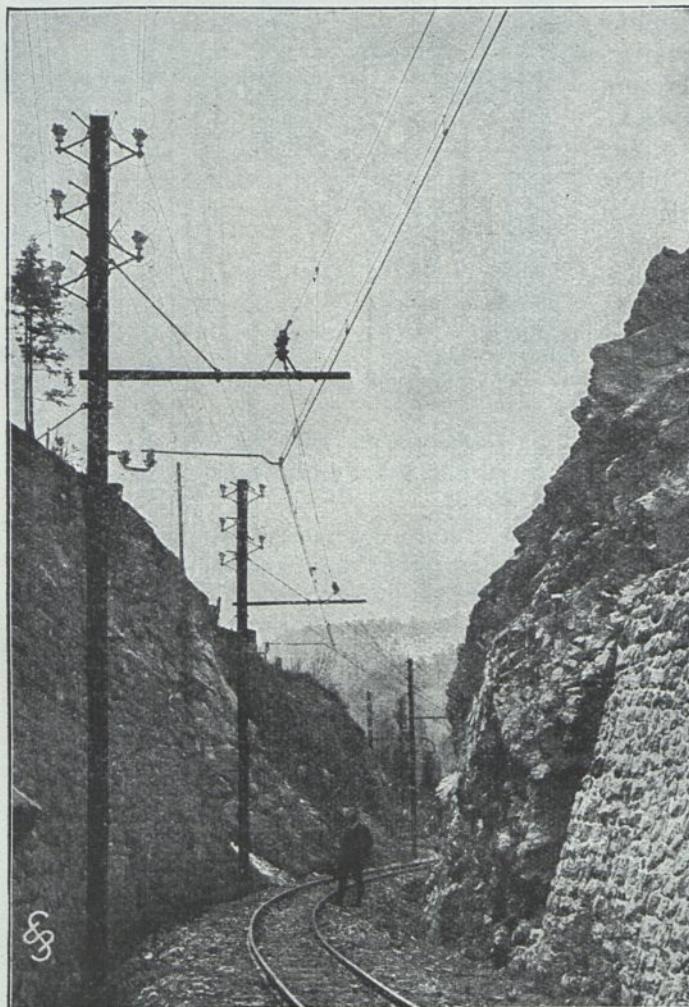


Abb. 75. Fahrleitung mit Verbundkettenwerk der Mariazeller Bahn. Wechselstrom 6000 V. (Oe.S.S.W.)

liche vom Stromabnehmer bestrichene Fahrdräht. Der letztere wird bei den Ausführungen der Siemens-Schuckert-Werke nachgespannt (Abb. 74 u. 75). In bezug auf die Größe der anwendbaren Spannweiten, seitliche Abstützung, Größe des Durchhangs gilt das diesbezüglich früher Gesagte. Varianten dieser Anordnung wurden bei der New Haven-Bahn ausgeführt (Abb. 76). Auf den Masten ruht ein schweres Tragseil. Dieses ist geerdet und trägt in Entfernen von je etwa 30 m die Isolatoren; dieses Tragseil ist über Spannweiten von etwa 90 m mit großem Durchhang (1883 mm) verlegt. Das Tragseil zweiter Ordnung, welches nur über Spannweiten von 30 m zu tragen hat, ist mit 300 mm Durchhang gespannt und trägt mit lockeren Schlaufen den kupfernen Leitungsdräht, unterhalb welchem noch ein stählerner

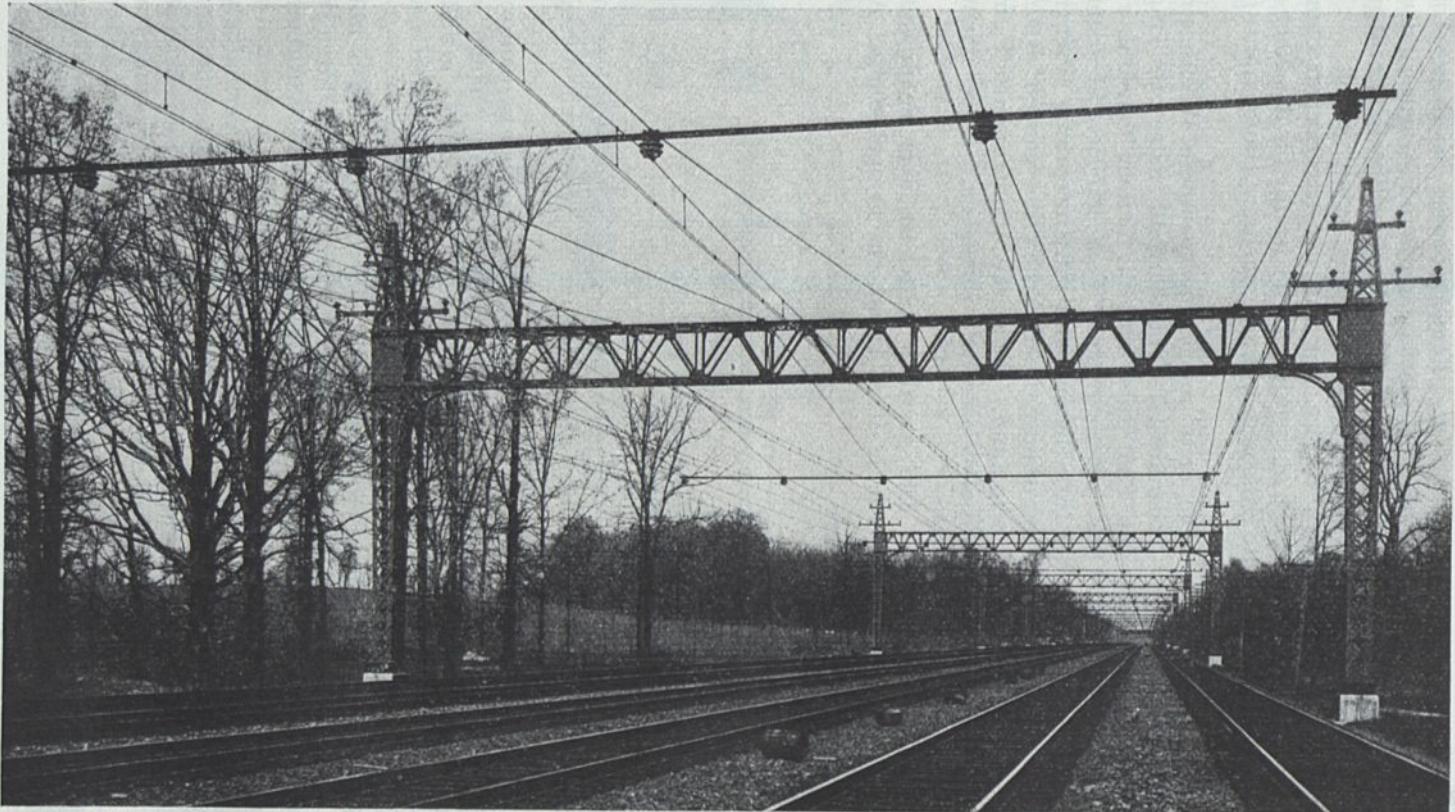


Abb. 76. Fahrleitung mit Verbundkettenwerk der New Haven-Bahn.

Fahrdräht von 100 qmm aufgehängt ist. In mehrgleisigen Strecken sind die Isolatoren gegeneinander mit Formeisenquerträgern abgestützt. Die gesamte Bauhöhe des Kettenwerkes erreicht hier 3,35 m. Bemerkenswert bei dieser Anlage ist noch die Tatsache, daß nur eine einfache Isolation angewandt wurde und daß das in der Nähe des Fahrdrähtes verlegte Erdseil einen guten Blitzschutz abgibt und den induktiven Widerstand der Leitung ganz wesentlich herabmindert.

Bei der Bauart der Bergmann-Werke, die auf der bayerischen Staatsbahnstrecke Scharnitz—Garmisch—Grießen ausgeführt wurde, ist die für das Nachspannen des Drahtes vorgesehene wagerechte Hilfsbahn in kurze, mehrere Hängedrähte fassende Stücke aufgelöst worden.

Das Doppelkettenwerk. Die erste mit hochgespanntem Wechselstrom betriebene Versuchsstrecke (Berlin—Johannisthal—Spindlersfeld) hatte zwei Tragdrähte. Ein senkrechter Schnitt durch den Fahrdräht und die beiden Tragdrähte bildete ein gleichschenkliges Dreieck. Das gleiche System kam auf den in erster Reihe elektrisch betriebenen Strecken der New Haven-Bahn zur Anwendung. Neben hohen Baukosten spricht gegen diese Anordnung die Starrheit des ganzen Systems, die ihrerseits wieder nicht vollkommen sein kann. Die starke Abnutzung des Fahrdrähtes zwang zur Anbringung eines Stahlseiles unterhalb desselben. Diese Bauart kann als überholt angesehen werden.

Kettenwerk System Paul. Die geerdete Kette ist über Spannweiten von 50 m gespannt. In Entfernungen von je 10 m hängt ein Doppelisolator (Abb. 77).

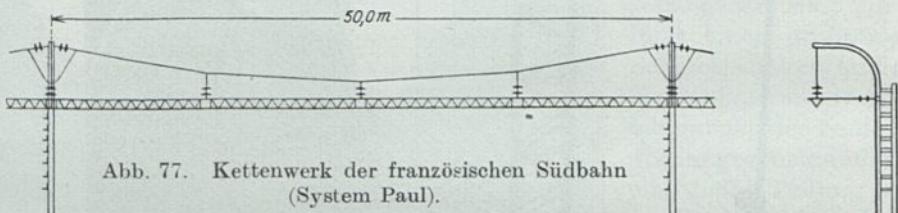


Abb. 77. Kettenwerk der französischen Südbahn
(System Paul).

Fahrdräht und zwei Hilfsrähte sind in einem dreieckigen Gitterwerk vereinigt und hängen am Tragseil. Es ist nicht einzusehen, welcher Vorteil durch diese äußerst schwerfällige Bauart erzielt werden soll.

Draht- und Seilverbinder. In der Leitungsanlage spielen gespannte Drähte und Seile eine große Rolle. Der Bestand der ganzen Leitung hängt von der Sicherheit einer Seilverbindung oder eines Drahtbundes ab. Es ist grundsätzlich anzustreben, die Zahl der Verbindungen soviel als möglich einzuschränken, andererseits für konstruktiv einwandfrei gebaute Verbindungen zu sorgen.

Bei den selbsttragenden Fahrleitungen wird man im allgemeinen mit Stahldrähten im Trag- und Spannwerk auskommen. Diese werden durch einfache Würgbunde an die Halter und Stützpunkte angeschlossen. Die Würgbunde sind mit geeigneten Dreheisen hergestellte einwandfreie Behelfe, wenn ein gutes, zähes und nicht sprödes Material zur Verfügung steht. Eine ganz geringfügige Verletzung an der Oberfläche genügt jedoch, um einen Bruch herbeizuführen. Für Drähte von 3 mm ist der Würgbund jedenfalls einwandfrei und betriebssicher; bei 5 und 6 mm Stahldrähten neigen die Bunde gerne zur Verrostung, weil bei den scharfen Biegungen die Verzinkung sich gerne loslässt.

Für größere Drahtdurchmesser empfiehlt es sich, den Draht mit einem Radius von nicht

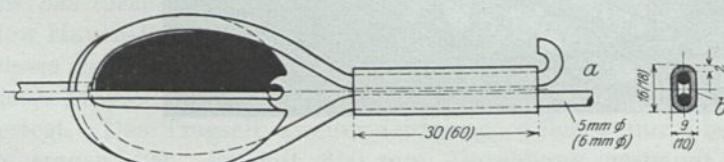


Abb. 78. Drahtbund für Spannkugelbefestigung mit nahtlosem Röhr.

unter 25 mm in eine Öse zu biegen und durch ein flach gebogenes, nahtloses Stahl- oder Bronzerohr zu ziehen, das freie Ende zurückzubiegen (Abb. 78).

Die Festigkeit dieser Drahtverbindung ist auch ohne Lötung ausgezeichnet, ihre Herstellung außerordentlich einfach und gefährdet niemals den Draht.

Die Gefahr der Beschädigung besteht bei den Seilverbindungen in noch höherem Maße; es ist daher beim Entwurf der Seilverbinde dieses Übelstand ein ganz besonderes Augenmerk zuzuwenden.

Für kleinere Kräfte sind Niet- und Klemmverbinder (Abb. 50) ausreichend, diese verlangen, daß das freie Seilende abgebunden und verlötet wird.

Für ganz große Kräfte sind konische Kuppelköpfe, wie sie für die Drahtseilbahnen gebräuchlich sind, geeignet (Abb. 79). Sie werden in der Weise hergestellt, daß die einzelnen Drahtenden zurückgebogen und der auf diese Weise etwa den doppelten Querschnitt aufweisende Seilkopf in der Büchse mit Metallkomposition vergossen wird.

Für mäßige Kräfte sind Preßklemmen, die für die Aufnahme der Seile geeignete halbrunde Hohlräume erhalten, verwendbar. Eine Seiklammer nach dem



Abb. 79. Seilschloß.

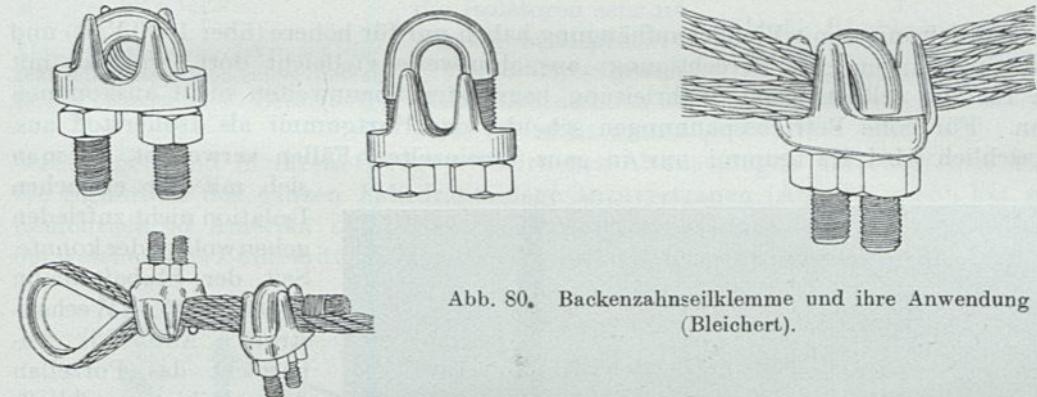


Abb. 80. Backenzahnseiklemme und ihre Anwendung (Bleichert).

System der Bleichertschen Backenzahnklemme stellt ebenfalls eine, das Seil nicht verletzende Verbindung dar (Abb. 80).

Die Hängedrähte der Kettenfahrleitung pflegt man mit Schrauben an das Tragseil anzuklemmen. Diesem Verfahren haftet der Übelstand an, daß die Pressung durch die Schraube nicht geregt werden kann; Verquetschungen des Tragseiles sind infolgedessen meist unvermeidlich. Klemmen, die den im Tragseil herrschenden Zug zur Befestigung benutzen, gestatten durch geeignete Führung des Seiles die erwünschte Kraft zur Festhaltung der Klemme zu erzeugen.

Bei der Klemme Abb. 81 wird das Tragseil in einem leichten Knick durchgeführt; der durch den Knick im Seil verursachte Richtungswechsel in der Seilführung erzeugt die gewünschte Sperrkraft.

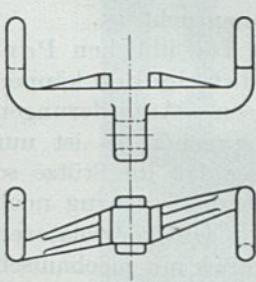


Abb. 81. Selbstspannende Seiklemme. (A.E.G.U.)

Seefehlner, Elektr. Zugförderung.

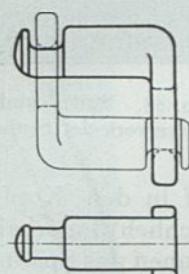


Abb. 82. Hakenschloß zur Verbindung von Bandschläufen. (A.E.G.U.)

Die Isolatoren.

Literatur:

- Altmann. Nouveaux isolateurs pour hautes tensions. L.E. 1910.
- Benischke. Versuche mit Hänge- und Stützisolatoren für sehr hohe Spannungen. E.T.Z. 1910. H. 45.
- Brecht. Die Entwicklung der Wirksamkeit der amerikanischen Hochspannungsisolatoren. E.u.M. 1913. H. 46.
- Buske. Tragketten aus Hängeisolatoren verschiedener Type. E.T.Z. 1921. H. 19.
- * * * Erfahrungen der italienischen Staatsbahnen mit Drehstromfahrleitungen. E.T.Z. 1918. H. 12.
- Gastelnuovo. Neuer Hochspannungs-Hängeisolator. E.W. 1921. Bd. 77. S. 498. — E.T.Z. 1921. H. 13.
- Gerstmeyer. Freileitungsisolatoren. E.K.B. 1909. H. 19.
- Kock. Hochspannungsisolatoren für Freileitungen. Verl. Hachmeister & Thal, Leipzig 1921.
- Petersen. Hochspannungstechnik. Verl. Enke, Stuttgart 1911.
- Porzellanfabrik Hermsdorf. S.A. Neuerungen an Hochspannungs-Freileitungsisolatoren. E.u.M. 1919. H. 33.
- Schendell. Isolatoren für Freileitungsnetze. Mitteil. Vereinig. Elektrizitätswerke. 1918. Nr. 22. Ref. E.u.M. 1919. H. 11.
- Schmidt-Grubers. Maste und Isolatoren bei modernen Hochspannungsleitungen. Ref. E.u.M. 1917. H. 41.
- Seefehlner. Die Hängeisolatoren und die Sicherheit von Hochspannungsleitungen. E.u.M. 1913. H. 8.
- Sothmann. Comparativ tests on high tension insulators. Proc. Dec. 1912. Ref. E.T.Z. 1913. H. 18.
- Weicker. Über Hänge- und Abspannisolatoren. E.T.Z. 1909. H. 26.
- Weicker. Betrachtungen über Hängeisolatoren. E.T.Z. 1911. H. 50.
- Weicker. Bedeutung und Bau von Hängeisolatoren. E.T.Z. 1911. H. 28.
- Weicker. Bedeutung und Bau von Hängeisolatoren. Helios. 1911.

Fahrleitungen mit Vielfachaufhängung haben nur für höhere (über 1000 Volt) und hohe Spannungen eine Berechtigung; ausnahmsweise vielleicht dort, wo man mit den für die selbsttragende Fahrleitung begrenzten Spannweiten nicht auskommen kann. Für hohe Betriebsspannungen scheidet das Hartgummi als Isolierstoff aus. Tatsächlich wird Hartgummi nur in ganz vereinzelten Fällen verwendet, wo man sich mit der einfachen Isolation nicht zufrieden geben wollte oder konnte.

Seit der Stubaitalbahn (1904. 2500 Volt Wechselstrom. Abb. 83) beherrscht das Porzellan dieses Gebiet ausschließlich. Voraussetzung hierfür ist eine Formgebung, bei der das Porzellan ausschließlich auf Druck und niemals auf Zug, Biegung, Scherung oder gar Torsion beansprucht ist.

Die üblichen Porzellanglocken können diesen Anforderungen entsprechen, es ist nur nötig, daß die Stütze so



Abb. 83. Stütz- und Abspannisolator der Fahrleitung mit Einfachkettenwerk der Stubaitalbahn. 2500 V. Betriebsspannung. (A.E.G.U.)

tief in den Kopf eingelassen wird, daß der am Bund angreifende Seitenzug noch reichlich innerhalb der eingesetzten Länge der Stütze angreift. Glockenisolatoren können bis Spannungen von etwa 15 bis 20000 Volt aus einem Stück mit mechanisch widerstandsfähigen und zuverlässigen Bauformen hergestellt werden. Der Glockenisolator ist daher zumindest als die eine Teilsolation bei vielen Anordnungen anzutreffen (Abb. 70) und je nachdem, ob eine Anordnung mit senkrechter oder wäge-

rechter Achse vorgesehen wird, mit entsprechend gestaltetem Schirm. Wichtig ist, daß die Isolatoren zweckentsprechend armiert werden, damit die vom Isolator aufzunehmende Kraft gleichmäßig verteilt wird. Zu diesem Zweck versieht man die Glocken mit aufgekitteten Kappen oder mit Schellen. Sofern der Isolator auf einem Armausleger stehend angeordnet wird, ist diese Anordnung bruchsicher; im Falle eines Isolatorenbruches kann das an der Kappe befestigte Tragseil nicht herabfallen.

Die Glockenisolatoren sind auch zu zweit in Reihe in das Tragseil oder in die Auszüge eingeschaltet verwendet worden. Diese Anordnung ist, wie ein Blick auf Abb. 74 lehrt, nicht bruchsicher und sind die Isolatoren sehr ungünstig beansprucht.

Trotzdem es grundsätzlich abzulehnen ist, einer oft nicht wetter-

Abb. 84. Abspansisolator mit eingekitteter Kappe und eingekittetem Bolzen (Bauart P. F. Hermsdorf).

beständigen und in ihrem Gefüge willkürlichen Abweichungen unterworfenen Masse die Sicherheit der ganzen Fahrdrahtanlage anzuvertrauen (Abb. 84 u. 85), hat man namentlich in Amerika das ganze Kettenwerk auf Glocken aufgehängt (Abb. 86) bei welchen das Bindemittel zwischen dem Isolator und den Armaturen auf Scherung

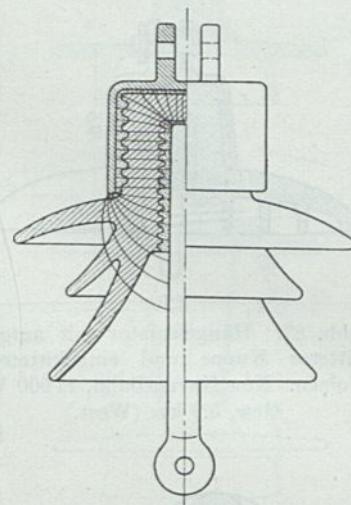
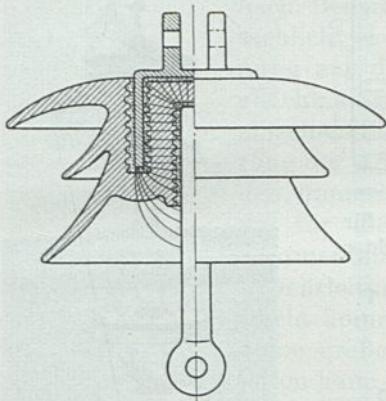


Abb. 85. Hängeisolator der Deltaform mit aufgekitteter Kappe und eingekittetem Bolzen (Bauart P. F. Hermsdorf).



Abb. 86. Kettenwerk einer Bahnhofsanlage mit Hängeisolatoren mit aufgekitteten Kappen.
11000 V. (West.)

und Zug beansprucht ist. Diese Glocken sind einerseits mit aufgekitteten Kappen versehen, andererseits erhalten sie einen eingekitteten Bolzen. Bemerkenswert ist, daß bei den Anlagen der New Haven-Bahn außerdem nur einfache Isolation vor-

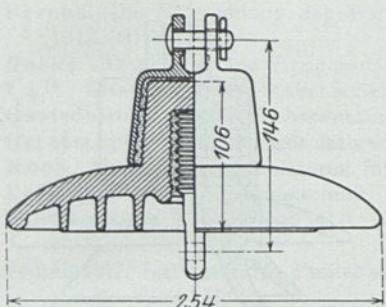


Abb. 87. Hängeisolator mit aufgekitteter Kuppe und eingekittetem Bolzen. New Haven-Bahn, 11000 V., Gew. 5.9 kg. (West.)

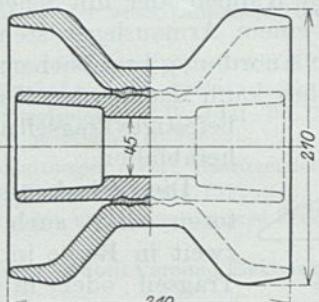


Abb. 88. Kelchisolator für Anordnung mit wagerechter Achse. Preuß. Staatsb., 15000 V.

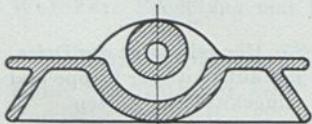


Abb. 89. Schnitt durch den Hewlett-Kettengliedhängespann-isolator.

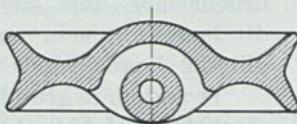


Abb. 90. Schnitt durch den Hewlett-Kettengliedabspann-isolator.



Abb. 91. Hewlett-Hängespann-isolatorkette.

gesehen ist. Die verwendeten Isolatoren haben beträchtliche Abmessungen und 5,9 kg Gewicht; sie werden mit 100 KV geprüft (Abb. 87).

Die Glockenform erscheint bei einer anderen Anordnung mit wagerechter Achse beibehalten. Zwei Glockenisolatoren mit breitem, zur Anbringung einer Schelle geeignetem Bund sitzen an den beiden Enden einer meist aus Gasrohr hergestellten Achse, die durch einen sog. Doppelkelchisolator, der in der Mitte der Achse sitzt, gezogen ist (Abb. 88). Der Kelch isolator entsteht aus der Glocke durch symmetrische Verdoppelung des Schirmes und Durchbohrung. Bei sorgfältiger Ausführung ist diese An-

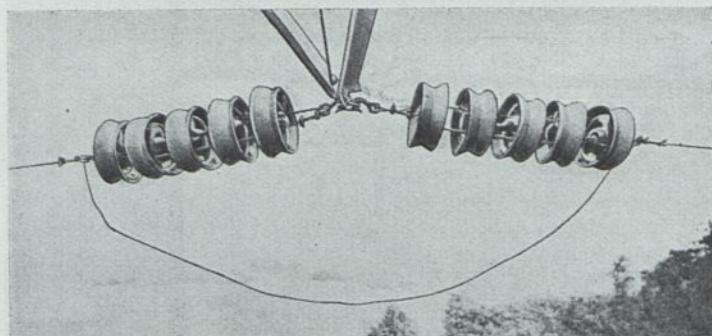


Abb. 92. Hewlett-Abspannisolatorkette.

ordnung einwandfrei und spricht für sie die billige Erzeugungsmöglichkeit der Isolatoren. Einen Nachteil dieser Anordnung bildet der Umstand, daß die räumliche Entfernung der unter Spannung stehenden Bestandteile nicht größer ist, als wenn nur eine einfache Isolation vorhanden wäre. Diese Anordnung ist, wenn man von der Möglichkeit absieht, daß sich eine Schelle samt Kopf von einem der äußeren Isolatoren loslässt, bruchsicher.

Vollständig bruchsichere Anordnungen lassen sich mit Kettenglied-Isolatoren herstellen. Diese entstehen aus den Spannkugeln durch isolierte Verkleidung der

gekreuzten Kanäle. Mechanisch beansprucht ist — und zwar ausschließlich auf Druck — bei dieser Bauart nur der von den gekreuzten Kanälen umschlossene Kern. Diese Type ist von den Amerikanern für Hochvoltleitungen entwickelt worden. Durch Hintereinander-

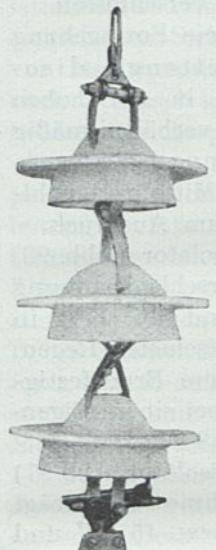


Abb. 93. Dreiteiliger Kettenglied-Hängeisolator für 50 bis 60 KV. (A.E.G.U.)

schaltung einer theoretisch unbegrenzten Isolatorzahl kann die Spannung nach Bedarf gesteigert werden. Tatsächlich ist die Aufteilung der Spannung auf die Einzelisolatoren keine gleichmäßige, die Wirksamkeit der einzelnen Stücke nimmt mit Vermehrung der Anzahl nennenswert ab. Bei den immerhin mäßigen Spannungen, die für die Fahrleitung und unter kontinentalen Verhältnissen für die Primärleitungen für Bahnen in Betracht kommen, spielt dieser Umstand keine große Rolle. Bei doppelter Isolation kann jedenfalls mit dem vollen Isolationswert einer Einheit gerechnet werden. In Amerika hat man sich nach den ersten Ausführungen wieder von dieser Type abgewendet und sieht Glocken mit aufgesetzten Kappen und eingekitteten Bolzen für Mehrfachisolatoren vor. Die Ergebnisse der ersten Ausführungen waren unbefriedigend.

Versagt hat aber nicht die Kettengliedanordnung, sondern die elektrisch ganz unzulängliche Formgebung (Abb. 89 bis 92) dieser „Hewlett“-Isolatoren. Diese hatten so gut wie gar keine vor Regen geschützte Fläche, die als eigentliche Oberflächenisolation zählt. Außerdem waren die mit rundem Querschnitt ausgeführten Kanäle offen und in diese Drahtseile eingezogen. Das in die Kanäle eindringende Regenwasser verursachte ein Durchrostnen der Hängeseile, wozu noch der Umstand beitrug, daß die Isolatoren um diese Seile als Achsen pendelten, die hierbei die Glasur abscheuern, somit auch den Isolator beschädigen.

Die vom Verfasser angegebenen Bauarten sind von diesen Mängeln frei. Sowohl die für gerade Strecken verwendeten Hängeglocken (Abb. 93, 94) als die Abspannisolatoren (Abb. 95, 96, 97) sind nach den für Standisolatoren bewährten Regeln

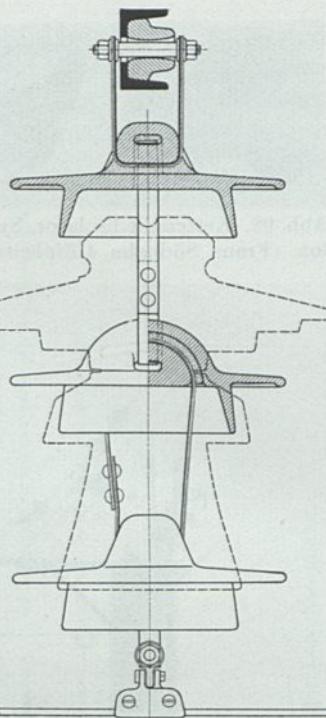


Abb. 94. Vergleichende Darstellung der senkrechten Baulänge einer Hängeisolation für 60 KV. gegenübergestellt einem Stützisolator für 50 KV. (A.E.G.U.)

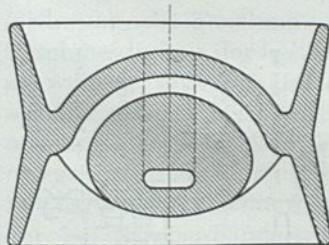


Abb. 95. Kettenglied-Abspannisolator für 8000 kg Bruchlast, 36 KV. Überschlagsspannung bei Regen. (A.E.G.U.-Rosenthal.)

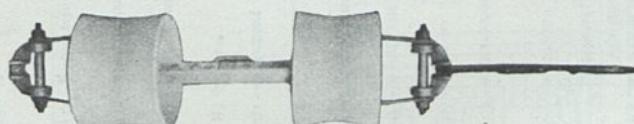


Abb. 96. Verankerungsisolation für eine 15 KV-Fahrleitung. (A.E.G.U.)

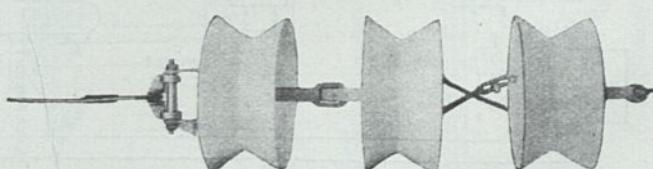


Abb. 97. Dreiteiliger Kettenglied-Abspannisolator für 50—60 KV.

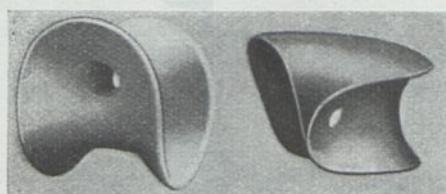


Abb. 98. Kettengliedisolator, System Mailon. (Franz. Südbahn, 4 Einheiten, 12 KV.)

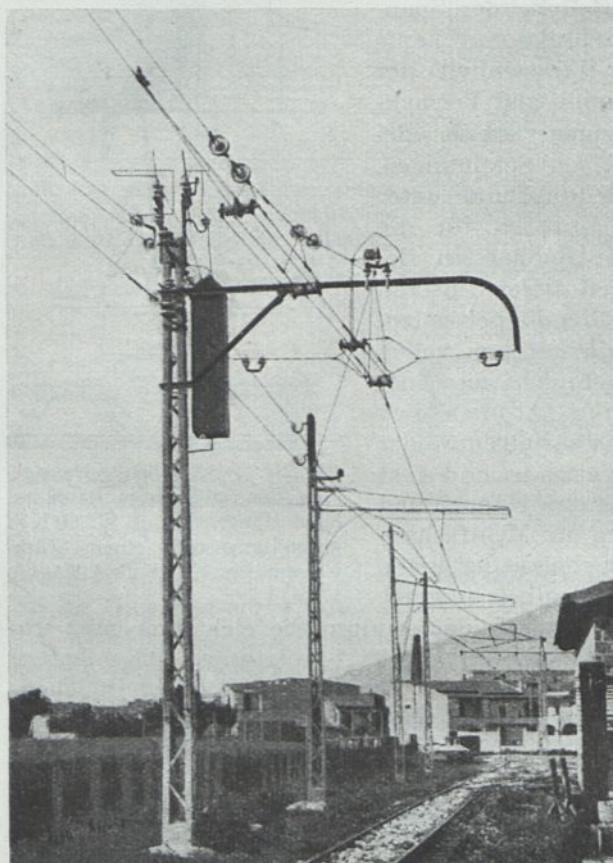


Abb. 99. Streckentrennung. 6000 V. Neapel-Piedimonte.

gebaut. Die Kanäle haben abgeflachte Querschnitte; statt Seilen werden in drehbaren Gelenken gefaßte Bänder aus verzinktem Stahl, Kupfer oder Bronze verwendet, die Kanäle schließlich mit irgendeiner gleichgültigen Masse gegen Eindringen von Wasser verschlossen.

Die konstruktiv einwandfreie Formgebung der in Abb. 95 dargestellten Kettengliedisolatoren kommt in der hohen Bruchlast und den verhältnismäßig geringen Abweichungen der Bruchfestigkeiten vom Mittelwert zahlreicher Proben zum Ausdruck.

Der Hängeisolator (Abb. 93) mit 85 KV Überschlagsspannung in trockenem und 46 KV in nassem Zustand (schiefer Regen) besitzt eine mittlere Bruchfestigkeit von 4257 kg bei einem Eigen Gewicht von nur 3,1 kg.

Der Abspannisolator (Abb. 97) mit 250 mm Durchmesser verträgt 4200 kg bei 81 bzw. 45 KV und hat 4,4 kg Gewicht.

Besonders bemerkenswert ist die Leistung des Abspannisolators (Abb. 95), der bei 65 bzw. 47 KV

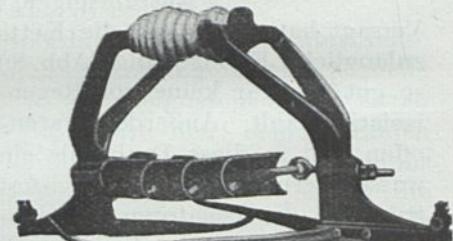


Abb. 100. Streckentrenner, 12 KV. Franz. Südbahn.

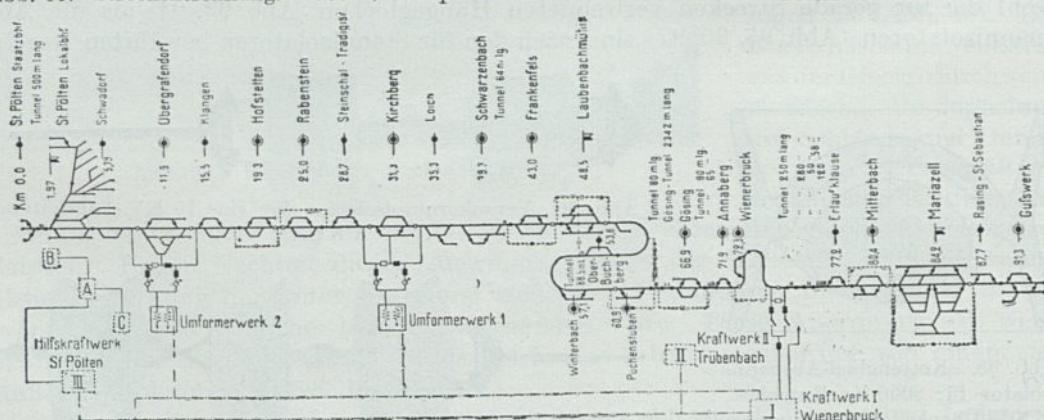


Abb. 101. Schaltplan der Fahrleitung der Mariazellerbahn, 6000 Volt. (Oe.S.S.W.)

Überschlagspannungen eine mittlere Bruchlast von 8040 kg und ein Eigengewicht von nur 3,1 kg aufweist. Dieser Isolator leistet diesbezüglich 3 bis 4 mal mehr als andere Bauarten. Für Verankerungen und Auszüge wird dieser Isolator vielfach verwendet.

Die erstmalig durch die Kettengliedisolatoren möglich gewordene systematische Unterteilung der Isolation hat es ermöglicht, den elektrischen Sicherheitsgrad von Hochspannungsanlagen nach technisch wissenschaftlichen Gesichtspunkten zu veranschlagen. In der doppelten Isolation der Fahrleitungen läßt sich dieser Grundsatz auch verwirklichen. Die geschilderten Einzelisolatoren halten die 2 bis 3fache Betriebsspannung aus, so daß man insgesamt über eine 4 bis 6fache Sicherheit verfügt. Der höhere Sicherheitsgrad der Isolatoren gegenüber den anderen Bestandteilen der Leitungsanlage ist durch die Art der Erzeugung und Beschaffenheit dieses zu inneren Spannungen neigenden Baustoffes begründet. (Abb. 98).

Die dargestellten Typen sind sämtlich für die Regelspannung von Vollbahnen von rund 15000 Volt bestimmt. Für niedrigere Spannungen kommen entsprechend kleiner bemessene Formen in Betracht.

Streckentrennung, Schaltung, Blitzschutz. Die an die Vielfachaufhängung zu stellende Hauptforderung, die gleichmäßige Geschmeidigkeit der Leitung zu wahren, läßt sich insbesondere schwer bei der Anordnung der Streckentrennungen erfüllen. Ursprünglich hat man in Nachahmung der bei Straßenbahnen üblichen Bauarten besondere Streckenisolatoren in die Leitung eingebaut. Diese Anordnungen befriedigen

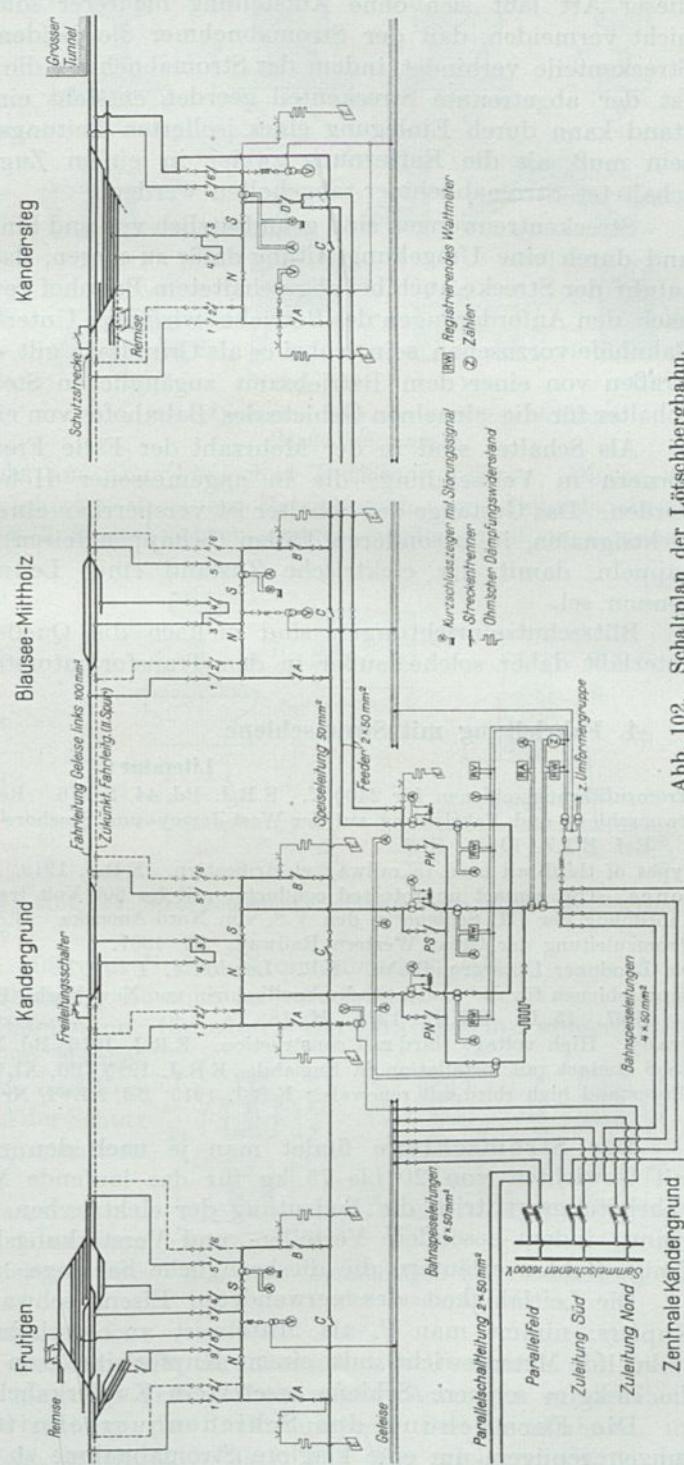


Abb. 102. Schaltplan der Lötschbergbahn.

ohne Ausnahme nicht, weil sie stets ein beträchtliches Gewicht aufweisen, daher zu Stößen in der Leitung Anlaß geben (Abb. 99 u. 100). Neuzeitliche Bauarten verzichten auf besondere Isolatoren und sehen eine isolierte Nebeneinanderführung der beiden zu trennenden Leitungen vor. Bei den Streckentrennungen dieser Art läßt sich ohne Aufstellung mehrerer sonst nicht nötiger Stützpunkte nicht vermeiden, daß der Stromabnehmer die beiden voneinander zu trennenden Streckenteile verbindet, indem der Stromabnehmer die Streckentrennung überbrückt. Ist der abgetrennte Streckenteil geerdet, entsteht ein Kurzschluß. Diesem Übelstand kann durch Einlegung eines isolierten Leitungsstückes, dessen Länge größer sein muß, als die Entfernung zweier in einem Zug vorkommender parallel geschalteter Stromabnehmer, abgeholfen werden.

Streckentrennungen sind grundsätzlich vor und hinter jedem Bahnhof vorzusehen und durch eine Umgehungsleitung dafür zu sorgen, daß die ununterbrochene Stromzufuhr der Strecke auch bei abgeschaltetem Bahnhof gewahrt sei (Abb. 101 u. 102). Je nach den Anforderungen des Betriebes wird eine Unterteilung der Leitungsanlage der Bahnhöfe vorzusehen sein, wobei es als Grundsatz gilt, daß ebenso wie die Weichenstraßen von einer dem Betriebsamt zugänglichen Stelle bedient werden, auch die Schalter für die einzelnen Gebiete des Bahnhofes von einer Stelle zu betätigen seien.

Als Schalter sind in der Mehrzahl der Fälle Freiluftschalter mit Funkenlöschhörnern in Verwendung, die in angemessener Höhe auf den Masten montiert werden. Das Gestänge der Schalter ist versperrbar einzurichten und mit geeigneten Lichtsignalen, in besonderen Fällen (Schuppengleisen) mit akustischen Signalen zu kuppeln, damit der elektrische Zustand einer Leitung am Signal sofort zu erkennen sei.

Blitzschutzeinrichtungen sind vielfach die Quelle von Überspannungen; man unterläßt daher solche, außer in den Transformatorstationen, vorzusehen.

4. Fahrleitung mit Stromschiene.

Literatur:

- Stromzuführungsschienen für 2400 V., E.R.J. Bd. 44, S. 376. Ref. E.T.Z. 1916. H. 31.
 Stromschiene und Fahrleitung auf der West-Jersey- und Seashore-Bahn. Proc. 1915, Bd. 34, S. 1237.
 Ref. E.T.Z. 1918. H. 1.
 Types of third-rail used in railway electrification. E.R.J. 1919. Bd. 53, Nr. 24.
 Jones. Top contact unprotected conductor rail for 600 Volt traction systems. Proc. 1915, Bd. 34.
 Anordnung der III. Schiene in den V.S. von Nord-Amerika. G.A. Nr. 726. S. 121.
 Stromzuleitung der Great Western Railway. El. 1907.
 Die Londoner Untergrundbahn. E.R. London 4. I. 1907.
 Stromschienen für die neuen Stadt-Schnellbahnen von New York. E.R.J. Bd. 48. S. 543. Ref. E.T.Z.
 1917. 15. II. E.K.B. 1915. H. 18.
 Tracy. High voltage third-rail construction. E.R.J. 1915, Bd. XLV. Nr. 10.
 Nood contact rail installation in England. E.R.J. 1915, Bd. XLVI, Nr. 4.
 Girder and high rhird-rail renewals. E.R.J. 1915, Bd. XLVI, Nr. 19.

Die Stromschiene findet man je nach den zu übertragenden Leistungen mit Gewichten von 20 bis 75 kg für das laufende Meter ausgeführt. Bei dieser Fahrleitungsart tritt die Bedeutung der elektrischen Leitfähigkeit in den Vordergrund, indem besondere Verteiler- und Verstärkungsleitungen überflüssig werden. Einige Zahlen erläutern die diesbezügliche Sachlage.

Die Leitfähigkeit des verwendeten Eisens schwankt zwischen $\frac{1}{6}$ bis $\frac{1}{10}$ des Kupfers; nimmt man $\frac{1}{8}$ als Mittelwert an, erscheint die leichteste Schiene mit 20 kg lfd. Metergewicht mit einem Kupferleiter von über 300 qmm gleichwertig; die 75 kg/m schwere Schiene ersetzt ein Kupferkabel von 1100 qmm Querschnitt.

Die Formgebung des Schienenquerschnittes muß mehrfachen Bedingungen genügen, um eine klaglose Stromabnahme zu sichern.

Die Querschnittsform muß tragfähig sein, damit die Zahl der Stützpunkte ohne Gefahr, daß die Schiene zwischen denselben durchsackt, möglichst verringert werden kann. Dieser Übelstand tritt erfahrungsgemäß bei leichten Profilen oft ein; es empfiehlt sich eher einen schweren Querschnitt mit einem in bezug auf die Leitfähigkeit minderwertigen Material zu nehmen, statt einer elektrisch hochwertigen, daher leichten Schiene.

Die vom Stromabnehmer bestrichene Fläche soll möglichst groß sein, um eine gute Berührung zu sichern.

Die Querschnittsform muß schließlich eine bequeme Befestigung und einfache Verlaschung ermöglichen.

Welche Bedeutung diesen Gesichtspunkten zukommt, geht aus amerikanischen Berichten hervor. Diesen ist zu entnehmen, daß die Stromschielen in einem Betrieb nach zwei Betriebsjahren, in einem anderen nach 6 bis 7 Betriebsjahren ersetzt werden mußten, wogegen in Betrieben mit zweckmäßigen Anordnungen die Stromschiene noch nach 12 Betriebsjahren keine nennenswerte Abnutzung aufwies.

Die Vielgestaltigkeit der gebräuchlichen Querschnittsformen ist den Abb. 103 und 104 zu entnehmen, in welchen die wichtigsten Typen dargestellt sind.

Die Schienen werden mit unterer (Abb. 109) und oberer Bestreichung (Abb. 104 bis 108) durch den Stromabnehmer gebaut; eine Ausführung mit seitlicher Bestreichung ist auch zu verzeichnen.

Ursprünglich waren alle Bahnen nur für obere Stromabnahme eingerichtet. Diese Anordnung leidet an dem Mangel, daß sie Störungen durch Schnee und Vereisung stark unterworfen ist und der Schutz gegen Berührung nur unvollkommen ausführbar ist.

Die untere Stromabnahme (Abb. 109) ist in beiden Hinsichten besser, verlangt aber kostspieliger eingerichtete Stützpunkte.

Immerhin bleibt bei beiden Anordnungen das lichte Maß von Unterkante der Stromschiene zur Oberkante der Fahrschiene so gering, 80 bis 160 mm, daß größere Schneefälle Störungen verursachen können. Diese geringe Höhe verlangt das Lichtraumprofil der Eisenbahnen, in welches die Stromschiene nicht hereinragen darf; aus dem gleichen Grund ist

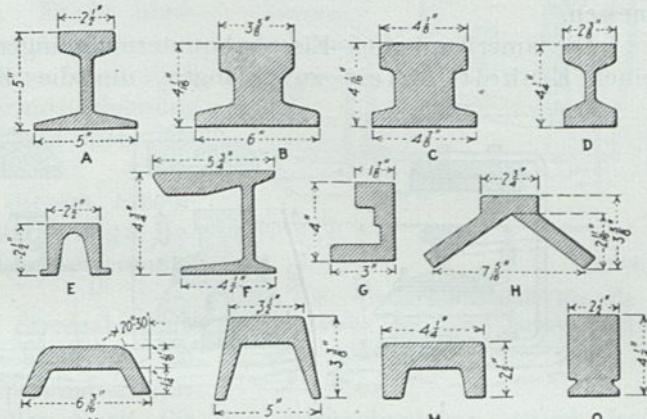


Abb. 103. Querschnittsformen von Stromschienen.
(Maße Zoll engl.)

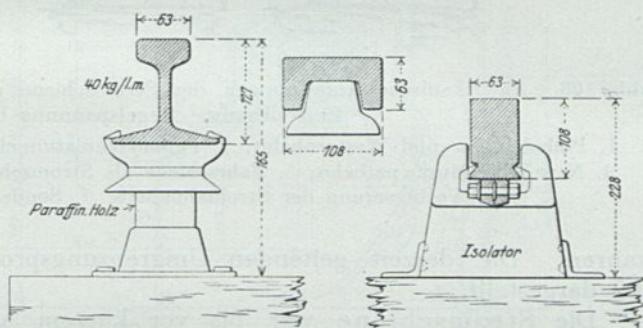


Abb. 104. Stromschienenanordnungen mit oberer Bestreichung.

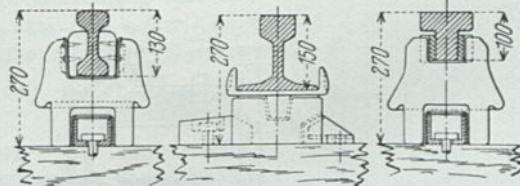


Abb. 105. Anordnungen der Stromschiene bei der Pariser Metro.

auch die Entfernung von der zunächst gelegenen Schiene (Innenkante) — die Spurweite — Einschränkungen unterworfen.

Diese Stromschiene — Spurweite — findet man mit 508 bis 762 mm bemessen.

Die amerikanischen Eisenbahnunternehmungen trachten in diesem Belange zu einer Einheitlichkeit zu gelangen, um die Freizügigkeit der Fahrzeuge zu

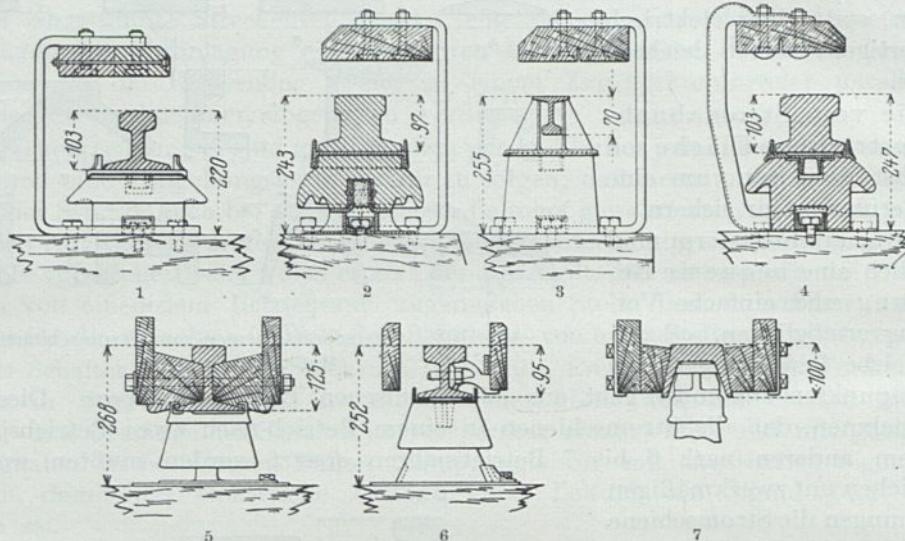


Abb. 106. Amerikanische Anordnungen der Stromschiene und des Schienenschutzes mit oberer Bestreichung. Regelspannung bis 650 V.

1. Philadelphia- und Westernbahn; 2. Pennsylvaniatunnel; 3. Pennsylvania offene Strecken;
 4. New York Municipalbahn; 5. Fahrschiene als Stromschiene; 6. Schiene mit breitem Kopf zur Verbesserung der Stromabnahme; 7. Sonderbauform geringer Höhe.

wahren. Die derzeit geltenden Umgrenzungsprofile sind in Abb. 107, 108 u. 109 dargestellt.

Die Stromschiene war bis vor kurzem ausschließlich für 650 Volt Betriebsspannung eingerichtet. Die Anforderungen an die Isolatoren waren daher mäßige, wogegen die Anforderungen an deren mechanische Festigkeit in den Vordergrund treten. Die Isolatoren werden in Entfernungen von 3 bis 6 m angeordnet, sie haben daher nicht unbeträchtliche Gewichte zu tragen. Man verwendet

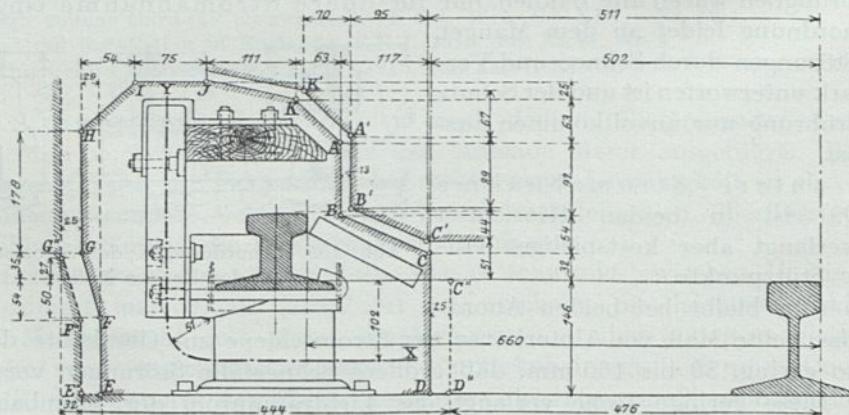


Abb. 107. Umgrenzungslinie für die Stromschiene der Long-Islandbahn.

zu diesem Zweck glockenförmige Körper oder entsprechend mit Fuß und Kappe armierte Blöcke aus geschmolzenem Granit (Steingut), Porzellan und imprägniertem Holz. Es ist überwiegend nur einfache Isolation vorhanden.

Die Kappe, welche die Schiene trägt, muß so eingerichtet sein, daß die Wärmeausdehnung oder Zusammenziehung der Schiene nicht behindert wird.

Eine wichtige Frage bei diesem Stromsystem bildet der Schutz gegen zufällige Berührung durch die den Bahnkörper betretenden Personen.

Die Schiene mit oberer Stromabnahme kann mit drei Holzbohlen geschützt werden, die die Schiene von drei Seiten prismatisch umschließen und nur einen schmalen Spalt für den Stromabnehmer seitlich freilassen.

Der obere Schutz muß entfallen, wenn der Stromabnehmer senkrecht oberhalb

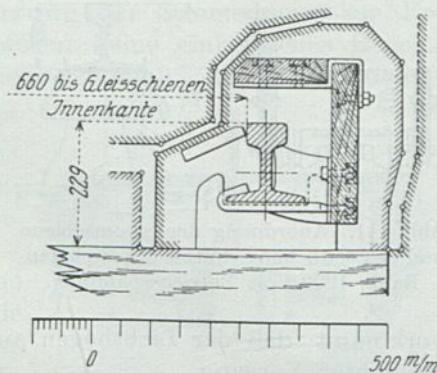


Abb. 108. Umgrenzungslinie für die Stromschiene der West Jersey- und Seashorebahn.

den Stromabnehmern seitlich freilassen.

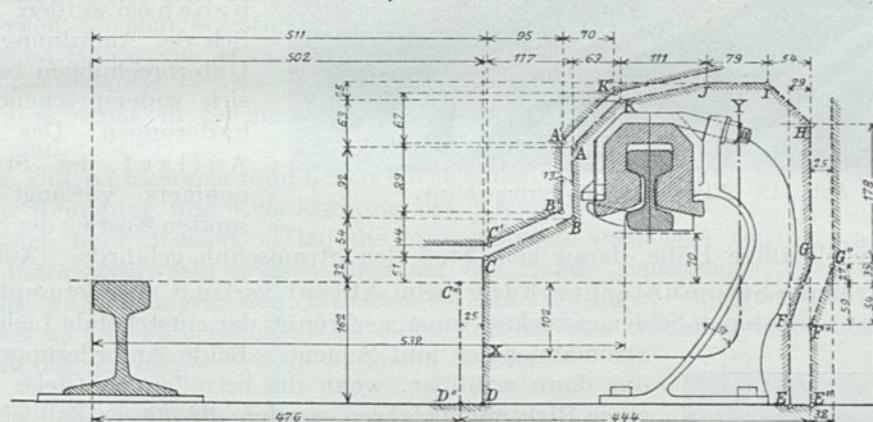


Abb. 109. Umgrenzungslinie für die Stromschiene mit unterer Bestreichung, New York-Zentralbahn.

der Schiene läuft, was meistens bei Gewichtstromabnehmern zutrifft. (Berlin-Großlichterfelde.)

Die von der New York-Zentralbahn erstmalig eingeführte Schiene mit unterer Stromabnahme wird in ihrer ganzen Länge dreiseitig mit hölzernen Formstücken verschalt. Abgesehen von der schwierigen Instandhaltung dieses Schutzes besteht der Mangel, daß die Verschalung in ihrer ganzen Länge mit der unter Spannung stehenden Schiene in Berührung steht.

Im Wettstreit der Leistungssteigerung der elektrischen Bahnsysteme hat man die Betriebsspannung der Stromschiene zunächst auf 1200 Volt und dann auf 2400 Volt gesteigert und hierfür die letztbeschriebene Anordnung der N.Y.-Zentralbahn mit unterer Stromabnahme gewählt, wobei allerdings eine hochwertigere Isolation Anwendung gefunden hat, und die Schutzumhüllungen isoliert von der Stromschiene angeordnet sind (Abb. 110).

Ganz unzureichend ist der nur seitlich angebrachte Schutz



Abb. 110. Anordnung der Stromschiene für 1200 Volt Betriebsspannung.

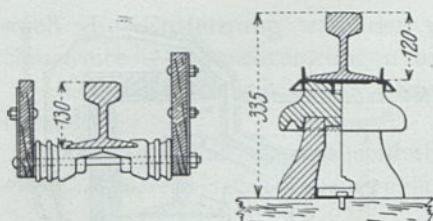


Abb. 111. Anordnung der Stromschiene und des seitlichen Schutzes der Michigan-Bahn, 1200 Volt Betriebsspannung.

vorkommt, daß der Lichtbogen auf das Fahrzeug überschlägt; ein gewiß nicht erwünschter Vorgang.

Die Betriebssicherheit kann im Winter unter klimatisch ungünstigen Verhältnissen nicht befriedigen.

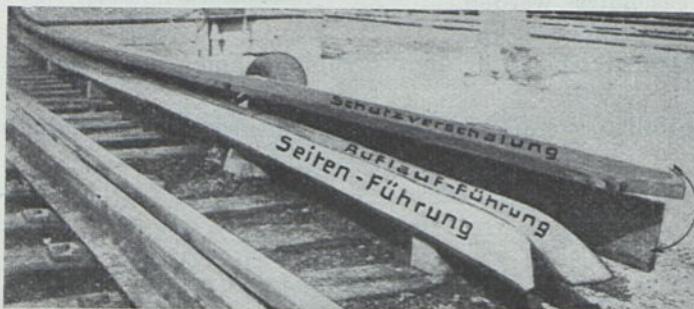


Abb. 112. Einfahrt in die Stromschiene.

auf die regelmäßige Höhe, damit kein Stoß den Stromschuh gefährde. (Abb. 112.)

Die rasche Stromunterbrechung beim Ablaufen verlangt einen stumpfen Abschluß des verlassenen Schienenstückes, sonst verbrennt der entstehende Lichtbogen

Stromabnehmer und Schiene. Beide Anforderungen sind nur dann erfüllbar, wenn die betreffenden Gleise nur in einer Richtung befahren werden; da dieser Fall oft nicht zutrifft, muß man für guten Auflauf und durch Belehrung der Fahrer dafür sorgen, daß die Unterbrechungsstellen mit Schwung stromlos befahren werden.

Besondere Rücksicht erfordern diejenigen Unterbrechungsstellen, die in der Regel mit voller Geschwindigkeit befahren werden. Ist der hierzu erforderliche Zeitraum so kurz, daß die Schaltmagnete die Steuerung nicht betätigen können, bleiben die Fahrzeugmotoren angeschaltet und es entsteht bei Wiederberührungen ein heftiger Stoß.

Die Stromschiene werden zur Sicherung der guten Leitfähigkeit in den möglichst größten Walzängen erzeugt und an den Stößen für gut leitende Verbindung gesorgt. Die älteren Ausführungen waren zu diesem Zweck mit kupfernen Seilen ausgerüstet. In neuzeitlichen Anlagen werden die Stöße mit angeschweißten Kupferbändern oder Weicheisenstücken verbunden; es kommen dann nur an den Ausdehnungsstößen, die in angemessenen Abständen vorzusehen sind, in Schlaufen gebogene Kupferkabel zur Anwendung.

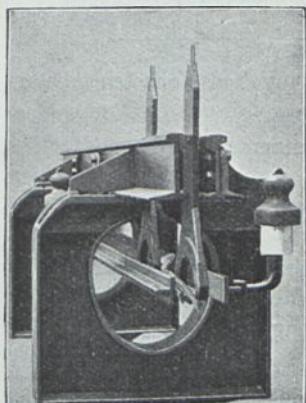


Abb. 113. Anordnung der unterirdischen Stromzuführung. (S.u.H.)

der mit 2400 Volt betriebenen Stromschiene der Michiganbahn (Abb. 111).

Die Anwendung höherer Spannungen in der dritten Schiene ist vom Standpunkt der öffentlichen Sicherheit nicht einwandfrei, und zwar um so weniger, als der Holzschutz wegen der teuren Instandhaltung auf den offenen Strecken meist fortgelassen wird.

Einem amerikanischen Bericht ist zu entnehmen, daß es bei Unterbrechungen der Schiene

vorkommt, daß der Lichtbogen auf das Fahrzeug überschlägt; ein gewiß nicht erwünschter Vorgang.

Die Stromschiene muß bei den Weichen und Kreuzungen unterbrochen werden. Bezüglich der Anordnung dieser Unterbrechungen bestehen sich widersprechende Anforderungen. Der sichere Auflauf des Stromabnehmers verlangt einen sanften Anstieg der Schiene

auf die regelmäßige Höhe, damit kein Stoß den Stromschuh gefährde. (Abb. 112.)

Die rasche Stromunterbrechung beim Ablaufen verlangt einen stumpfen Abschluß des verlassenen Schienenstückes, sonst verbrennt der entstehende Lichtbogen Stromabnehmer und Schiene. Beide Anforderungen sind nur dann erfüllbar, wenn die betreffenden Gleise nur in einer Richtung befahren werden; da dieser Fall oft nicht zutrifft, muß man für guten Auflauf und durch Belehrung der Fahrer dafür sorgen, daß die Unterbrechungsstellen mit Schwung stromlos befahren werden.

Besondere Rücksicht erfordern diejenigen Unterbrechungsstellen, die in der Regel mit voller Geschwindigkeit befahren werden. Ist der hierzu erforderliche Zeitraum so kurz, daß die Schaltmagnete die Steuerung nicht betätigen können, bleiben die Fahrzeugmotoren angeschaltet und es entsteht bei Wiederberührungen ein heftiger Stoß.

Die Stromschiene werden zur Sicherung der guten Leitfähigkeit in den möglichst größten Walzängen erzeugt und an den Stößen für gut leitende Verbindung gesorgt. Die älteren Ausführungen waren zu diesem Zweck mit kupfernen Seilen ausgerüstet. In neuzeitlichen Anlagen werden die Stöße mit angeschweißten Kupferbändern oder Weicheisenstücken verbunden; es kommen dann nur an den Ausdehnungsstößen, die in angemessenen Abständen vorzusehen sind, in Schlaufen gebogene Kupferkabel zur Anwendung.

Bezüglich der chemischen Zusammensetzung der Stromschiene zur Erzielung einer möglichst hohen Leitfähigkeit bestehen keine einheitlichen Regeln. Es finden sich Angaben, wonach gewöhnliche Stahlschienen mit 0,75 bis 0,45% Kohlenstoffgehalt eine Leitfähigkeit von $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{7,85}$ des Kupfers aufweisen und bei besonders für diesen Zweck erzeugten Stromschienen mit 0,14% Kohlenstoffgehalt auch nur eine Leitfähigkeit von $\frac{1}{8}$ erreicht wird.

Die höchste Leitfähigkeit von $\frac{1}{6}$ des Kupfers wird für eine Weicheisenschiene nachgewiesen, die nur 0,028% Kohlenstoff, Spuren von Mangan, 0,004% Phosphor, 0,005% Schwefel, 0,07% Silizium enthält.

5. Die Unterleitung. Die älteste technisch einwandfrei ausgeführte Unterleitungsanordnung für Straßenbahnen (Abb. 113) stammt von Siemens & Halske und wurde erstmalig in Budapest und dann auch in großem Umfang in Wien ausgeführt. Die eine Fahrschiene ist zweiteilig, die beiden auf gußeisernen Blöcken befestigten Schienen lassen einen Spalt in der Breite der gewöhnlichen Rillen von etwa 28 bis 30 mm frei, durch welchen der Stromabnehmer — das zusammenklappbare Schiffchen, in den Kanal reicht, in welchen die beiden Stromschienen angeordnet sind.

Die äußerst knappen räumlichen Verhältnisse, die Schwierigkeit der Reinigung und Entwässerung des Kanals verursachen im Betrieb hohe Kosten. Daß die Anlagekosten verhältnismäßig beträchtlich sein müssen, liegt auf der Hand. Seitdem man die Fahrleitungen den ästhetischen Anforderungen entsprechend baut und man sich an die Fahrleitungen als einen Zubehör des verkehrsreichen Städtebildes gewöhnt hat, ist dieses System verlassen worden.

6. Die Rückleitung.

Literatur:

- Alvensleben. Einfluß der Streuströme elektrischer Grubenbahnen auf die Sicherheit des Grubenbetriebes. E.u.M. 1917. H. 9.
 Böhm-Raffay. Zurück durch die Erde. E.Neuigk.A. 1904. S. 21.
 Hering. Die Messung der vagabundierenden Ströme in Rohrleitungen. Proc. Juni 1912. Ref.E.u.M. 1912. H. 33.
 Hermann. Einwirkung elektrischer Ströme auf Gas- und Wasserleitungsrohre in Gablonz. Journ.f. Gasbeleuchtung. Bd. 57, S. 88. Ref.E.T.Z. 1917. H. 1.
 Rosa-Collum. Verminderung der Streustromschäden. — Technologic papers of the bureau of standards. Nr. 52. Ref.E.T.Z. 1918. H. 41 u. H. 25. E.u.M. 1916. H. 38 u. 40.
 * * * Die elektrischen Schienennstoßverbindungen. E.T.Z. 1918. H. 23.
 * * * Schutz gegen Zerstörungen durch elektrische Streuströme. E.N. Bd. 72, S. 1012. E.T.Z. 1917. H. 1. Sur les perthes de courant, qui se produisent le long des voies de tramways. R.G.E. 1920. Nr. 6. S. 837.

Die aus mechanischen Gründen notwendige Bemessung der Fahrschienen führt zu Querschnitten, die trotz geringer Leitfähigkeit des Eisens verhältnismäßig großen Kupferquerschnitten gleichwertig sind. Es wäre unwirtschaftlich, auf diesen Vorteil zu verzichten, insbesondere, wenn man sich die Umständlichkeit einer zweipoligen oberirdischen Fahrleitung vor Augen hält. Mit dem vollen Wert der Leitfähigkeit der Fahrschienen kann allerdings nicht gerechnet werden, weil der Widerstand der Schienenstöße, insbesondere zufolge der großen Anzahl der in Reihe geschalteten Verbinder, den gesamten Widerstand beträchtlich vermehrt.

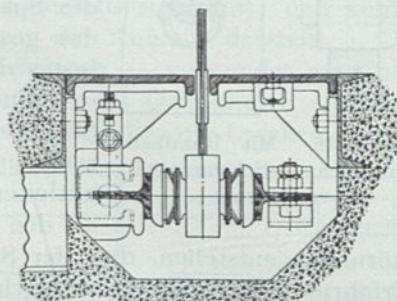


Abb. 114. Anordnung der unterirdischen Stromschiene für die Treidel-lokomotiven am Panamakanal.

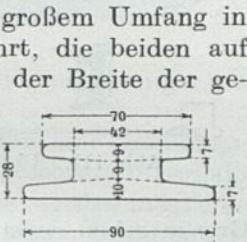


Abb. 115. Stromschiene für Unterleitung(Wien).

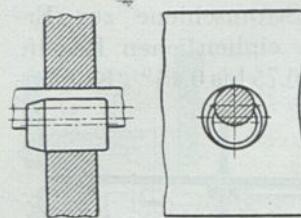


Abb. 116. Mit Rundkeil eingeklemmte Schienenstoßverbindung.

Nichtsdestoweniger wird der Widerstand der Rückleitung stets nur einen Bruchteil desjenigen einer Oberleitung erreichen. Es wird der auf die Rückleitung entfallende Anteil des Spannungsabfalles auch nur einen geringen Bruchteil des gesamten in der Leitung zugelassenen Spannungsverlustes darstellen.

Im Hinblick auf den Umstand, daß ein Teil des Stromes nicht durch die Schienen, sondern durch das Erdreich und durch die in dieses eingebetteten, gegebenenfalls gutleitenden Rohre, Kabel usw. seinen Rückgang findet und an den Austrittsstellen in das Erdreich elektrolytische Zerstörungen entstehen, darf der Spannungsabfall in den Schienen gewisse, durch die Erfahrung ermittelte Werte nicht übersteigen. Dies gilt in erster Linie für Bahnen, die sich in verbautem Stadtgebiet befinden, für welche die Erdstromvorschriften

einen Spannungsabfall von nicht mehr als 1 Volt pro km und insgesamt nicht mehr als 2 bis 4 Volt verlangen.

Für Bahnen in offenem Gelände bestehen derartige Vorschriften nicht, doch darf man auch bei diesen nicht über eine gewisse

Grenze gehen, sonst gefährdet man die Benützbarkeit der in der Nähe befindlichen Schwachstromeinrichtungen.

Die Stoßverbinder müssen, um ihren Zweck zu erfüllen, über die Schienenstöße eine gutleitende dauerhafte Verbindung zu bilden und verschiedenen sich zum Teil widersprechenden Bedingungen entsprechen.

Die Berührung zwischen Schiene und Verbinder muß dauernd vorhanden sein und insbesondere sich unter

den vielartigen mechanischen Beanspruchungen und Erschütterungen beim Befahren durch die Züge und bei der Instandhaltung des Oberbaues nicht verändern.

Chemische, mechanische und elektrische Einflüsse dürfen die Innigkeit der Berührung nicht stören oder zerstören.

Die Anbringung muß bequem ausführbar sein und vor allem die Instandhaltungsarbeiten des Gleises nicht erschweren.

Von einer guten Stoßverbindung wird verlangt, daß sie den Ohmschen Widerstand der Rückleitung möglichst wenig vermehrt. Die von den Verbandsvorschriften für geschlossene Stadtgebiete zugestandene Vermehrung um nur 20 v. H. ist nur bei guter Instandhaltung zu erreichen. Eine 10 prozentige Vermehrung kann schon als sehr gutes Ergebnis angesehen werden.

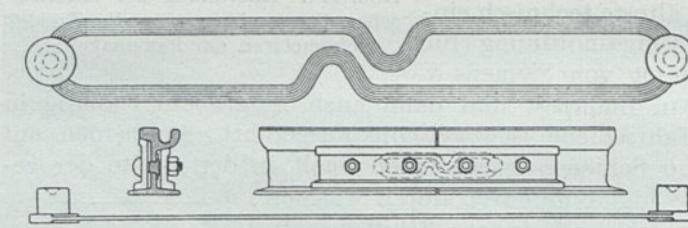


Abb. 117. Unterlaschenverbinder mit Preßköpfen.

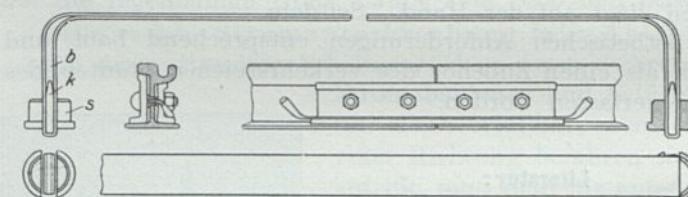


Abb. 118. Schienenstoßverbinder mit Keilbefestigung.

den vielartigen mechanischen Beanspruchungen und Erschütterungen beim Befahren durch die Züge und bei der Instandhaltung des Oberbaues nicht verändern.

Chemische, mechanische und elektrische Einflüsse dürfen die Innigkeit der Berührung nicht stören oder zerstören.

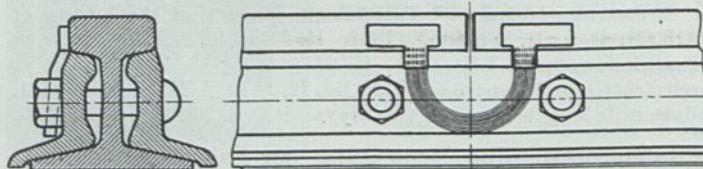


Abb. 119. An den Schienenkopf angelötete Stoßverbindung.

Sofern kupferne Verbinder verwendet werden, sollen diese gegen äußere Beschädigungen und Entwendung geschützt angeordnet sein.

Diesen vielartigen Anforderungen trachten eine große Zahl Konstruktionen mit mehr oder weniger Erfolg nahezukommen. Jedenfalls steht fest, daß keine der gebräuchlichen Typen eine restlose ideale Lösung der Aufgabe darstellt.

Für leichte Schienen — Gruben- und Industriebahnen — verwendet man als Stoßverbinder Weichkupferdrähte von nicht unter 50 qmm Querschnitt, die der Schienendehnung entsprechend S- oder Ω -förmig gebogen neben die Laschen gelegt und mit ihren Enden mit gebohrten Rundkeilen — Channel pins — in die blankgescheuerten Steglöcher eingetrieben werden (Abb. 116).

Der frei liegende Verbinder ist Verletzungen ausgesetzt und kann auch leicht entwendet werden.

Für Straßenbahnen ist es die Regel, Schienenverbinder mit nicht weniger als 100 qmm Querschnitt zu verwenden.

Eigens für elektrischen Betrieb hergestellte Laschen erhalten eine geräumige Laschenkammer, so daß der Verbinder gegen äußere Einflüsse geschützt unterhalb der Laschen angebracht werden kann. Die Verbinder dieser Type werden möglichst flach gebaut und zu diesem Zweck aus flachen Bändern oder einzelnen Drähten von 3 bis 5 mm Durchmesser hergestellt (Abb. 117 u. 118). Die Drahtenden werden in den Kopf eingepreßt und dieser in der Schiene vernietet bzw. eingepreßt. Verbinder dieser Konstruktion können mit einer Länge von 250 bis 300 mm hergestellt werden, wogegen Außenlaschenverbinder bis zu 800 bis 900 m lang sein müssen. Wo wegen der Laschen diese Anordnung nicht ausführbar ist, preßt man die Kontaktköpfe in konisch ausgebohrte Löcher in den Schienenfuß.

Vielfach lötet man kurze Kupferbänder seitlich an den Schienenkopf (Abb. 119).

Verschweißte (Abb. 120 u. 121) oder umgossene Schienenstöße bilden an sich gut leitende Stoßverbinder, man verwendet sie nicht allgemein, weil eine nicht lösbare Verlaschung in der Instandhaltung schwierig zu behandeln ist. Größere Ausbreitung hat die Herstellung von angeschweißten Stößen nach dem Goldschmithschen aluminothermischen Verfahren gewonnen, bei welchem verhältnismäßig kleine Querschnitte verschweißt werden, die sich leicht entfernen lassen.

Der Scheinigsche Schienenschuh (Abb. 122) mit eingesetzten Zinkblechbeilagen bildet eine gute Stoßverbindung und macht Kupferverbinder entbehrliech.

Aussichtsreich und den eisenbahntechnischen Bedingungen entsprechen Schienenstöße, die nach dem Schoop-schen Metallspritzverfahren hergestellt sind. Bei

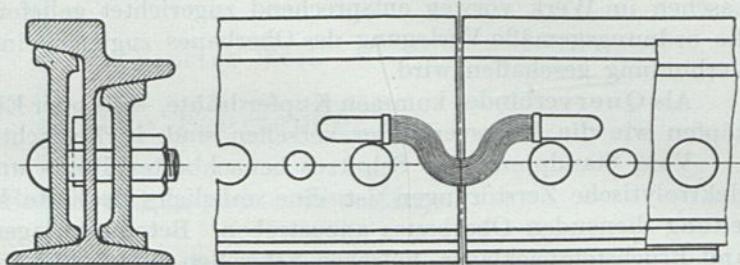


Abb. 120. Angelöteter Unterlaschenverbinder.

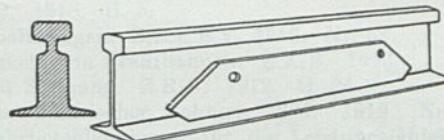


Abb. 121. Im Lichtbogen geschweißte Stoßverbindung.

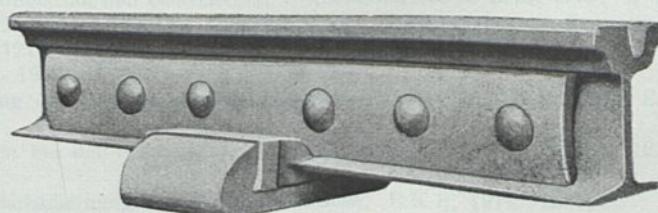


Abb. 122. Scheinigscher Schienenschuh.

diesem Verfahren werden die von den gewöhnlichen Laschen berührten Flächen am Schienenkopf und -fuß zunächst blank gescheuert und dann mit einer nicht rostenden Metallschicht — Zink, Kupfer, Aluminium — bedeckt. Das Gleiche geschieht mit der Lasche, die, in der üblichen Weise eingesetzt, eine gut leitende Verbindung herstellt. Das Verfahren ist in größerem Maßstab noch nicht eingeführt und wird bei der erwiesenen Tatsache der Vorzüglichkeit der metallischen Überzüge sich gewiß einbürgern, wenn sich die Kosten als annehmbar erweisen.

Bei größerer Ausdehnung des elektrischen Betriebes könnten Schienen und Laschen im Werk vorweg entsprechend zugerichtet geliefert werden, so daß durch die ordnungsgemäße Verlegung des Oberbaues zugleich eine gut leitende elektrische Verbindung geschaffen wird.

Als Querverbindner kommen Kupferdrähte, -seile oder Eisenseile, die mit Kontaktköpfen wie die Längsverbindner versehen sind, in Betracht.

Vom Standpunkt des Schutzes benachbarter Rohr- und Kabelleitungen gegen elektrolytische Zerstörungen ist eine möglichst isolierte Verlegung des als Rückleitung dienenden Oberbaues anzustreben. Betonunterlagen, gut entwässerte Sand- und Bruchsteinpacklager, hölzerne Schwelten u. dgl. dienen diesem Zweck.

Für Fernbahnen mit Wechselstrombetrieb hat sich zum Schutz gegen Störungen der benachbarten Schwachstromleitungen das gegenteilige Verfahren gut bewährt. Auf den Mastspitzen wird eine aus möglichst gut leitendem Material hergestellte „Erdleitung“ unisoliert bzw. gut leitend mit dem Mastkörper verbunden, verlegt, jeder Mast mit den Schienen verbunden und diese in angemessenen Entfernungen etwa 2 bis 5 km im Grundwasser gut geerdet.

Durch dieses Verfahren wird das Schienenpotential möglichst herabgesetzt und die Störungsquellen aus dieser Ursache beseitigt.

Vierter Teil.

Die Fahrzeuge.

Bewegungsgesetze der Züge.

I. Die Bahnwiderstände.

Literatur:

- Adler. Die Entwicklung der Kugellager und ihre Verwendung bei Straßenbahnwagen. E. u. M. 1917. H. 43.
- Adler. Wirtschaftliches Fahren elektrischer Bahnen. V.T. 1920. Ref. E.T.Z. 1920. H. 48.
- Baum. Schiene und Radreifen. G.A. 1916. Nr. 938.
- Bethge. Die kürzeste Zugfolge für städtische Schnellbahnen unter besonderer Berücksichtigung der Zuglänge. E.K.B. 1913. H. 11.
- Bethge. Feldschwächung der Motoren bei Gleichstrombahnen. E.K.B. 1918. H. 9.
- Bethge. Der Zeitrückhalt bei städtischen Schnell- und Straßenbahnen, seine Bedeutung für den Betrieb, sowie für den Stromverbrauch usw. E.K.B. 1918. H. 5.
- Boedecker. Der Bogenwiderstand steifachsiger Eisenbahnwagen. Z.B.E.B.V. 1916. Nr. 52.
- Brugsch und Bürke. Die Grenzen der Leistungsfähigkeit von Stadtbahnen. E.K.B. 1913.
- Buchwald. Beziehungen zwischen Bahnkrümmung und Steigung. E.K.B. 1912. H. 24.
- Broussoux und Demany. Entwurf von Fahrplänen elektrischer Bahnen. T.M. 1919. Nr. 7.
- Christiansen. Die theoretische Bedeutung der Anfahrbeschleunigung für die Leistungsfähigkeit der Stadtschnellbahnen. G.A. 1919. Nr. 1 bis 12.
- Ewing. Initial resistance to car motion. E.R.J. Nov. 1916.
- Glinski. Der Bewegungswiderstand der Eisenbahnfahrzeuge. G.A. 1918. Nr. 989.
- Hausmann. Über Radlaufächen bei Straßenbahnen. Selbstverlag Gablonz a. d. N. 1914.
- Hausmann. Beitrag zur Frage der Beziehungen zwischen Fahrzeug und Gleis bei Straßenbahnen. Selbstverlag Gablonz a. d. N. 1913.
- Heberling. Wälzläger und ihre Verwendung im Eisenbahnbetrieb. Fördertechn. u. Frachtverkehr. 1921. H. 5.
- Hochenegg. Graphische Ermittelung des Verhältnisses des Wagengewichtes zum Treibgewicht. E.K.B. 1909. H. 28.
- Hort. Die zweckmäßigste Bezugsvariable bei der Geschwindigkeitsregistrierung im Eisenbahnbetrieb. V.T. 1921. H. 1.
- Hruschka. Grundlagen der Zugförderung beim elektrischen Betriebe der k. k. öst. Staatsbahnen. E.K.B. 1910. H. 25.
- Hruschka. Allgemeines und umkehrbares bildliches Staffelverfahren zur wechselseitigen Ermittlung sämtlicher Zugförderungsgrößen im Bahnbetrieb. E.K.B. 1910. H. 2.
- Hruschka. Bahntechnische Forderungen an den elektrischen Vollbahnbetrieb. E. u. M. 1908. H. 23.
- Jahn. Die Beziehungen zwischen Rad und Schiene hinsichtlich des Kräftespiels und Bewegungsverhältnisse. Z.V.D.J. 2818. S. 121.
- Jahn. Rad und Schiene. Z.V.D.J. 1918.
- Kadrnozka. Graphische Darstellung der Bewegungsgrößen elektrisch betriebener Fahrzeuge. E.B. 1904. H. 21.
- Kilchenmann. Betriebserfahrungen bei der elektrischen Zugförderung am Simplon. E.K.B. 1913. H. 21.
- Knorr. Apparat zur selbstdägigen Aufzeichnung des Fahrdiagrammes. E.K.B. 1914. H. 16.
- Kreissig. Die Bemessung des Bremseffektes bei Straßenbahnwagen unter Berücksichtigung der Massenwirkung der Radkrümmung und der Bremsklotzhängung. E.K.B. 1917.
- Seefehlner, Elektr. Zugförderung.

- Kummer. Auslauf-Fahrlinien in vereinfachter und berichtigter Darstellung. Sch.B.Z. 1920. Bd. 76. Nr. 17.
- Kummer. Die virtuellen Längen der Eisenbahnen. Sch.B.Z. 1916. Dez.-Nr. 25.
- Markt. Rollwiderstand und Massenwirkung umlaufender Getriebe der Einphasenlokomotiven der Niederösterreichisch-Steirischen Alpenbahn. E. u. M. 1921. H. 18.
- Marshall. The wind resistance on trains. Eng. 16. Mai 1919.
- Metzelin. Berechnung der Hauptabmessungen von Lokomotiven (Zugwiderstände). Hanomag Nachr. Jänner 1921. H. 87.
- Musil. Die Leistungsfähigkeit städtischer Schnellbahnen. Organ. 1918.
- Mutzner. Die virtuellen Längen der Eisenbahnen. Zürich. 1914.
- Nordmann. Die Widerstandsformeln für Eisenbahnzüge in ihrer Entwicklung. G.A. 1916. H. 932.
- Pflug. Geschwindigkeitsmesser für Motorfahrzeuge und Lokomotiven. Verl. Julius Springer, Berlin. 1908.
- Pforr. Berechnung von Zugbewegungen. Verl. Oldenbourg, München-Berlin 1919.
- Pforr. Bewegungsverhältnisse von Eisenbahnzügen. Z.B.V. 1900. Nr. 8.
- Pforr. Einige Bewegungsberechnungen für Schnellbahnen. E.K.B. 1916. H. 21.
- Risch. Zur Frage der virtuellen Längen. V.T. 1921. H. 13.
- Ruegger. Betrachtungen über die störenden Nebenbewegungen der Eisenbahnfahrzeuge mit besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Radreifen-Konizität. Sch.B.Z. 1917. Bd. 69. Nr. 25.
- Sanzin. Versuche über den Widerstand von Dampflokomotiven. Z.V.D.J. 1911. I. Bd.
- Sanzin. Indikatorversuche an Lokomotiven. Z.O.J.A.V. 1914.
- Sanzin. Die Widerstände der Eisenbahnfahrzeuge. O.W.O.B.D. 1917. H. 35.
- Sanzin. Versuche z. Ermittlung d. Fahrwiderstandes d. Mittenwald-Lokomotive. E.K.B. 1919. H. 11.
- Sanzin. Zugförderung auf Steilläufen. Berlin 1912.
- * * * La résistance à la traction en courbes d'une voiture électrique. de 28 t. R.G.d'E. juin 1917.
- Schmidt und Marquis. Der Einfluß der Wärme auf den Zugwiderstand. Eng. Januar 1913.
- Schörling. Kugel- und Rollenlager. V.T. 1920. Nr. 4.
- Schroeder. Bestimmung des Traktionswiderstandes von Fahrzeugen aus Auslauf- und Anlaufkurven. (Rhätische Bahn.) B.B.C.M.B. 1920. H. 8.
- Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen. Versuchsfahrten auf der Militäreisenbahn 1903 bis 1904. Berlin.
- Sveinsson. Umrechnung der Kennlinien eines Hauptstrommotors vom Regelfeld auf geschwächtes Feld. E.K.B. 1918.
- Thormann. Der Energieverbrauch der elektrischen Zugförderung auf der Berner Alpenbahn. E.K.B. 1916. H. 25.
- Volkers. Die Fahrkunst bei Straßenbahnen. Berlin. 1917.
- Weber. Die virtuellen Längen der Eisenbahnen. V.T. 1920. H. 1.
- Wichert. Über Fahrwiderstände elektrischer Lokomotiven mit Parallelkurbelgetrieben. E.K.B. 1919. H. 32.
- Wann werden Kugellager bei Straßenbahnen wirtschaftlich? E.K.B. 1917. H. 33.

Die Zugwiderstände lassen sich am klarsten auf Grundlage ihrer Quellen erfassen. Zur Fortbewegung eines Fahrzeuges sind zu überwinden:

1. Der Reibungswiderstand (Rollwiderstand) in gerader Bahn, in welcher außer der rollenden Reibung des Rades auch alle Reibungsverluste der Lager und des Getriebes einbezogen werden. Die zur Überwindung der Reibung erforderliche Kraft ist proportional dem Druck, welcher die Reibung verursacht.

Bei Eisenbahnfahrzeugen ist hierfür die Achslast die kennzeichnende Größe. Über die Größenordnung des Reibungswiderstandes erhält man Aufschluß, wenn man die spez. Werte desselben je Tonne ermittelt. Es ist üblich, diesen, wie überhaupt alle Widerstände, auf die Tonne des Lokomotiv- bzw. Zuggewichtes zu beziehen.

Mit Rücksicht darauf, daß die rechnerische Erfassung der Widerstände kaum durchführbar ist, muß man sich damit zufrieden geben hierfür Erfahrungswerte einzusetzen. Diese können getrennt für die Treibfahrzeuge und die gezogene Last ermittelt werden und zeigen das Ergebnis, daß der Widerstand treibender Fahrzeuge stets größer ist als für gezogene Fahrzeuge unter sonst gleichen Verhältnissen.

Tatsächlich weisen z. B. kalt geschleppte Dampflokomotiven kleinere Widerstände auf als sie zu ihrem Eigenbetriebe benötigen.

Eine theoretische Überlegung des Bewegungsvorganges zwischen Rad und Schiene führt im übrigen zum gleichen Ergebnis. Zwischengeschaltet sei, daß unbeschadet der Richtigkeit dieser Feststellung elektrische Triebfahrzeuge mit Zahnradantrieb geschleppt, größere Widerstände zeigen. Das liegt nicht am Bewegungsvorgang zwischen Rad und Schiene, sondern daran, daß die Motoranker mit einer Übersetzung ins Schnelle, die bekanntlich schlechtere Wirkungsgrade ergibt, angetrieben werden.

Der Zugwiderstand ist auch wesentlich größer im Moment des Anziehens und vermindert sich erst nach einiger Zeit auf seinen stationären Wert. Dieser Anfahrvwert hängt auch davon ab, wie lang der Zug vorher stillgestanden hat und welche Temperatur vorliegt. Nach amerikanischen Angaben wird der Beharrungswert des Zugwiderstandes erst nach einer Fahrt von etwa 50 km erreicht und ist der Anfangswert etwa doppelt so hoch.

Die Temperatur (Abb. 123) der Schmiermittel beeinflußt auch nennenswert den Zugwiderstand; große Kälte und große Wärme lassen denselben anwachsen. Dies kommt auch in den Stromverbrauchszahlen zum Ausdruck. Bei einer Straßenbahn wurde einwandfrei festgestellt, daß der spez. Stromverbrauch sich mit den Jahreszeiten ganz regelmäßig ändert. Der Höchstwert wurde im Dezember-Jänner beobachtet, der niedrigste stets in den Monaten Juli-August erzielt. Der Unterschied beträgt etwa 20%.

2. Der Luftwiderstand. Der Winddruck entsteht durch den Luftwiderstand der Stirnfläche des ersten Fahrzeuges, der Seitenreibung des Zuges und der Saugwirkung des letzten Wagens; obzwar mit der Fläche in Proportion, pflegt man auch diesen Widerstandswert auf das Gewicht zu beziehen. Der Größe nach wächst dieser Widerstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit.

3. Der Hebungswiderstand (Abb. 124) entspricht der Steigung der Strecke. Die zu dessen Überwindung erforderliche Zugkraft Z_h (kg) für das Zugsgewicht $Q(t)$ ist

$$Z_h = 1000 Q \sin \alpha \text{ bzw. für die Tonne } w_h = \frac{Z_h}{Q} = 1000 \sin \alpha;$$

die Achslast (G) senkrecht auf die Schienen ist.

$$G = Q \cos \alpha,$$

wobei für den Neigungswinkel (α) die Beziehung besteht

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L} = \frac{h}{1000}.$$

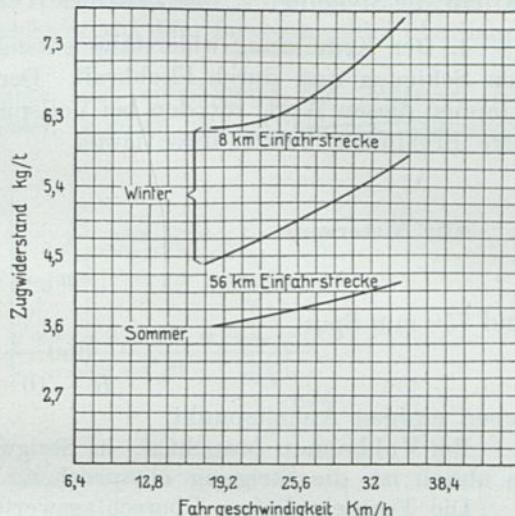


Abb. 123. Abhängigkeit des Zugwiderstandes von der Jahreszeit.

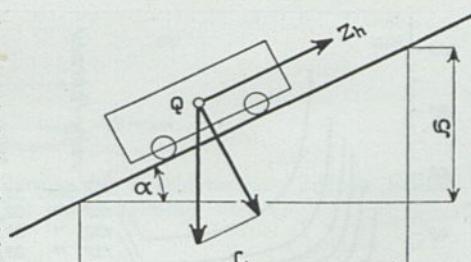


Abb. 124. Kräfteplan für ein Fahrzeug im Gefälle.

Da $\cos \alpha$ bis zu Steigungen von $h = 131\%$ kaum um 1% von der Einheit differiert, ist es zulässig, für Reibungsbahnen zu setzen

$$G = Q$$

und

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha,$$

so daß die Steigung $^{\circ}/_{100}$ die Zahl des Hebungswiderstandes/Tonne w_H darstellt.

4. Der Krümmungswiderstand entsteht durch das Anlaufen des Fahrzeuges an den Schienen und durch Fliehkraft. Der Radstand und der Bogenhalbmesser bestimmen diesen Wert, für den bei Vollspur die Erfahrungsformel von Röckl brauchbare Ergebnisse liefert; diese lautet

$$w_k = \frac{650}{R - 55}.$$

Für Meterspur

$$w_k = \frac{400}{R - 20}$$

und 750 mm-Spur

$$w_k = \frac{350}{R - 10} \quad \text{oder} \quad \frac{200}{R - 5}$$

geben einen Anhaltspunkt.

Bei Vollbahnen braucht w_k in Steigungen nicht berücksichtigt zu werden, weil es üblich ist, die Steigung entsprechend zu ermäßigen.

Die Formeln liefern Überschlagswerte, weil sie die maßgebenden Größen nicht enthalten, so insbesondere den Radstand nicht; dann wäre richtig, bei Vollbahnlokomotiven mit direkt treibenden Motoren die Präzessionswirkung der rotierenden Massen zu berücksichtigen.

5. Die Beschleunigung. Die vorgenannten Bahnwiderstände beziehen sich auf den Beharrungszustand. Soll der Zug beschleunigt werden, tritt noch die Beschleunigungskraft hinzu, die durch die Grundgleichung

$$p = \frac{1}{3,60} \frac{dv}{dt} \cdot \frac{Q}{9,81} \cdot 1000$$

bestimmt ist.

Die Beschleunigung der Züge erfordert einen vergleichsweise großen Kraftaufwand; es ist daher wichtig, den jeweils zweckmäßigen Wert der Beschleunigung zu bestimmen, bzw. den in der Praxis als zweckmäßig erkannten Wert zu wählen.

Der Wahl der Beschleunigung hat eine eingehende Prüfung aller einschlägigen Verhältnisse voranzugehen, weil die Beschleunigung (Verzögerung) letzten Endes immer dasjenige kinematische Mittel ist, mit dessen Hilfe die Wirtschaftlichkeit des Betriebes beeinflußt werden kann. (Abb. 125.)

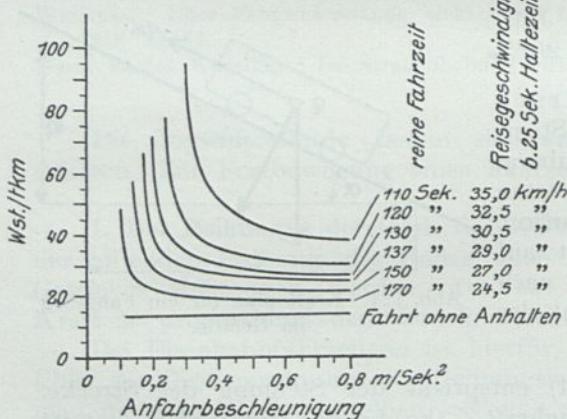


Abb. 125. Einfluß der Anfahrtbeschleunigung auf den Stromverbrauch bei veränderlicher Reisegeschwindigkeit.

Der Verkehr städtischer Schnellbahnen und Straßenbahnen ist durch kurze Zugfolge und verhältnismäßig kleine Haltestellenentfernung gekennzeichnet. Ein ordentlicher Verkehr läßt sich nur durchführen, wenn ein streng geregelter Fahrplan eingehalten wird. Dieser setzt die Erreichung und Einhaltung bestimmter

Grenzwerte der Beschleunigung, der Geschwindigkeit und der Verzögerung voraus, wobei es zur Erreichung eines Beharrungszustandes gar nicht kommt. Das letztere ist nur bei Bahnen der Fall, bei welchen die Haltestellenentfernung einer Fahrzeit gleich dem Vielfachen der Anfahrzeit entspricht.

Diese Sachlage ist maßgebend für die Bedeutung der Beschleunigung und hat zur Folge, daß in den Bewegungsbildern von Voll- und Überlandbahnen und ähnlichen Anlagen der erreichbare Beharrungszustand vorwiegt, dagegen bei Stadt- und Straßenbahnen dieser Arbeitsabschnitt aus dem Bewegungsbild überhaupt ausscheidet.

Die Erörterung der Bewegungsvorgänge faßt vorwiegend die letzteren Betriebsarten ins Auge, denn nur bei diesen kommt der Anfahrbeschleunigung

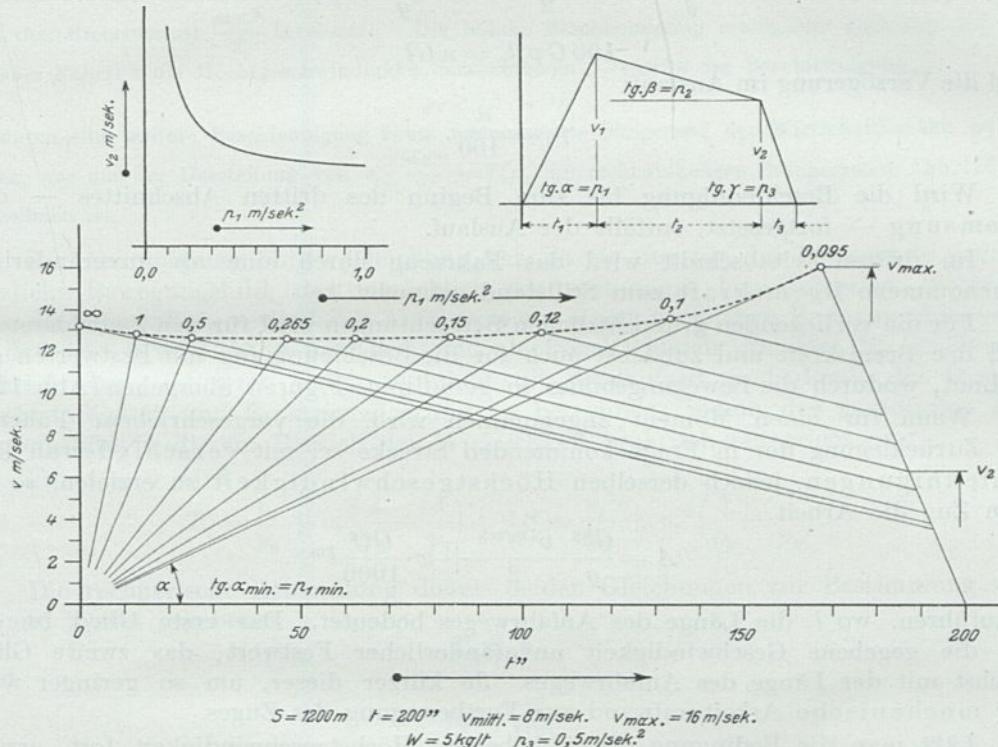


Abb. 126. Vereinfachtes Fahrdiagramm. Einfluß der Änderung der Beschleunigung auf die Höchstgeschwindigkeit bei gegebener Fahrzeit über eine bestimmte Strecke.

und der Verzögerung eine besondere Tragweite zu. Im Vollbahnbetrieb liegen ähnliche Verhältnisse fallweise bei Personenzügen mit kurzen Haltestellenentfernungen vor.

Der Bewegungsvorgang bei der Zurücklegung einer Strecke kann in drei kennzeichnende Abschnitte geteilt werden (Abb. 126).

Im ersten Abschnitt — der Anfahrt — wird dem Fahrzeug Arbeit zugeführt, die die lebendige Kraft vermehrt und die Bahnwiderstände überwindet.

Dem Anlauf folgt als zweiter Abschnitt der Auslauf. In diesem Abschnitt wird die lebendige Kraft des Zuges zur Überwindung der Bahnwiderstände nutzbar verwertet, wobei die Geschwindigkeit entsprechend dem Arbeitsgesetz

$$\frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} = m p_2 l_2 = m l_2 \frac{w}{100}$$

abnimmt, indem — da eine gleichmäßige Verzögerung bzw. ein Festwert für den Zugswiderstand angenommen wird —

$$v_1 - v_2 = p_2 t_2,$$

$$\frac{v_1 + v_2}{2} t_2 = l_2,$$

schließlich

$$\frac{v_1^2 - v_2^2}{2} = p_2 l_2,$$

hieraus

$$\frac{G}{g} 1000 \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} = \frac{G \cdot 1000}{g} \cdot p_2 l_2,$$

$$100 G p_2 l_2 = w G l_2$$

und die Verzögerung im Auslauf

$$p_2 = \frac{w}{100}.$$

Wird die Beschleunigung bis zum Beginn des dritten Abschnittes — der Bremsung — fortgesetzt, entfällt der Auslauf.

Im dritten Zeitabschnitt wird das Fahrzeug durch eine als unveränderlich angenommene Bremskraft zum Stillstand gebracht.

Für die vorliegenden grundsätzlichen Betrachtungen wird für den Zugwiderstand und die Bremskraft und zunächst auch für die Beschleunigung mit Festwerten gerechnet, wodurch die Bewegungsbilder in geradlinige Figuren übergehen (Abb. 126).

Wenn für einen Moment angenommen wird, die vorgeschriebene Fahrzeit zur Zurücklegung der in Frage kommenden Strecke sei mit verschiedenen Beschleunigungen, jedoch derselben Höchstgeschwindigkeit zu erzielen, so ist dem Zug die Arbeit

$$A = \frac{G \text{ kg}}{g} \cdot \frac{v^2 \text{ m/sec}}{2} + w \cdot \frac{G \text{ kg}}{1000} l^m$$

zuzuführen, wo l die Länge des Anfahrweges bedeutet. Das erste Glied ist ein für die gegebene Geschwindigkeit unveränderlicher Festwert, das zweite Glied wächst mit der Länge des Anfahrweges. Je kürzer dieser, um so geringer wird der mechanische Arbeitsaufwand zur Fortbewegung des Zuges.

Läßt man die Bedingung gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit fort, erzielt man durch Steigerung der Beschleunigung bei gleicher Fahrzeit noch den Vorteil, daß auch das erste Glied obigen Ausdruckes für die zugeführte Arbeit kleiner wird.

Angenähert nach dem gleichen Gesetz (der Wirkungsgrad des Motors ändert etwas den Verlauf der Verbrauchskurve) verringert sich auch der Stromverbrauch. (Wh/t km.)

Die Auslaufzeit bzw. der Auslaufweg ist ein Maß der nutzbar gemachten lebendigen Kraft des Fahrzeuges. Die Geschwindigkeit, bei welcher die Bremsung einsetzt, bzw. das Quadrat dieser Geschwindigkeit ist ein Maß des Bremsverlustes.

Aus den bekannten Beziehungen zwischen Zeit, Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung folgt unter Beachtung der in Abb. 126 benützten Symbole für das vereinfachte, aus geraden Linien zusammengefügte Bewegungsbild für den zurückgelegten Weg S

$$S = \frac{v_1 t_1}{2} + \frac{v_1 + v_2}{2} t_2 + \frac{v_2}{2} t_3.$$

und da

$$p_1 = \frac{v_1}{t_1}, \quad p_2 = \frac{v_1 - v_2}{t_2} = \frac{w}{100}, \quad p_3 = \frac{v_2}{t_3}$$

ist die aufgewendete Zeit

$$T = \frac{v_1}{p_1} + \frac{v_1 - v_2}{p_2} + \frac{v_2}{p_3} = v_1 \left(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} \right) + v_2 \left(\frac{1}{p_3} - \frac{1}{p_2} \right).$$

Ebenso

$$S = \frac{v_1^2}{2} \left(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} \right) + \frac{v_2^2}{2} \left(\frac{1}{p_3} - \frac{1}{p_2} \right).$$

In Abb. 126 ist an Hand eines Beispieles ($S = 1200 \text{ m}$ $v_{\text{mittl.}} = 8 \text{ m/sec}$ $v_{\text{max}} = 16 \text{ m/sec}$) dargestellt, wie die zunehmende Beschleunigung und die Steigerung der Höchstgeschwindigkeit v_2 und den Bremsverlust $\frac{mv_2^2}{2}$ herabsetzt. Die höhere Beschleunigung ermöglicht außerdem bei gegebener Fahrzeit die Höchstgeschwindigkeit herabzusetzen. Jenseits der Beschleunigung

$$p_1 \geq 0,5 \sim 0,6$$

ist durch eine weitere Beschleunigung keine nennenswerte Steigerung der Wirtschaftlichkeit zu erzielen, was aus der Darstellung von $v_2 \left(\frac{mv^2}{2} \right) = f(p_1)$ im rechtwinkeligen Bezugssystem Abb. 126 zu entnehmen ist.

Die Ausrechnung obiger Gleichung hat, da sie nur für das betrachtete grundsätzliche Bewegungsbild, das tatsächlich nie vorkommt, kein Interesse. Scheidet man die krummlinig verlaufende Anfahrzeit aus einem wirklichen Bewegungsbild aus, so daß $t_1 = 0$ wird, kann die Gleichung als Behelf dienen, um aus der gegebenen Fahrzeit bzw. mittleren Geschwindigkeit die Auslaufzeit und damit die Bremsgeschwindigkeit und Bremsverzögerung zu berechnen, indem das geradlinige Bewegungsbild in diesem Bereich der Wirklichkeit praktisch entspricht.

Für $t_1 = 0$ wird

$$T_1 = \frac{v_1}{p_2} + v_2 \left(\frac{1}{p_3} - \frac{1}{p_2} \right), \quad 2S = \frac{v_1^2}{p_2} + v_2^2 \left(\frac{1}{p_3} - \frac{1}{p_2} \right).$$

Die rechnerische Behandlung dieser beiden Gleichungen zur Bestimmung von v_2 und p_3 bei gegebenen

$$T_1 \ S_1 \ v_1$$

und

$$p_2 = \frac{w}{100}$$

bedarf keiner Erläuterung. Die Durchführung der Rechnung ist unbequem; handelt es sich doch darum, die Lage eines Eckpunktes eines trapezförmigen Viereckes zu berechnen, dessen Basis, Fläche und die anderen drei Eckpunkte gegeben sind.

Für die Gleichung läßt sich eine handliche Rechentafel (Abb. 127) aufstellen, mit deren Hilfe alle praktischen Fälle ohne Rechnen zu lösen sind.

Der Einfachheit halber schreibt man:

$$a = \frac{1}{p_2}, \quad b = \frac{1}{p_3} - \frac{1}{p_2},$$

daher

$$T_1 = a v_1 + b v_2$$

und

$$2S_1 = a v_1^2 + b v_2^2.$$

Addiert man beide Gleichungen, wird

$$2S + T_1 = a(v_1^2 + v_1) + b(v_2^2 + v_2).$$

Zwei kollineare Systeme mit gemeinsamer Zapfenlinie eignen sich zur Ausrechnung dieser Gleichung (Abb. 127), wobei für die beiden Glieder der rechten Seite dieselben Teilnomogramme benutzt werden können.

Die geradlinige Beschleunigung setzt voraus, daß, sobald die den

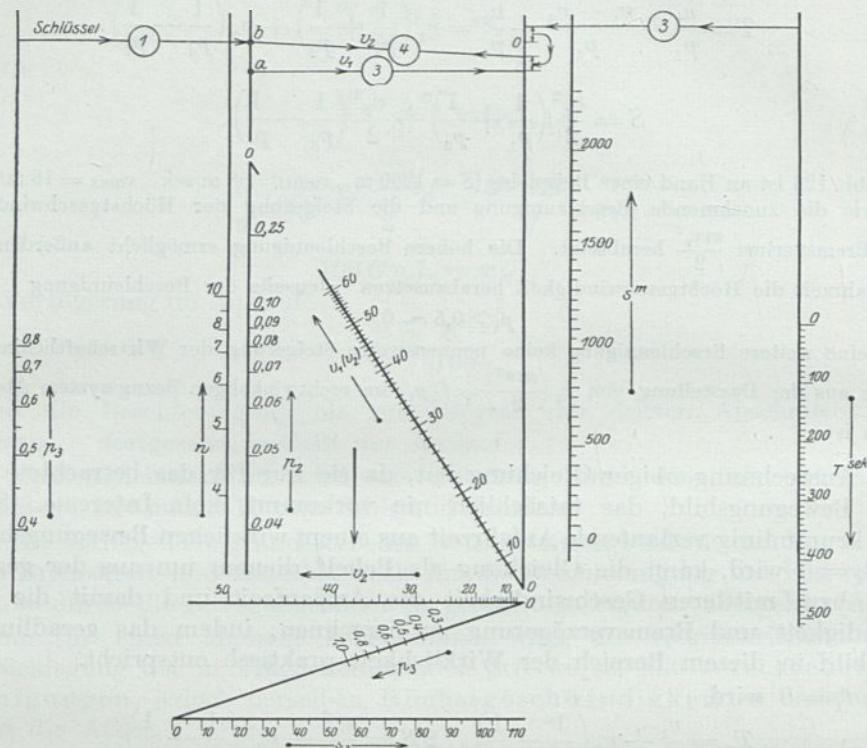


Abb. 127. Rechentafel zur Bestimmung der Auslauf- und Bremszeit.

Motoren zur Erreichung einer bestimmten Zugkraft vorgeschalteten Widerstände abgeschaltet sind und derjenige Punkt der Eigencharakteristik erreicht ist, dem die Anfahrzugkraft entspricht, unter einem auch der Strom unterbrochen wird.

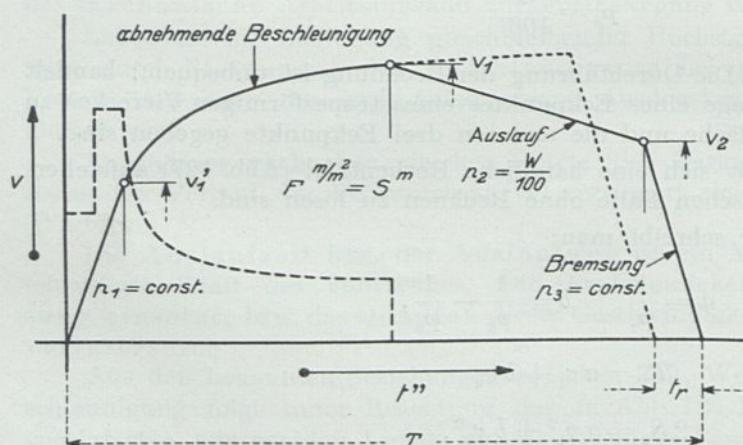


Abb. 128. Bewegungsbild entsprechend den Kennlinien eines Serienmotors mit Zeitrückhalt. Mittlere Geschwindigkeit $V = \frac{S}{T}$.

Das geradlinige Bewegungsbild stellt den Fall des geringsten Aufwandes an mechanischer Arbeit dar; derselbe deckt sich aus mehrfachen Gründen nicht mit der günstigsten Stromwirtschaft. Das geradlinige Anfahren erfolgt unter Vorschaltung von Widerständen, wodurch Verluste entstehen. Läßt man im Bereich höherer Geschwindigkeiten eine Beschleunigung abnehmender Größe entsprechend der Eigencharakteristik

des Motors zu, wird der mittlere Wirkungsgrad verbessert und der Stromverbrauch verringert.

Die erstere Betriebsweise wäre unerwünscht, weil sie Motoren mit einer unverhältnismäßig hohen Leistung voraussetzt, indem die hohe Anfahrzugkraft bis in den Bereich hoher Geschwindigkeiten aufrechterhalten wird.

Dem ersten Zeitabschnitt mit geradlinigem Anstieg der Geschwindigkeit, demnach unveränderlicher Beschleunigung, wird ein Zustand der abnehmenden Be-

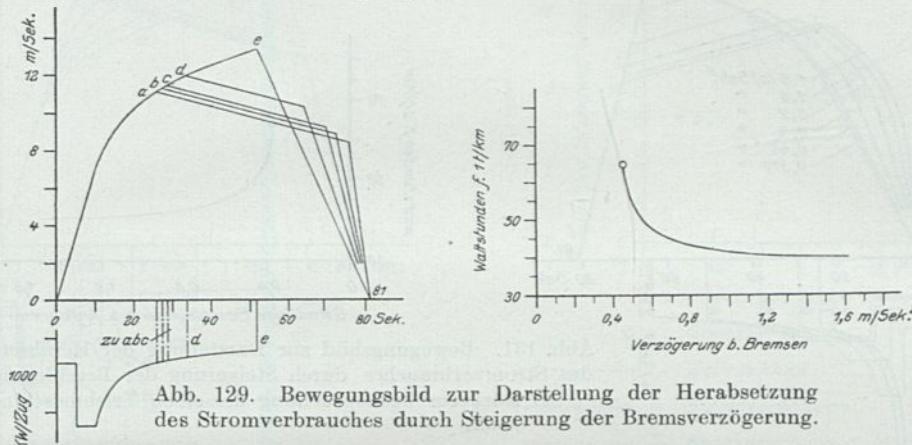


Abb. 129. Bewegungsbild zur Darstellung der Herabsetzung des Stromverbrauches durch Steigerung der Bremsverzögerung.

schleunigung gemäß der Eigencharakteristik der Triebmaschine bis zur Erreichung der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit oder des Beharrungszustandes folgen. In diesem Zeitabschnitt hat die Geschwindigkeitslinie einen gekrümmten, sich tangential an die geradlinige Anfahrt und der ideellen Beharrungsgeschwindigkeit anschließenden Verlauf (Abb. 128).

Den Einfluß der Beschleunigung auf die Stromwirtschaft, Verringerung der

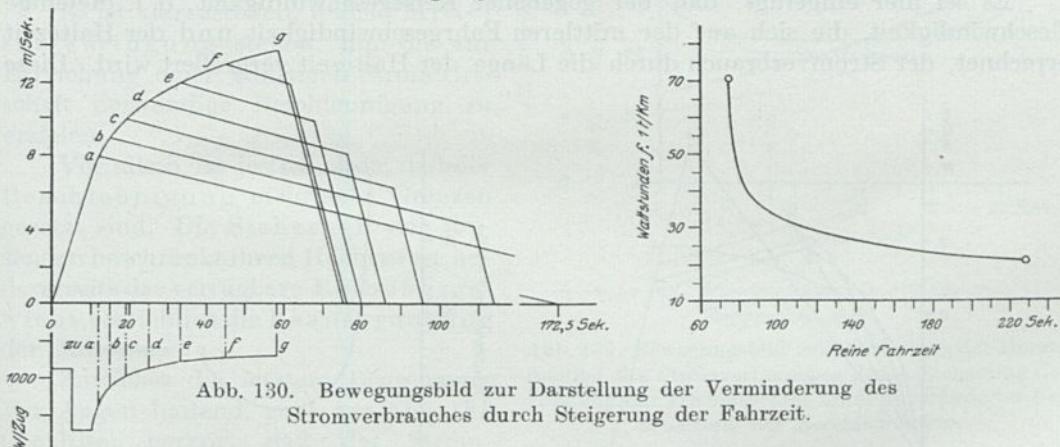


Abb. 130. Bewegungsbild zur Darstellung der Verminderung des Stromverbrauches durch Steigerung der Fahrzeit.

Fahrzeit und damit Steigerung der Reisegeschwindigkeit erläutert das in Abb. 126 dargestellte Beispiel. Das Bewegungsbild gilt für gleiche Fahrzeiten in allen Fällen.

Vom Standpunkt der Stromwirtschaft verdient der Zeitabschnitt des Auslaufes Beachtung; dieser hat auch vom Betriebsstandpunkt, insbesondere für Stadtschnellbahnen mit streng geregelten Fahrvorschriften, seine besondere Bedeutung.

Der Zeitunterschied zwischen der Fahrzeit über den vorgeschriebenen Weg mit Auslauf gegenüber dem Zeitaufwand ohne Auslauf, wenn bis zum Anziehen der Bremse mit Strom gefahren wird, bildet die zur Einbringung einer etwaigen Ver-spätung verfügbare Zeitreserve. Die Fahrzeit ohne Auslauf entspricht der kürzesten

mit den verwendeten Motoren erzielbaren Fahrzeit. Diese Zeitreserve nennt man Zeitrückhalt (t_r , Abb. 128). Aus seiner betrieblichen Bedeutung folgt, daß zur Gleichwertigkeit von verschiedenen Fahrlinien nicht genügt, wenn der Zeitaufwand für eine gegebene Strecke der gleiche ist; es müssen vielmehr auch die Zeitrückhalte in den verglichenen Fällen übereinstimmen.

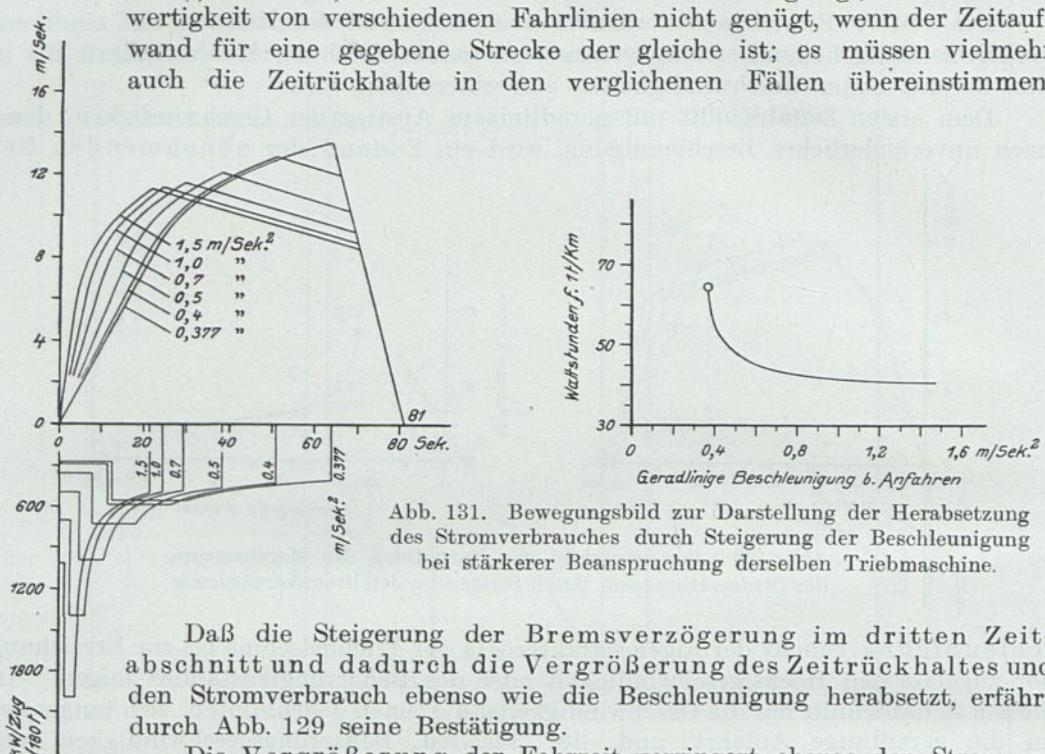


Abb. 131. Bewegungsbild zur Darstellung der Herabsetzung des Stromverbrauches durch Steigerung der Beschleunigung bei stärkerer Beanspruchung derselben Triebmaschine.

Daß die Steigerung der Bremsverzögerung im dritten Zeitabschnitt und dadurch die Vergrößerung des Zeitrückhaltes und den Stromverbrauch ebenso wie die Beschleunigung herabsetzt, erfährt durch Abb. 129 seine Bestätigung.

Die Vergrößerung der Fahrzeit verringert ebenso den Stromverbrauch (Abb. 130).

Es sei hier eingefügt, daß bei gegebener Reisegeschwindigkeit, d. i. diejenige Geschwindigkeit, die sich aus der mittleren Fahrgeschwindigkeit und der Haltezeit errechnet, der Stromverbrauch durch die Länge der Haltezeit vergrößert wird. Diese

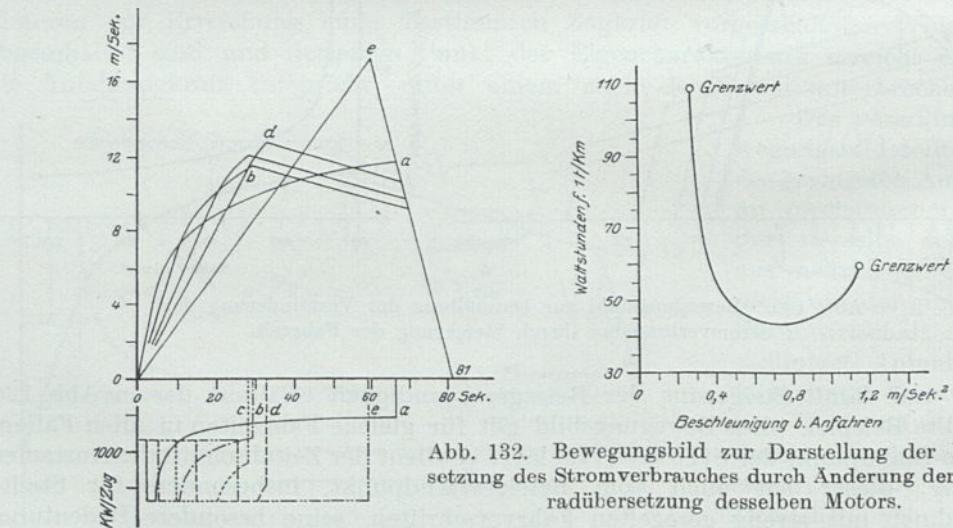
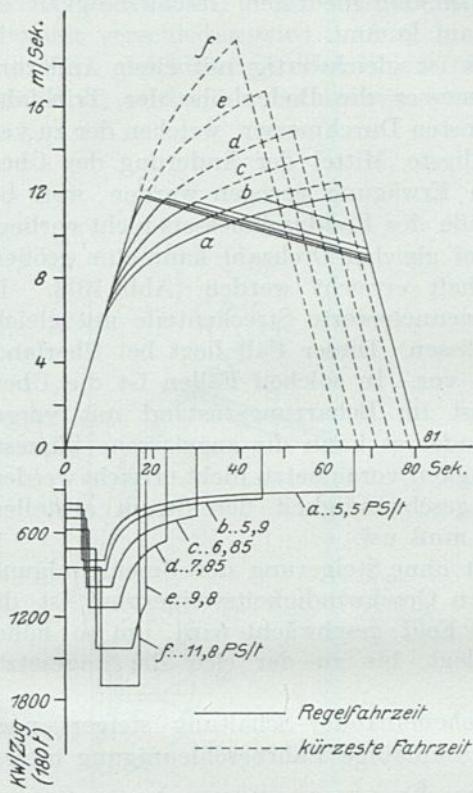


Abb. 132. Bewegungsbild zur Darstellung der Herabsetzung des Stromverbrauches durch Änderung der Zahnräuberüersetzung desselben Motors.

Änderung kommt der Preisgabe eines Teiles des Zeitrückhaltes bzw. Auslaufes gleich, bedingt daher eine Verlängerung der Stromzeit und frühere Betätigung der Bremsen.



Es ist klarzustellen, welche Mittel zur Verfügung stehen, um die zur Erreichung einer günstigen Stromwirtschaft notwendige Beschleunigung zu erzielen.

Vor allem ist festzuhalten, daß der Beschleunigung mehrfache Grenzen gesetzt sind. Die Sicherheit der Reisenden beschränkt ihren Höchstwert, andererseits das verfügbare Reibungsgewicht, schließlich die Beanspruchung der Motoren.

Zunächst die letztere Begrenzung vor Augen haltend, geht aus Abb. 131 (Bethge) hervor, daß der Stromverbrauch mit Steigerung der Stromstärke und dadurch mit der Beschleunigung abnimmt. Der Motor soll zum Anfahren bis zu der zulässigen Leistung beansprucht werden.

Die Zugkraft eines Motors läßt sich durch Vergrößerung der Zahnradübersetzung, die bei dieser Betriebsart kaum je fehlen wird, vergrößern. Die durch dieses Mittel herbeigeführte Änderung der Fahrlinien ist der Abb. 132 (Pforr) zu entnehmen. Es gibt eine ausgesprochen günstigste Übersetzung, so daß die Vergrößerung über einen gewissen Wert den Stromverbrauch steigert. Durch die zu groß bemessene Übersetzung wird zwar anfänglich stark beschleunigt, die Eigen-

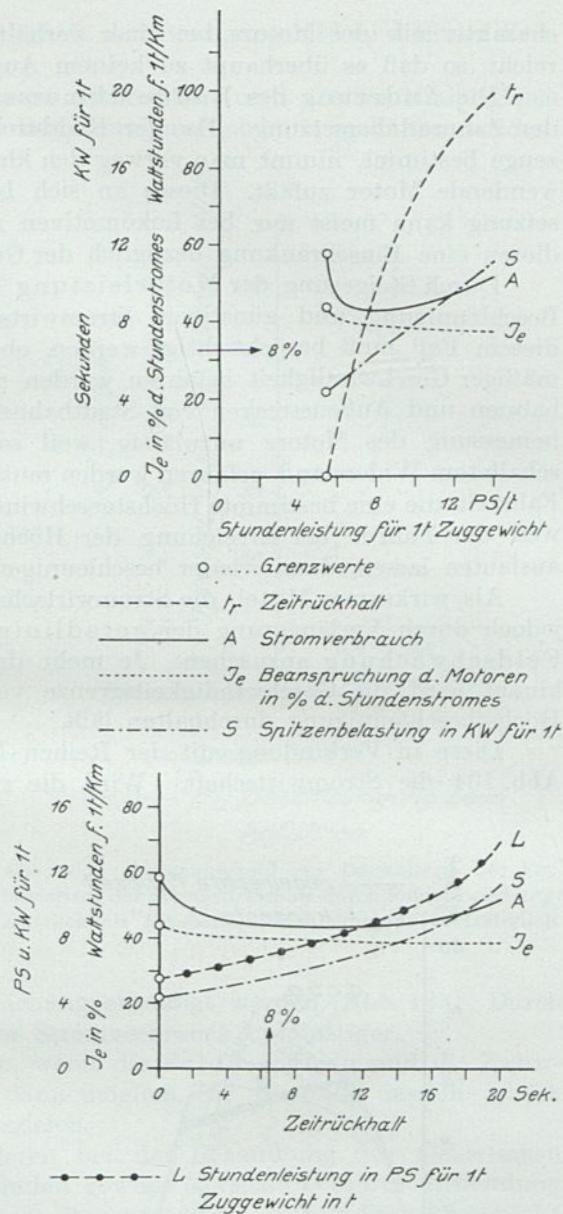


Abb. 133. Bewegungsbild zur Darstellung der Herabsetzung des Stromverbrauches durch Steigerung der Leistung der Triebmaschine unter unveränderter Beibehaltung der Beschleunigung.

charakteristik des Motors bei einer verhältnismäßig niedrigen Geschwindigkeit erreicht, so daß es überhaupt zu keinem Auslauf kommt.

Die Änderung des Raddurchmessers ist gleichwertig mit einer Änderung der Zahnradübersetzung. Da der Raddurchmesser die Bodenhöhe der Triebfahrzeuge bestimmt, nimmt man vorweg den kleinsten Durchmesser, welchen der zu verwendende Motor zuläßt. Dieses an sich billigste Mittel der Änderung der Übersetzung kann meist nur bei Lokomotiven in Erwägung gezogen werden, weil bei diesen eine Einschränkung bezüglich der Größe des Raddurchmessers nicht vorliegt.

Durch Steigerung der Motorleistung bei gleicher Drehzahl kann eine größere Beschleunigung und günstigere Stromwirtschaft erreicht werden (Abb. 133). In diesem Fall muß berücksichtigt werden, ob nennenswerte Streckenteile mit gleichmäßiger Geschwindigkeit befahren werden müssen. Dieser Fall liegt bei Überlandbahnen und Außenstrecken von Stadtbahnen vor. In solchen Fällen ist die Überbemessung des Motors unzulässig, weil sonst im Beharrungszustand mit vorgeschaltetem Widerstand gefahren werden muß oder es kann die zugelassene kürzeste Fahrzeit, die eine bestimmte Höchstgeschwindigkeit voraussetzt, nicht erreicht werden, weil der Fahrer bei Erreichung der Höchstgeschwindigkeit den Strom abstellen, auslaufen lassen, dann wieder beschleunigen muß usf.

Als wirksames Mittel, die Stromwirtschaft ohne Steigerung der Beschleunigung, jedoch durch Verlängerung der geradlinigen Geschwindigkeitssteigerung, ist die Feldschwächung anzusehen. Je mehr das Feld geschwächt wird, um so höher hinauf wird die Geschwindigkeitsgrenze verlegt, bis zu der sich die angesetzte Höchstbeschleunigung durchhalten läßt.

Diese in Verbindung mit der Reihen-Nebeneinander-Schaltung steigert nach Abb. 134 die Stromwirtschaft. Wird die zweckmäßige Fahrbeschleunigung unver-

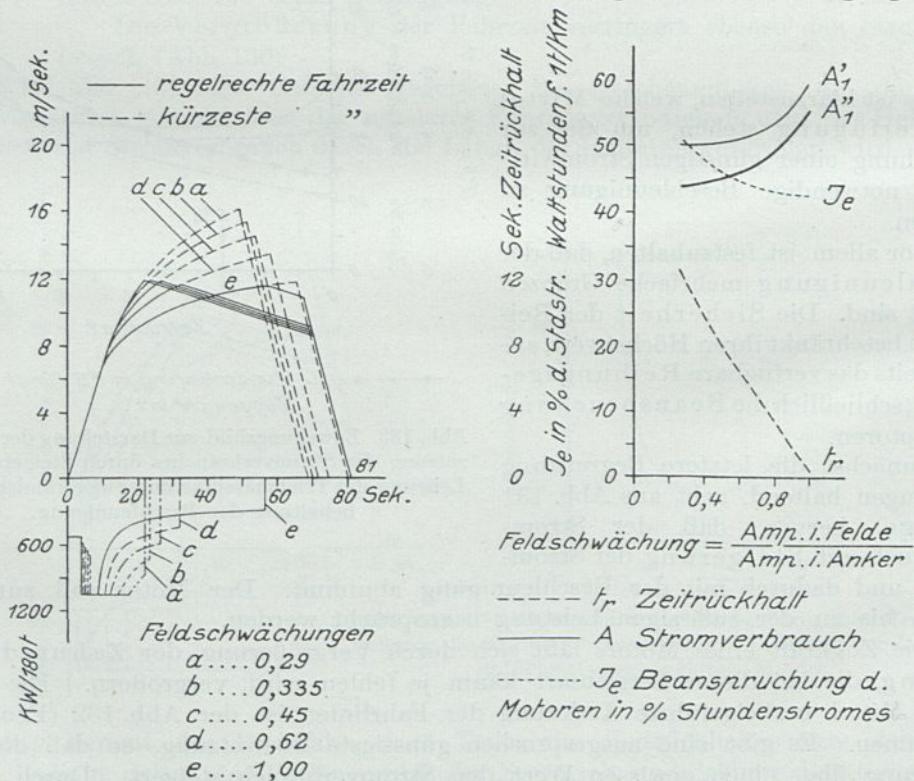


Abb. 134. Bewegungsbild zur Darstellung der Verbesserung der Stromwirtschaft durch Anwendung der Feldschwächung; Zeitrückhalt veränderlich, Beschleunigung konstant.

ändert beibehalten, ändert sich die Wertigkeit der Bewegungsbilder, weil der Zeitrückhalt verschieden wird.

Für gleichwertige Fahrlinien müssen Fahrzeiten und Zeitrückhalt gleich sein, d. h., es darf an der unveränderten Beschleunigung nicht festgehalten werden;

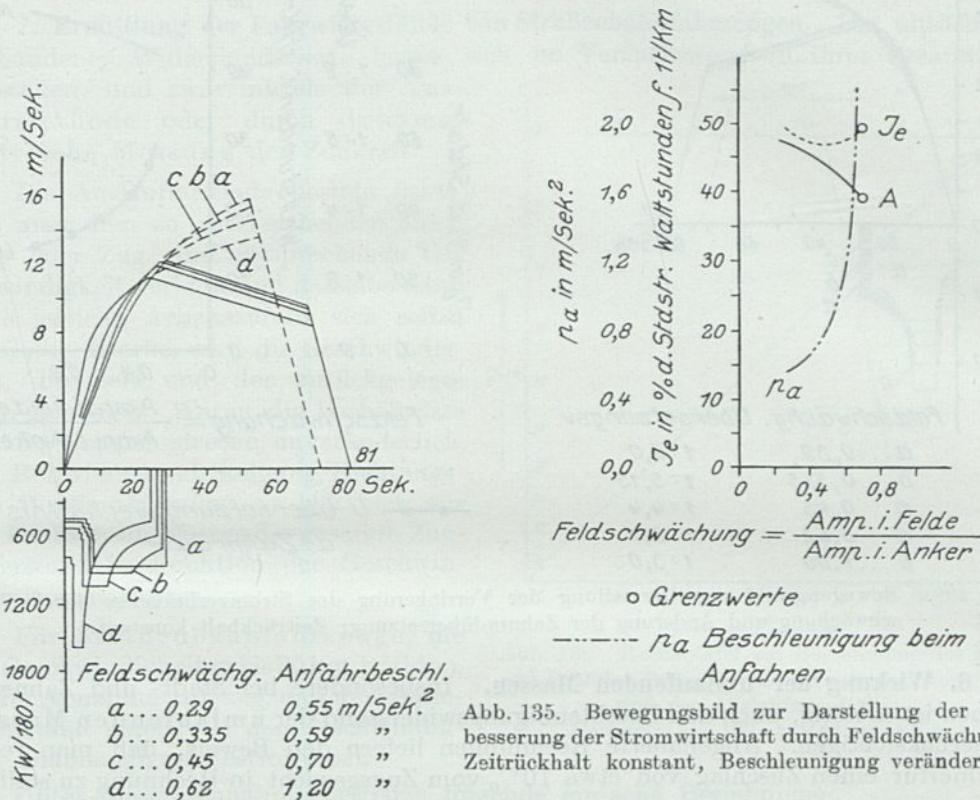


Abb. 135. Bewegungsbild zur Darstellung der Verbesserung der Stromwirtschaft durch Feldschwächung; Zeitrückhalt konstant, Beschleunigung veränderlich.

diese muß vielmehr mit der Feldschwächung ermäßigt werden (Abb. 135). Durch Steigerung der Feldschwächung wird der Stromverbrauch ungünstiger.

Dieser Übelstand läßt sich umgehen, wenn die Felderregung und die Zahnradübersetzung geändert wird; es ist dann möglich, für alle Fälle dasselbe gleich geartete Bewegungsbild (Abb. 136) zu erzielen.

Die Feldschwächung, die aus anderen bei der Behandlung der elektrischen Motoreigenschaften zu behandelnden Gründen gewisse Vorsicht bei ihrer Anwendung voraussetzt, ist für Gleichstrommotoren — ihre praktische Anwendung beschränkt sich auf diese — ein vorteilhafter Behelf, um bei stark wechselndem Gelände hohe Reisegeschwindigkeit bei geringen Höchstleistungen zu erzielen. In der Ebene fährt man rasch mit stark geschwächtem Feld, in der Steigung langsam auf der Eigencharakteristik des Motors. Die Gefahr bildet hierbei der Umstand, daß unverständige Fahrer dann auch in der Steigung mit geschwächtem Feld fahren.

Für die verschiedenen Betriebsarten haben sich nachstehend genannte Werte der Beschleunigung als zweckmäßig eingelebt:

- 1,0—0,7 m/sec² bei Stadtbahnen,
- 0,5—0,6 " " Straßenbahnen,
- 0,3 " " Triebwagenzügen,
- 0,25—0,18 " " Schnellzügen mit Lokomotivbetrieb,
- 0,25—0,13 " " Personenzügen und
- 0,15—0,09 " " Güterzügen.

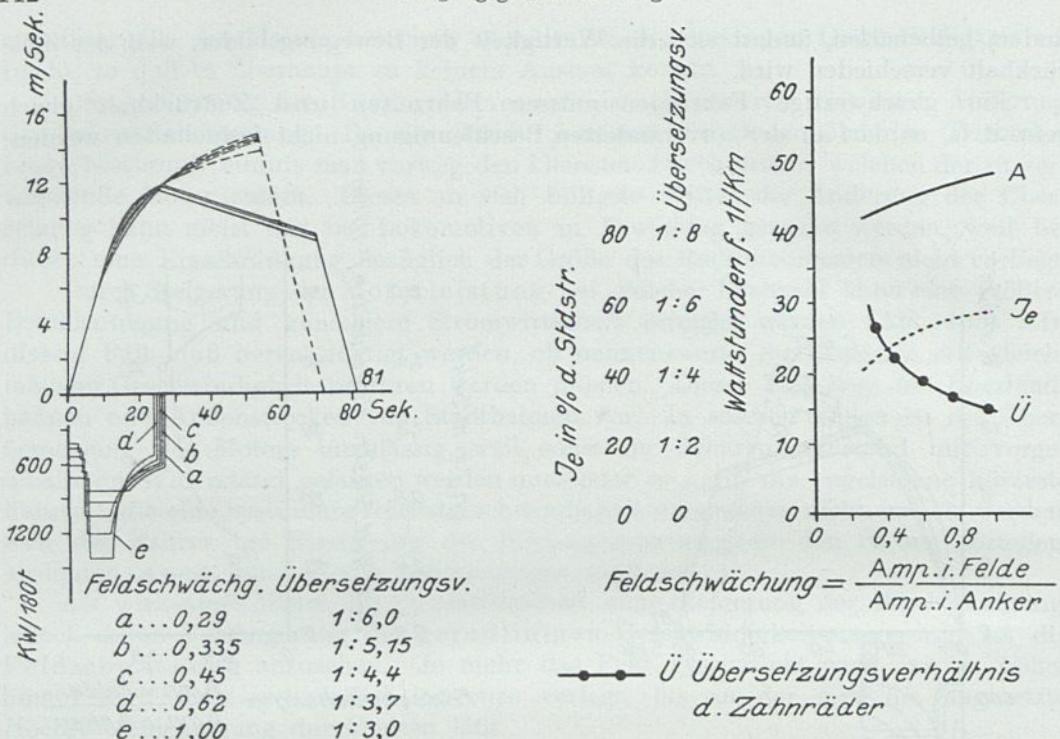


Abb. 136. Bewegungsbild zur Darstellung der Verringerung des Stromverbrauches durch Feldschwächung und Änderung der Zahnradübersetzung; Zeitrückhalt konstant.

6. Wirkung der umlaufenden Massen. Insbesondere bei Stadt- und Zahnradbahnen ist es nötig, auch den Beschleunigungswiderstand der umlaufenden Massen zu berücksichtigen. Angenäherte Rechnungen liefern den Beweis, daß man recht tut, hierfür einen Zuschlag von etwa 10% vom Zugsgewicht in Rechnung zu stellen.

Nach amerikanischen Angaben sind folgende Zuschläge zu machen:

für schwere Lokomotivzüge	5,0 %
Schnellzüge	6,5 %
schnellfahrende Motorwagen	6,5—9,0 %
langsamfahrende Motorwagen	9,0—15,0 %

Messungen haben für einige Lokomotiven folgende Werte ergeben:

Lötschberg-Lokomotiven	+ 37 % mit Achsfolge C + C
"	+ 43 % " " 1-E-1
Mittenwaldbahn	+ 22 % " " 1-C
Rhätische Bahn	+ 38 % " " 1-D-1
Montreux-Glion Zahnradlokomotive	+ 162 % " " 2A/2a
Rittnerbahn Zahnradlokomotive	+ 600 % " " 2A/2a

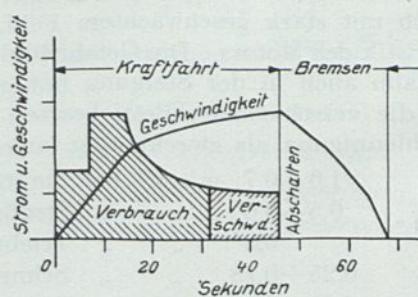
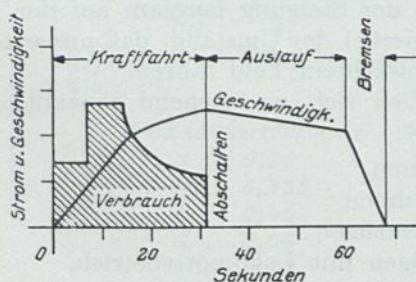


Abb. 137. Bewegungsbilder zur Erläuterung der wirtschaftlichen Fahrtechnik;
a) Fahrt mit Auslauf, a) Fahrt ohne Auslauf.

Die letztere Zahl gibt die Erklärung für zahlreiche Unfälle, die auf Bergbahnen stets beim Bremsen aufgetreten sind. Man scheint bei der Berechnung der Zahndrücke, die der Verzögerungskraft entsprechen, die überragende Wirkung der umlaufenden Massen nicht berücksichtigt zu haben.

7. Ermittlung der Fahrwiderstände von Straßenbahnfahrzeugen. Die tatsächlich vorhandenen Widerstandswerte lassen sich im Versuchswege in ihrer Gesamtheit feststellen, und zwar mittels der Auslaufmethode oder durch dynamometrische Messung der Zugkraft.

Die Auslaufmethode besteht darin, daß man dem zu untersuchenden Fahrzeug oder Zug eine entsprechende Geschwindigkeit verleiht und dasselbe dann ohne jegliche Arbeitszufluhr sich selbst überläßt. Hierbei wird die Geschwindigkeit, die Zeit und der zurückgelegte Weg gemessen. Waren die Verhältnisse auf der Versuchsstrecke unveränderlich, d. h. Rollwiderstand, Steigung, Richtungs- und Windverhältnisse, so läßt sich aus der Beobachtungskurve der gesamte Zugwiderstand in Funktion der Geschwindigkeit auswerten.

Für Straßenbahnfahrzeuge, die mit Geschwindigkeiten bis 30 km/h fahren, ist die Annahme zulässig, daß der Bahnwiderstand einen von der Geschwindigkeit unabhängigen Festwert hat.

Unter dieser Annahme bestehen folgende einfache Beziehungen.

$$\frac{mv^2}{2} = QwL,$$

wo Q das Zuggewicht in t,

m die Masse des Zuges in kg,

v die Geschwindigkeit in m,

l den Auslaufweg in m

w den Zugwiderstand

bezeichnet.

Weiter gilt

$$l = \frac{vt}{2} \quad \text{und} \quad m \approx \frac{Q \cdot 1000}{10}$$

$$\frac{Q \cdot 100 \cdot 4 l^2}{2 t^2} = Q l w,$$

somit

$$w = \frac{200l}{t^2},$$

d. h. man kann den Bahnwiderstand durch den Auslaufversuch ermitteln, ohne die Geschwindigkeit oder das Zugsgewicht zu kennen. Zu messen sind nur die Auslaufzeit (t sek) bis zum Stillstand und der Auslaufweg. Der Versuch muß auf gerader, ebener Bahn durchgeführt werden. Zur raschen Auswertung der Ergebnisse der Messungen eignet sich die Rechentafel Abb. 138.

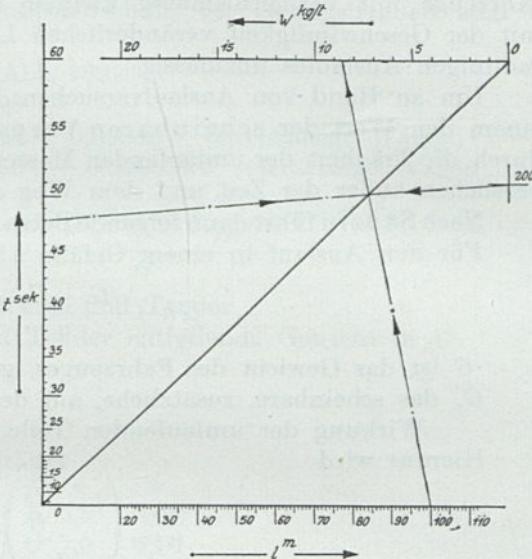


Abb. 138. Rechentafel zur Bestimmung des Rollwiderstandes (w kg/t) aus dem Auslaufweg (l m) und der Auslaufzeit (t sek).

Beispiel: $l = 100$, $t = 48$, $w = 8,6$

Ein gutes Mittel zur raschen Beurteilung des Betriebszustandes der Fahrzeuge besteht darin, daß man nach vorheriger Feststellung des Zugwiderstandes eine Strecke auswählt mit dem Gefälle $h = w$.

Bei gutem Zustand muß der Wagen in diesem Gefälle in Bewegung versetzt in der erreichten Geschwindigkeit beharren oder sich beschleunigen.

8. Ermittlung der Fahrwiderstände mit veränderlichen Werten. Für Vollbahnhaftrzeuge mit verhältnismäßig kleinem Rollwiderstand und größerem Anteil des mit der Geschwindigkeit veränderlichen Luftwiderstandes ist die Annahme des geradlinigen Auslaufes unzulässig.

Um an Hand von Auslaufversuchen den Wert des Bahnwiderstandes und unter einem den Wert der scheinbaren Vermehrung der geradlinig bewegten Massen durch die Trägheit der umlaufenden Massen zu erhalten, muß man bei den Auslaufversuchen außer der Zeit und dem Weg auch die Geschwindigkeit bestimmen.

Nach Sanzin führt dann folgende Betrachtung zur Ermittlung der gesuchten Werte:

Für den Auslauf in einem Gefälle $h \text{ \%}$ gilt die Gleichung

$$Gh + \left(\frac{G + G_1}{g} \right) 1000 \gamma = Gw.$$

G ist das Gewicht des Fahrzeuges, geradlinig bewegt gedacht, und G_1 das scheinbare, zusätzliche, auf den Radumfang bezogene Gewicht für die Wirkung der umlaufenden Teile.

Hieraus wird

$$w = \left(\frac{1 + \frac{G_1}{G}}{\frac{g}{1000 \gamma}} \right) + h.$$

Wird auf zwei möglichst verschiedenen Steigungen h_1 und h_2 je ein Aus- oder Ablauf unter möglichst übereinstimmenden Geschwindigkeitsverhältnissen unternommen, so treten verschiedene Verzögerungen bzw. Beschleunigungen auf; der Fahrwiderstand ist derselbe; hieraus folgt

$$\left(\frac{1 + \frac{G_1}{G}}{\frac{g}{1000 \gamma}} \right) 1000 \gamma_1 + h_1 = \left(\frac{1 + \frac{G_1}{G}}{\frac{g}{1000 \gamma_2}} \right) 1000 \gamma_2 + h_2,$$

daher

$$\frac{G_1}{G} = \frac{g}{1000 \gamma_2 - \gamma_1} \frac{h_1 - h_2}{\gamma_2 - \gamma_1} - 1.$$

Bei Versuchen auf verschiedenen Neigungen und gleichen Geschwindigkeiten hängt γ nur von h ab. Trägt man daher nach Sanzin die auf verschiedenen Neigungen erlangten γ für dieselbe Fahrgeschwindigkeit auf, so liegen alle Werte von γ auf einer Geraden. Durch Kenntnis dieser Tatsache läßt sich die Genauigkeit der Versuche überprüfen. Wo die Geraden die Nulllinie schneiden, wird $w = h$ und $\gamma = 0$. Damit erscheint eine sehr einfache zeichnerische Ermittlung des Zugwiderstandes gegeben.

Die dynamometrische Messung gibt die gesamten Zugkräfte, die zur Fortbewegung des angehängten Zuggewichtes nötig sind. Zu beachten ist, daß die Ablesungen im Beharrungszustand erfolgen.

9. Erfahrungszahlen und Formeln für die Fahrwiderstände. Die Erfahrungszahlen bzw. Formeln für den Reibungs- und Windwiderstand sind die folgenden:

Industriebahnen	8 bis 10 kg/t (höhere Werte unter Tag)
Straßenbahnen-Motorwagen	5 „ 12 „ (Rillenschienen)
Anhängewagen	3 „ 8 „ (größere Werte bei größeren Radständen)
Zahnradlokomotiven	12 „ 18 „

Für Vollbahnen gibt es eine sehr große Anzahl Formeln, mit welchen versucht wird die Reibungswiderstände zuzüglich des Winddruckes zu erfassen.

Die Mannigfaltigkeit der von verschiedenen Autoren angegebenen Formeln beweist, daß die Veränderlichkeit dieser Widerstände sehr groß ist; es wäre daher verfehlt, die elektrische Ausrüstung in denjenigen Fällen, wo die Rollwiderstände die Leistung bestimmen, ohne reichliche Reserve zu veranschlagen. Im allgemeinen spielen diese Widerstandswerte keine ausschlaggebende Rolle: bei Flachbahnen erfordert das Anfahren reichlichen Zugkraftüberschuß, bei Gebirgsbahnen sind sie vergleichsweise klein.

Die Formeln von Sanzin lauten (Abb. 139):

$$\text{Güterzüge } w = 1,8 + 0,001 v^2$$

$$\text{Personenzüge } w = 1,6 + 0,0184 v + 0,00046 v^2 \text{ (zweiachsige Wagen)}$$

$$\text{Schnellzüge } w = 1,6 + 0,00456 v + 0,000456 v^2 \text{ (vierachsige Wagen).}$$

$$\text{Lokomotiven } w = \frac{L(1,8 + 0,015 v) + R \left(a + b \frac{v}{D} \right) + 0,006 F v^2}{G}$$

w kg/t Widerstand von Lokomotive und Tender

L das auf den Laufachsen und Tender entfallende Gewicht in t

R Triebgewicht in t

G Gesamtgewicht ($R + L$)

V Geschwindigkeit in km/h

D m Durchmesser der Kuppelräder

F Stirnfläche qm

	a	b
B	5,5	0,08
C	7,0	0,10
D	8,0	0,28
E	8,8	0,36.

für die Achsfolgen

In Abb. 140 sind die für eine Anzahl elektrische und Dampflokomotiven durch Versuchsfahrten ermittelten Kurven des Rollwiderstandes in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt.

Im Tunnel ist der Zugwiderstand erheblich größer. Bei den Untergrundbahnen in New York sind die in der untenstehenden Zusammenstellung angegebenen Werte gemessen worden.

Geschwindigkeit km/h	12,8	16,0	19,2	28,8	35,2	44,8	51,2	57,6	60,8
Widerstand kg/t	3,63	3,73	3,61	4,46	4,89	5,61	6,11	6,60	6,88

10. Schlußfolgerung für den Lokomotivbau. Die vorstehenden Formeln lassen die Tatsache erkennen, daß der Eigenwiderstand der Dampflokomotiven mit der Zahl der gekuppelten Achsen nennenswert wächst. Bei Dampfbetrieb mußte man sich hiermit abfinden, weil eine etwa der halben Achsenzahl entsprechende Unterteilung der Dampfmaschine in zwei oder mehrere Teile kaum in Betracht kommt oder zu sehr umständlichen Bauarten (Mallet) führt.

Seefehlner, Elektr. Zugförderung.

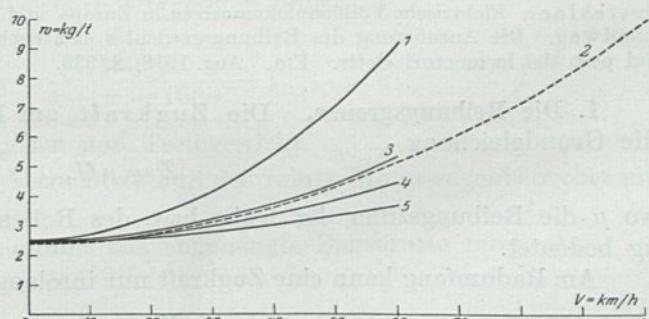


Abb. 139. Rollwiderstände von Zügen.

1. Güterzüge, offene Wagen, leer . . . $w = 2,5 + 0,00189 v^2$
2. Personenzüge und Schnellzüge . . . $w = 2,4 + 0,00077 v^2$
3. Güterzüge, für ganze Netze . . . $w = 2,5 + 0,0008 v^2$
4. Güterzüge, gedeckte Wagen, leer . . . $w = 2,5 + 0,00055 v^2$
5. Güterzüge, Wagen, beladen . . . $w = 2,5 + 0,00033 v^2$

Beim elektrischen Betrieb spricht nichts gegen eine angemessene Unterteilung der Triebkraft auf mehrere Motoren; es liegt kein Grund vor, die schwierige Mechanik eines Triebwerkes mit mehr als drei bis vier Achsen in den Kauf zu nehmen, wenn 4, 5 oder 6 Triebachsen nötig sind. Obige Formeln führen zur Wahl von Gliedermaschinen, die zwecks guter Verwendbarkeit für den Schiebedienst, der stets große Druckkräfte verlangt, kurz zu kuppeln sind.

Im übrigen haben Versuche mit den elektrischen Lötschberg-Lokomotiven wesentlich geringere Widerstandswerte ergeben, als für Dampflokomotiven derselben Achsanordnung ermittelt wurden. Der Unterschied zwischen dem Schema $1-E-1$ und $C+C$ ist kein nennenswerter.

Durch die Gliederung der Lokomotive verbessern sich die Reibungsverhältnisse, indem die unveränderliche Belastung der einzelnen Achsen auch bei unebenem oder nicht gleich tragfähigem Oberbau voll gewahrt bleibt.

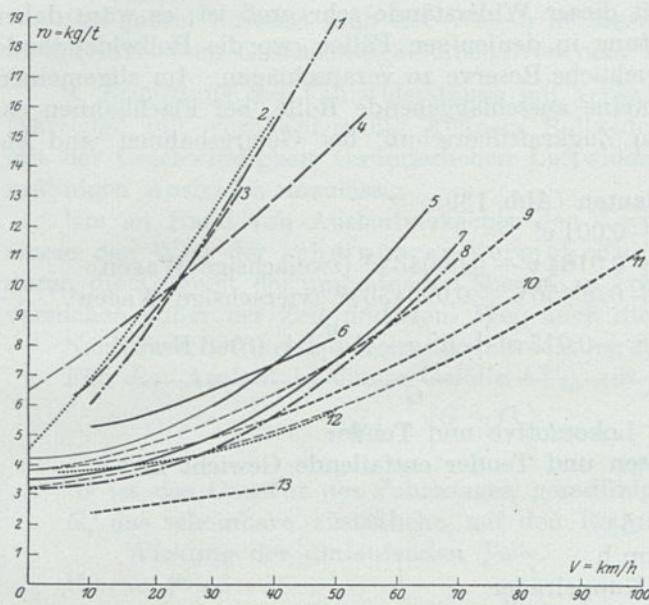


Abb. 140. Rollwiderstände von Lokomotiven.

1. Reihe 180, Ö.B.B., Df., Achsfolge E.
2. Mittenwaldbahn, Achsfolge 1-C.
3. Reihe 35 d, Ö.B.B., Df., Achsfolge D.
4. Reihe 170, Ö.B.B., Df., Achsfolge 1-D.
5. Reihe 32 f, Ö.B.B., Df., Achsfolge 2-C.
6. Reihe 32 c, Ö.B.B., Df., Achsfolge C.
7. Lötschbergbahn, Achsfolge C+C.
8. Lötschbergbahn, Achsfolge 1-E-1.
9. Reihe 106, Ö.B.B., Df., Achsfolge 2-B.
10. Reihe 17c, Ö.B.B., Df., Achsfolge 2-B.
11. Reihe 108, Ö.B.B., Df., Achsfolge 2-B-1.
12. Französ. Südbahn, Achsfolge 1-8×A-1.
13. Reihe 106, Ö.B.B., Df., Achsfolge 2-B (ohne Widerstand der Lokomotivmaschine). — (Df = Dampflokomotive.)

II. Die Zugkraft am Radumfang.

Literatur:

- Brecht. Die Ausnutzung des Reibungsgewichtes bei Eisenbahnfahrzeugen. E.K.B. 1914. H. 15.
 Kummer. Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung. Verl. Julius Springer, Berlin, 1915.
 Ossana. Über das Adhäsionsgewicht von Wechselstromlokomotiven. E.K.B. 1906. H. 13.
 Seefehlner. Das Gewicht der elektrischen Vollbahnllokomotiven. E. u. M. 1915. H. 1.
 Seefehlner. Elektrische Vollbahnllokomotiven in Europa und Amerika. E.K.B. 1915. H. 23 u. 31.
 Zuidweg. Die Ausnutzung des Reibungsgewichtes elektrischer Lokomotiven. E.T.Z. 1920. H. 22.
 Sul peso dei locomotori elettr. Eta. Aug. 1918, S. 333.

1. Die Reibungsgrenze. Die Zugkraft am Radumfang ist gegeben durch die Grundgleichung

$$Z = \mu G,$$

wo μ die Reibungsziffer der Ruhe bzw. des Rollens ist und G den Achsdruck in kg bedeutet.

Am Radumfang kann eine Zugkraft nur insolange übertragen werden, als

$$Z \leq \mu G.$$

Wird

$$Z \geq \mu G,$$

sei es, weil Z angewachsen ist oder μ sich vermindert hat oder der Achsdruck zu klein ist, hört der Reibungsschlüss auf und tritt Rädergleiten (Schleudern) ein.

Für μ sind bei elektrischen Bahnen unter günstigen Verhältnissen Werte bis zu $1/4$ und darüber bis $1/3$ gemessen worden. Zwischen der am Radumfang ausübaren Zugkraft eines in der Bahnneigung α befindlichen Fahrzeuges von Gt Gewicht, wenn alle Achsen angetrieben sind, und der zur Fortbewegung des Fahrzeuges aufzuwendenden Zugkraft besteht die Beziehung:

$$1000 G \cos \alpha \mu = G 1000 \sin \alpha + G \cos \alpha w + G 100 \gamma,$$

so gilt für

$$\gamma = 0, \quad 1000 \mu = h + w$$

und folgt, daß theoretisch mit reiner Reibung Steigungen bis etwa 240% bewältigt werden können, wenn $w = 10 \text{ kg/t}$ gesetzt wird. (Durch eine Versuchsfahrt auf der Zahnradbahn Triest-Opcina erprobt). Tatsächlich bildet im praktischen Betriebe die Steigung von etwa 120% die Reibungsgrenze und selbst bei dieser Steigung müssen zur Sicherung der Talfahrt besondere Maßregeln getroffen werden, insbesondere wenn es sich um andauernde Steigungen handelt. (Gmunden 90% Fallbremse, Pöstlingberg 105% , Zangenbremse mit Keilkopfschiene, Triest-Opcina 80% Bremszahnstange, Mendel-Dermullo, Iglau, Schienenbremse.)

Im allgemeinen wird nur ein Teil der Zugslast auf den angetriebenen Achsen ruhen, d. h. man hat zwischen Triebgewicht (Reibungsgewicht) und der angehängten Zugslast, dem Zugsbrutto zu unterscheiden.

Die bei Vollbahnen benötigten Leistungen benötigen ein Baugewicht, das größer ist als das zur Ausübung der verlangten Zugkraft erforderliche Reibungsgewicht, die Zugmaschine wird Laufachsen erhalten müssen. Das auf diesen ruhende Gewicht (L) ist in das angehängte Gewicht einzubeziehen.

Die Zugkraft am Radumfang ist gleich der gesamten zur Fortbewegung (Beschleunigung) des Zuges erforderlichen Zugkraft

$$R 1000 \mu = (R + L + G)(s + w + \gamma 100),$$

wenn man für das Treib-, Lauf- und Anhängegewicht dieselben Widerstandswerte einsetzt (was für die gegenständliche Betrachtung ohne die Größenordnung des Ergebnisses zu beeinflussen, zulässig ist).

Für

$$L = 0, \quad \frac{G}{R} = n$$

wird

$$1000 \mu = (1 + n)(s + w + 100 \gamma)$$

und

$$n = \frac{1000 \mu}{s + w + 100 \gamma} - 1$$

das Verhältnis zwischen Anhängelast und Treibgewicht.

Für $n = 0$ tritt der früher betrachtete Fall des reinen Motorwagenbetriebes mit lauter angetriebenen Achsen ein.

Mit zunehmender Steigung nimmt das angehängte Zugsbrutto rasch ab,
z. B. für

$$\mu = \frac{1}{10}, \quad \gamma = 0, \quad w = 5\%, \quad s = 45\%,$$

wird $n = 1$, d. h. das Brutto ist gleich dem Treibgewicht.

Tatsächlich erweist sich diese Steigung als die wirtschaftliche Grenze für Lokalbahnen.

Die meist nicht überschrittene Höchststeigung bei Vollbahnen beträgt 25% , setzt man für $\mu = \frac{1}{7}$, wird

$$n = \frac{143}{25+5+5} - 1 = 3,1;$$

für 30% vermindert sich

$$n = \frac{143}{30+5+5} - 1 = 2,6.$$

Die das Zugsgewicht herabsetzende Wirkung der Steigung kann durch Veränderung der Beschleunigung ausgeglichen werden. Andererseits hängt die Größe des angehängten Zugsbrutto unmittelbar von der Reibungsziffer ab. Diese läßt sich vorübergehend durch künstliche Mittel, durch Sandstreuen steigern. Im allgemeinen dürfen gewisse Erfahrungswerte nicht überschritten werden, wenn man mit einem geordneten Betrieb rechnen will. Es ist auch zu beachten, daß μ mit der Geschwindigkeit abnimmt, so daß man für das Anfahren mit $\mu = 1:5$, d. s. 200 kg/t und für die Fahrt mit hoher Geschwindigkeit (über 50 bis 60 km/h) mit etwa $\mu = 1:7,5$, d. s. 133 kg/t zu rechnen hat. Praktisch ist dies für den Betrieb ohne Nachteil, da bei den höheren Geschwindigkeiten stets kleine Zugkräfte benötigt werden.

Die österreichischen Eisenbahnen rechnen bei Zwillingsmaschinen auf Gebirgsbahnstrecken mit 160 kg Zugkraft je Tonne Achsdruck, d. h. $\mu = 1:6,25$; da sich dieser Wert auf die mittlere Tangentialkraft bezieht und der Höchstwert etwa 20% größer ist, gilt als wirkliche Reibungsziffer $\mu = 1:5,2$.

In ebener Bahn geht man bei Dampfbetrieb bis auf 190 kg .

Für Straßenbahnen bzw. Motorwagenbetrieb bestehen bezüglich der zulässigen Ausnutzung des Reibungsgewichtes keine festen Regeln.

Offensichtlich soll man mit Zunahme der Steigung mit abnehmender Reibungsziffer rechnen, um in unvorhergesehenen ungünstigen Fällen den Zug halten zu können. Andererseits wird man, um mit einer bestimmten Motorausstattung noch fahren zu können, die Beschleunigung mit Zunahme der Steigung verringern.

Diese Gesichtspunkte vor Augen haltend, wird man in der Steigung von etwa 100% alle Achsen antreiben und in dieser Steigung die Zugkraft am Radumfang mit etwa 105 kg je t in Anspruch nehmen, d. i. $\mu = 1:9,55$ und $z = 200 \text{ kg}$ je t in der Ebene. Zur Berechnung der zweckmäßigen Anhängelast in Abhängigkeit von der Steigung schätzt man Zwischenwerte geradlinig, so daß allgemein

$$\frac{1}{\mu} = 0,0455 s + 5 \quad (w = 5)$$

und

$$\gamma = 0,5 - 0,005 s$$

wird (Abb. 141).

2. Die Form des Radreifens. Außer den bereits genannten Umständen ist die am Radumfang übertragbare Kraft besonders von der Radreifenform bzw. davon abhängig, wie Radreifen und Schienenkopf zusammen arbeiten. Die Reibungsziffer der Ruhe, die praktisch auch für das ideale Rollen gilt, ist bekanntlich wesentlich größer als diejenige der gleitenden Bewegung. Andererseits bewirken große Flächendrücke auch eine Herabsetzung, weil durch diese glasharte Oberflächen entstehen. Man sollte meinen, daß bei dieser klaren Sachlage Bauformen für Radreifen und Schiene gebräuchlich sind, die diese Bedingungen restlos erfüllen. Dem ist nicht so. Es ist üblich, bzw. für Vollbahnen Vorschrift, die Radreifen mit einer Konizität von $1:20$, bis $1:16$, herzustellen, und zwar deshalb, damit in Krümmungen

entsprechend der größeren Bogenlänge des äußeren Schienenstranges das äußere Rad sich mit einem entsprechend größeren Halbmesser abwälzt. Um eine ungünstige Schienenbeanspruchung durch die konischen Reifen zu vermeiden, werden die Schienen entsprechend geschränkt verlegt.

Diese Gepflogenheit, die durch die schiefe Schienenlage dem Fahrzeug eine gewisse Stabilität verleihen will, beruht auf einem Trugschluß. Zunächst kann das angestrebte Ziel der richtigen Abwälzung nur für einen bestimmten Krümmungsradius erzielt werden, außer man sorgt in Spurerweiterungen sehr genau für die richtige Einstellung; dafür verschlechtert man grundsätzlich auch die Fahrt in geraden Strecken, die doch überwiegen. Denn einmal laufen die Räder infolge unvermeidlicher Unregelmäßigkeiten auf der einen oder anderen Schiene an, dann entsteht die volle durch die Konizität bedingte Geschwindigkeitsdifferenz, indem das eine Rad mit dem größten Durchmesser, das andere mit dem kleinsten läuft. Andererseits hat zufolge der konischen Form nur ein Querschnitt die der Fahrgeschwindigkeit genau entsprechende Abwälzgeschwindigkeit; alle Flächenelemente mit

$$R' \leq R = \frac{v \cdot 60}{2 \pi n}$$

müssen gleiten. Dieser Umstand vergrößert den Flächendruck, andererseits kommt die Reibungsziffer der Bewegung zur Geltung. Zylindrische Reifen laufen dagegen in jeder Lage richtig.

Diese Frage war deshalb eingehender zu behandeln, weil man bei elektrischen Bahnen, trotzdem die Schienen lotrecht verlegt werden und überwiegend Rillenschienen mit wagerechtem Kopf zur Verlegung gelangen, die konischen Radreifen gedankenlos übernommen, sogar die Verhältnisse insofern noch verschlechtert hat, als vielfach eine Konizität von 1:16 verwendet wird. Nachdem elektrische Bahnen oft die Aufgabe haben, große Steigungen zu überwinden oder, was auf das gleiche herauskommt, große Anfahrbeschleunigungen oder Verzögerungen — tunlichst ohne den Sandstreuer in Anspruch zu nehmen — zu erzielen, ist es für die sichere Wirkung von Belang, aus der Reibung alles herauszuholen, was nur möglich ist. Die Mittel hierzu sind zylindrische Radreifen und breite, flache Schienenköpfe. Beides sind Eigenschaften, die in keiner Richtung Nachteile verursachen. Der regelrechte Betrieb der Reibungsstrecken mit 80% Steigung der Bahn Triest-Opcina wurde erst mit zylindrischen Radreifen möglich.

Der neue Radreifenentwurf des Verbandes Deutscher Klein- und Lokalbahnen nähert sich sehr den hier vertretenen Anschauungen, indem die Konizität der Lauffläche nur mehr mit 1:40 vorgeschlagen wird.

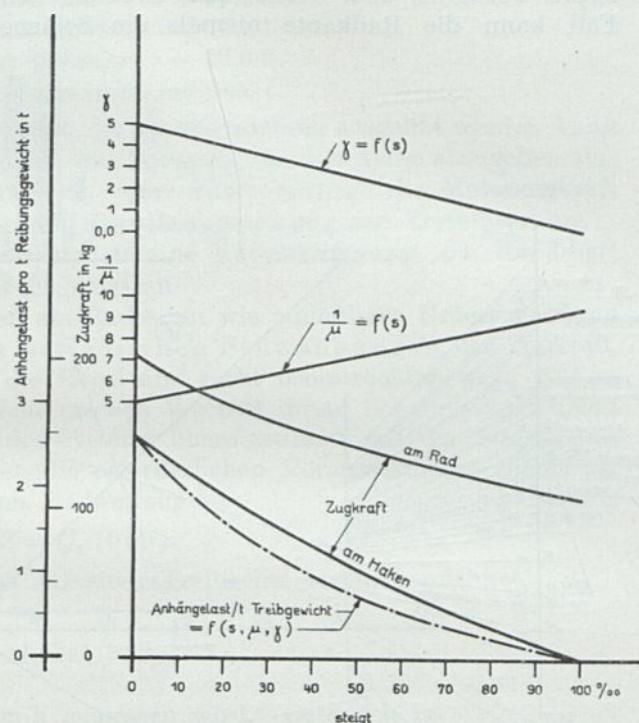
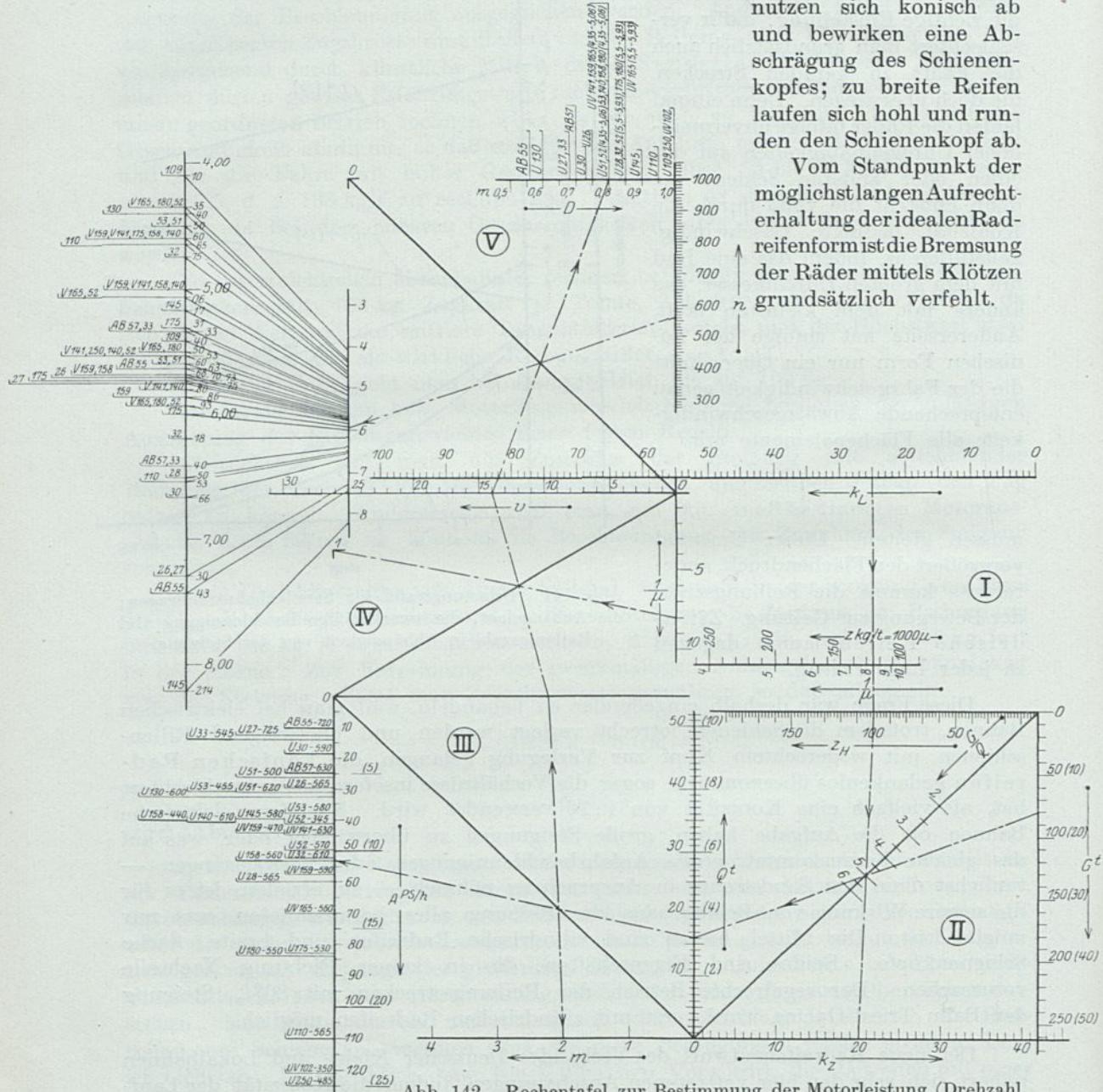


Abb. 141. Belastungstafel für Straßenbahntriebwagen; die Anhängelast, die zweckmäßige Beschleunigung und Reibungszahl in Abhängigkeit von der Steigung.

Sinngemäß sind konstruktive Vorkehrungen beim Entwurf und Ausführung des Oberbaus und der denselben bestimmten Radsätzen zu treffen, daß der ursprünglich vorhandene Idealzustand der Paarung von Rad und Schiene auch möglichst erhalten bleibe. Diesbezüglich ist insbesondere wichtig die Breite des Schienenkopfes mit derjenigen der Lauffläche des Radreifens in Einklang zu bringen. Die Wahrscheinlichkeit einer gleichmäßigen Abnutzung von Rad und Schiene ist offensichtlich dann zu erwarten, wenn die Breite der Lauffläche des Radreifens mit der Breite des Schienenkopfes zuzüglich dem freien Spiel zwischen den Spurkränzen gleich ist. In diesem Fall kann die Radkante niemals am Schienenkopf laufen. Zu schmale Reifen

nutzen sich konisch ab und bewirken eine Abschrägung des Schienenkopfes; zu breite Reifen laufen sich hohl und runden den Schienenkopf ab.

Vom Standpunkt der möglichst langen Aufrechterhaltung der idealen Radreifenform ist die Bremsung der Räder mittels Klötzen grundsätzlich verfehlt.



3. Der Achsdruck. Der andere Faktor der Zugkraft am Radumfang, die Rad- bzw. die Achsbelastung, wird bestimmt durch die Tragfähigkeit des Oberbaues.

Industriebahnen sind im allgemeinen durch geringe Achsdrücke 1 bis 4 t gekennzeichnet.

Bei Straßenbahnen mit Rillenschienenoberbau geht man nicht über 10 t; für Lokalbahnen mit Schmalspur sind 6 bis 8 t, mit Normalspur bis 11 t gebräuchlich.

Für Vollbahnen sind die Regel:

in Österreich	14,5 t
„ Deutschland	16,0 t
„ der Schweiz	19,0 t
„ Nordamerika	bis 30,0 t.

Der Achsdruck begrenzt die Zugkraft, die am Radumfang ausgeübt werden kann und nach Maßgabe der Geschwindigkeit die Leistung, die eine Achse abzugeben imstande ist. Das Reibungsgewicht und, wenn dieses festliegt, die Motorzugkraft ist ein wirksames Mittel zur Begrenzung der Beanspruchung der Triebmaschine.

Rad und Schiene bilden gewissermaßen eine Rutschkupplung, die die Überschreitung bestimmter Zugkräfte nicht zulassen.

Festzustellen ist, daß die Zugkraft am Radreifen, wie einläßliche Untersuchungen und Erprobungen beweisen, von den periodischen Schwankungen der Zugkraft, wie sie bei Einphasenwechselstrom die Regel sind, nicht beeinträchtigt wird. Die zu beschleunigenden Massen können dem raschen Wechsel dieser Schwingungen nicht folgen, außer die Schwingungszahl des Systems übereinstimmt mit der Periodizität der Zugkraft; im allgemeinen treffen die erforderlichen Voraussetzungen nicht zu.

Die Zugkraft je Achse Z kg am Radumfang ist

$$Z = Q_1 1000 \mu$$

wenn $Q_1 t$ das Reibungsgewicht, das auf einer Treibachse lastet, bezeichnet.

Die Leistung in PS je Achse ist

$$A_1 = \frac{Z_1 v}{75 \cdot 3,6},$$

wenn die Geschwindigkeit in (v) km/h gemessen wird. Demnach ist

$$A_1 = \frac{Q_1 1000 v \mu}{270}.$$

Hieraus folgt, daß das Baugewicht einer Lokomotive, deren sämtliche Achsen angetrieben sind, auch begrenzt und durch die Beziehung bestimmt ist:

$$q = \frac{Q_1 1000}{A} = \frac{270}{\mu v}.$$

Das gesamte Triebgewicht der Lokomotive bzw. des Fahrzeuges, wenn m die Achszahl bedeutet, ist

$$Q = m Q_1$$

und ebenso die Gesamtleistung

$$L = m A,$$

q kg/PS ist das spezifische Baugewicht der Lokomotive für die Pferdestärke.

Untersucht man ausgeführte Lokomotiven, kann festgestellt werden, daß mit Ausnahme der langsam laufenden Typen die zulässigen Baugewichte nur bei niedrigen Geschwindigkeiten eingehalten werden können, d. h. entweder man vermehrt die Zahl der Triebachsen, um das nötige Gewicht zu unterbringen oder man führt — was richtiger ist — Laufachsen ein, wie z. B. dies für Schnellzugsmaschinen typisch ist.

4. Rechentafeln für die Gewichtsbestimmung. Die hier abgeleiteten Beziehungen können in einer Rechentafel (Abb. 142) zusammengefaßt werden, so daß

die gegenseitige Beeinflussung der in Betracht kommenden Größen leicht übersehen werden kann.

Die Treibachsanzahl m eines Fahrzeuges mit Q Gesamtlast auf den Treibachsen sei zu bestimmen, wenn das mit v km/h Geschwindigkeit zu befördernde Anhangsgewicht (Bruttolast) von G t gegeben ist. Die Steigung (Gefälle) sei $s\%$, die Rollwiderstände für die Treibachslast w_L , für die angehängte Last w_z , die Bahnwiderstände k_L bzw. k_z , wo $k_L = w_L + s + 100\gamma$ und $k_z = w_z + s + 100\gamma$. Die Reibungszahl μ sei den Verhältnissen entsprechend zu wählen.

Jede Bahnverwaltung pflegt eine Reihe Raddurchmesser D als Regelbauarten zu verwenden, weiter stehen bestimmte Motortypen der Regelbauart zur Verfügung, die die Anwendung gewisser kleinsten Raddurchmesser D , Drehzahlen n je min. und Übersetzungen \dot{u} voraussetzen.

Es bestehen folgende Beziehungen, die in die jeweils zur nomographischen Darstellung geeignete Form überführt werden sollen.

Aus $Q \cdot 1000 \mu = Q k_L + G k_z$
folgt, daß

$$\frac{G}{Q} = \frac{1000 \mu - k_L}{k_z} = \frac{z_H}{k_z} = n,$$

wo der Ausdruck im Zähler die Zugkraft am Haken je Tonne Reibungsgewicht bedeutet.

n ist das Verhältnis von angehängtem Zugsbrutto zum Treibgewicht. Hat das Triebfahrzeug auch Laufachsen, ist das auf diesen lastende Gewicht der Anhängelast zuzurechnen.

Zunächst ist der Ausdruck d. i. die Zugkraft am Haken für die Tonne Reibungsgewicht

$$z_H = 1000 \mu - k_L$$

in einem Summennomogramm darzustellen (Abb. 142). Die Mittelskala trägt die Werte 1000μ und zweckmäßigerweise auch $1:\mu$.

Dem kollinearen System, der Rechentafel I, ist als interessierender Sonderfall derjenige Zugwiderstand zu entnehmen, für welchen das angehängte Zugsbrutto Null wird, d. h. alle Achsen angetrieben sein müssen. Anders ausgedrückt sagt obige Gleichung, daß die Zugkraft am Haken Null wird, weswegen nichts mehr angehängt werden kann.

z_H kann nur dann verschwinden, wenn

$$z_H = 1000 \mu - k_L = 0$$

wird, d. h. die Zugkraft am Haken für die Tonne Reibungsgewicht wird Null.

Jeder Index vom Punkte

$$z_H = 0$$

über verschiedene Werte von

$$1:\mu \text{ bzw. } 1000 \mu$$

gezogen, weist den betr. Grenzwert von k_L , wo zu erinnern ist, daß

$$k_L = w_L + s + 100\gamma$$

ist.

Es ist somit gleichgültig, welcher der drei Anteile des Fahrwiderstandes überwiegt ist.

Im Bergbahnbetrieb wird w_L und 100γ gegenüber s an Bedeutung zurücktreten. Im Stadtbahnbetrieb wird 100γ überwiegen, in Straßenbahnbetrieben 100γ und s etwa in gleichem Maße zu berücksichtigen sein.

In allen Fällen wird die Regellast selbst noch bei $\mu = \frac{1}{10}$ zu führen sein.

Das Verhältnis der Zugkraft für die Tonne des angehängten Zuggewichtes (d. i. der gesamte Zugwiderstand/t k_z) zur Zugkraft (z_H) am Haken für die Tonne Reibungsgewicht ist gleich dem Verhältnis von Zugsbrutto zum Reibungsgewicht. Für gegebene Verhältnisse einer Bahnstrecke ist dies eine feste, im vorliegenden Fall auf der Diagonalskala des Teilnomogrammes II dargestellte Zahl. Jeder Index, durch einen bestimmten Punkt der Diagonalskala gezogen, gibt das zu einem gegebenen Zugsgewicht gehörige Reibungsgewicht.

Rechentafel II ist als Doppel-Z-Tafel mit gemeinsamer Achse für z_H an I anzugliedern, entsprechend der zur nomographischen Darstellung geeigneten Gleichung $Q:G=k_z:z_H=1:n$ mit der Hilfsgröße $n=G:Q$ auf der Diagonalen.

Die Leistung des Triebfahrzeuges kann ausgedrückt werden durch die Anzahl der vorhandenen Triebachsen bzw. Motoren, indem für diesen Fall der Einzelantrieb aller Achsen bzw. die auf eine Achse entfallende Leistung ins Auge gefaßt werden soll. Ist A die Leistung (PS) eines Motors, m die Achszahl, L die gesamte Leistung, wird

$$L = mA.$$

Andererseits gilt

$$L = \frac{1000 Q \mu v}{270},$$

wo Q das gesamte Reibungsgewicht in t und v die Geschwindigkeit in km/h bedeutet. Es sei zur nomographischen Darstellung $\mu v = \lambda$ substituiert, dann wird

$$\frac{A}{1000 Q} = \frac{\lambda}{270 m},$$

und in dieser Form in der Doppel-Z-Rechentafel III dargestellt.

Die Hilfsgröße $\lambda = \mu v$ ist ein Maß für das spezifische Gewicht der Lokomotiven, indem $q = 270 : \mu v$.

Die Skala für λ kann somit mit einer Teilung für q und für die zugehörigen in der Praxis erzielten spezifischen Gewichte versehen werden.

A stuft man zweckmäßigerweise nicht nur mit den Leistungsangaben ab, sondern schreibt die Regelbauarten der für die betreffende Leistung in Betracht kommenden Motoren mit ihren Drehzahlen an.

Im Nomogramm IV wird das Produkt

$$\lambda = \mu v = \frac{270}{q}$$

gelöst.

Nomogramm V dient als Behelf, um aus den geometrischen Verhältnissen des Motors den entsprechenden Raddurchmesser D und die verwendbare Übersetzung zu bestimmen, indem

$$v = \frac{D \pi n \cdot 3,6}{60 \cdot \ddot{u}} \text{ km/h},$$

hieraus

$$\frac{v}{D \pi} = \frac{n \cdot 3,6}{60 \cdot \ddot{u}}.$$

Es ist klar, daß die hier zur Erläuterung des Gegenstandes gewählte Reihenfolge in der Behandlung des Problems nach Bedarf geändert werden kann, je nachdem, welche Größen als gegebene Festwerte anzusehen sind, mit deren Hilfe die gestellte Aufgabe zu lösen ist.

Dieser Rechentafel ist der wichtige Begriff der Leistung einer Triebachse zu entnehmen, wenn im Teilnomogramm III der Suchstrahl zu

$$m = 1$$

gezogen wird. Die Leistung, die eine Achse abgeben kann, ist proportional dem Achsdruck R ,
der Reibungsziffer μ ,
und der Geschwindigkeit v .

μ ist durch die allgemeinen Anlageverhältnisse gegeben, v liegt je nach der festgestellten Aufgabe fest, so daß zur Steigerung der Leistung einer Achse als einziges Mittel die Erhöhung des Achsdruckes verbleibt.

Umgekehrt, wenn auch R gegeben ist, kann die Steigerung der Leistung nur durch Vermehrung der Achsen erzielt werden.

Der Zusammenhang zwischen Achsdruck, Leistung (je Achse oder der ganzen Lokomotive), Geschwindigkeit und Reibungszahl läßt sich in einem Doppelnomogramm (Abb. 143) übersichtlich darstellen, da

$$L q = 1000 Q \text{ und } A q = 1000 G, \text{ wo } q = \frac{270}{v \mu}.$$

Z. B. wird für

$$\mu = \frac{1}{6,5} \quad v = 50 \text{ km/h}$$

das zulässige Baugewicht, wenn alle Achsen angetrieben sind, 35 kg/PS und können mit einer Achse 450 PS geleistet werden, wenn 18 t Achsdruck zulässig sind. Beträgt $q = 80$ kg/PS, kann eine Achse nur mehr 200 PS abgeben, wobei die Geschwindigkeit auf etwa 23 km/h fällt.

5. Das Gewicht ausgeführter Lokomotiven. Die Aufgabe des Entwurfs einer Lokomotive ist vielfach so gestellt, daß auf Grund der Erfahrungswerte der Zugförderung das notwendige Achsschema vorgeschrieben wird.

Mit Hilfe der erzielten spezifischen Baugewichte der Lokomotiven ist damit auch die Leistung — Stunden- und Dauerleistung — angenähert gegeben, die auf der Lokomotive untergebracht werden kann. Mit Hilfe der angegebenen Rechentafel kann unter Benützung zunächst vorhandener Regelbauarten für die Triebmotoren der Raddurchmesser, die Übersetzung und die Fahrgeschwindigkeit, welche der Ausnützung der Reibungszugkraft entspricht, ermittelt werden.

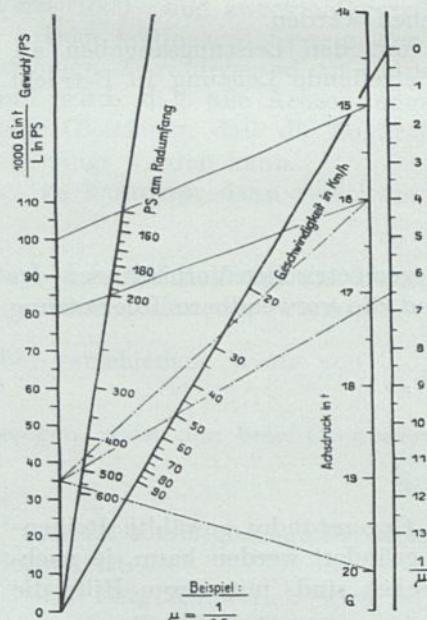
Das Gesamtgewicht einer Lokomotive wird durch ihre Leistung bestimmt:

$$1000 Q = q L,$$

wo q das von L abhängige spez. Gewicht kg/PS bedeutet. Q kann auch durch die Achszahl (m) und die Achslast (R^t) ausgedrückt werden, wobei für eine vorläufige Rechnung ein durchschnittlicher Wert des Achsdruckes für alle Achsen angesetzt wird, obzwar Laufachsen stets weniger belastet werden als Treibachsen.

$$Q = m R,$$

$q = f(L)$ ist eine empirische Funktion. Für ein gegebenes Lokomotivgewicht und für eine bestimmte Achszahl kann die Leistung, die untergebracht werden kann, erst durch Annäherung gefunden werden. Eine Rechentafel (Abb. 144) löst diese Aufgabe kurzer Hand.



Die Mittelwerte für ausgeführte Vollbahnlokomotiven sind in folgender Tabelle (Abb. 144) wiedergegeben:

Stundenleistung PS	Gewicht für die Pferdestärke kg
500	105
750	86
1000	76
1500	62
2000	49
3000	35

System und Art des Antriebes sind nicht von eindeutigem Einfluß auf das spez. Gewicht, doch sind bis Geschwindigkeiten von 40 bis 50 km/h Lokomotiven mit Zahnradmotoren im allgemeinen leichter als solche mit unmittelbarem Antrieb.

Außer dem spezifischen Gewicht der elektrischen Lokomotive als Ganzes ist auch von Interesse, den Anteil der Mechanik und der elektrischen Ausrüstung zu kennen.

Verhältnismäßig am leichtesten ist die elektrische Ausrüstung von Gleichstrom-Mittelspannungsmaschinen; diese beanspruchen etwa 38,5% vom Gesamtgewicht. Die elektrische Ausrüstung der neueren amerikanischen Gleichstromlokomotiven für 3000 Volt Gleichstrombetrieb, benötigt 40,5%.

Drehstrom- und Einphasenausrüstungen beanspruchen rund 47 bzw. 47,5% vom Gesamtgewicht.

Der Durchschnitt des Gewichtsanteils der elektrischen Ausrüstung am gesamten Gewicht beträgt 45,3% ohne Rücksicht auf das angewandte System.

6. Die Fahrlinien. Belastungstafeln. Die für die Beanspruchung der Triebmaschinen maßgebenden Größen sind auf Grund der vorgehenden Betrachtungen zu ermitteln; zur Auswertung derselben müssen diese in zusammenhängende Bewegungsbilder gefaßt werden. Zur Auslegung der Fahrlinien dienen:

- die Angabe des Zugsgewichtes,
- die der betreffenden Zugsart entsprechenden, von der Geschwindigkeit abhängigen Widerstandswerte,
- der Höhenplan der Strecke und schließlich
- die Kennlinien des zunächst vorläufig gewählten Motors.

Das wiederholt angewandte zeichnerische Verfahren zur Durchführung von Additionen und Multiplikationen führt auch hier rasch zum Ziel. Dieses Verfahren empfiehlt sich aus mehrfachen Gründen. Zunächst gewährt es eine gute Übersicht

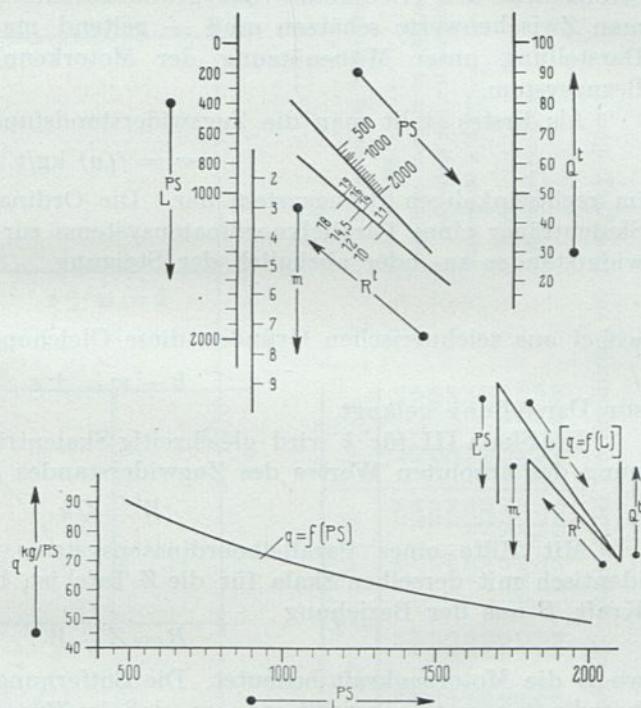


Abb. 144. Abhängigkeit des spez. Lokomotivgewichtes von der Leistung und Rechentafel zur Bestimmung des Lokomotivgewichtes aus der Leistung.

über den Zusammenhang aller Größen; es führt ohne Rechnung mit geringem Zeitaufwand zum Ziel. Dieses Verfahren unterscheidet sich insofern grundsätzlich von anderen von Pforr, Hruschka, Hochenegg, Kadrnozka und anderen entworfenen Verfahren, als bei diesen alle zeichnerischen Behelfe für jeden vorliegenden Fall neu aufgelegt werden müssen, wogegen die nomografischen Rechentafeln allgemeine Lösungen der gestellten Aufgaben darstellen, innerhalb welcher alle Einzelfälle, soweit sie ähnlicher Größenordnung sind und sich daher zeichnerisch mit dem gleichen Maßstab behandeln lassen, schon gelöst sind.

Ein zur Vervielfältigung geeignetes Original ist daher für eine unbeschränkte Anzahl von Entwürfen verwendbar (Abb. 145).

Nachdem sich bei dieser Aufgabe mit Rücksicht auf den mathematisch nicht bestimmbarer Zusammenhang von Zugkraft und Geschwindigkeit mit der zugehörigen Stromstärke des Triebmotors der grundsätzliche Mangel von Punktskalen — daß man Zwischenwerte schätzen muß — geltend machen könnte, empfiehlt sich eine Darstellung unter Mitbenützung der Motorkennlinien in einem rechtwinkeligen Bezugssystem.

Als Erstes stellt man die Zugwiderstandsfunktion

$$w_e = f(v) \text{ kg/t}$$

im rechtwinkeligen Bezugssystem dar. Die Ordinate macht man unter einem zum Skalenträger eines Parallelkoordinatensystems zur Auswertung des gesamten Fahrwiderstandes zu- oder abzüglich der Steigung

$$k = w \pm s$$

wobei aus zeichnerischen Gründen diese Gleichung in der Form

$$k - w = \pm s$$

zur Darstellung gelangt.

Die Skala III für k wird gleichzeitig Skalenträger in einer Z -Tafel zur Berechnung des absoluten Wertes des Zugwiderstandes

$$W = Qk.$$

Mit Hilfe eines Parallelkoordinatensystems, in welchem die Skala für W identisch mit derselben Skala für die Z -Tafel ist, bestimmt man die beschleunigende Kraft B aus der Beziehung

$$B = Z - W,$$

wo Z die Motorzugkraft bedeutet. Die Entfernung der drei Achsen dieses Parallelkoordinatensystems bemäßt man so, daß im Zwischenraum die Kennlinien des gewählten Motors $Z = f(v)$ und $Z = f(J)$ in einem rechtwinkeligen Bezugssystem gezeichnet werden können. Anfangspunkt der Z -Achse wird zweckmäßig mit dem Nullpunkt in der Mittelachse übereinstimmen. Man kann somit, ohne auf eine Zwischenschätzung angewiesen sein zu müssen, für zweckmäßige Geschwindigkeitswerte die zugehörige Zugkraft ablesen.

Diesem System wird eine Z -Tafel für die Beziehung der Beschleunigungskraft

$$B = m\gamma$$

mit einer Skala IX, in welcher Q kotiert wird, angeschlossen. In dieser Tafel interessiert die Skala für γ nur insofern, als die zulässigen Grenzwerte nicht überschritten werden dürfen. Diesbezüglich kommen in Betracht:

der höchstzulässige Motorstrom,

das Triebgewicht und

die vom Standpunkt der Fahrgäste zulässige Beschleunigung.

Die betr. Werte können in der Rechentafel in den betr. Skalen kenntlich gemacht werden und weisen darauf hin, daß sie nicht überschritten werden dürfen.

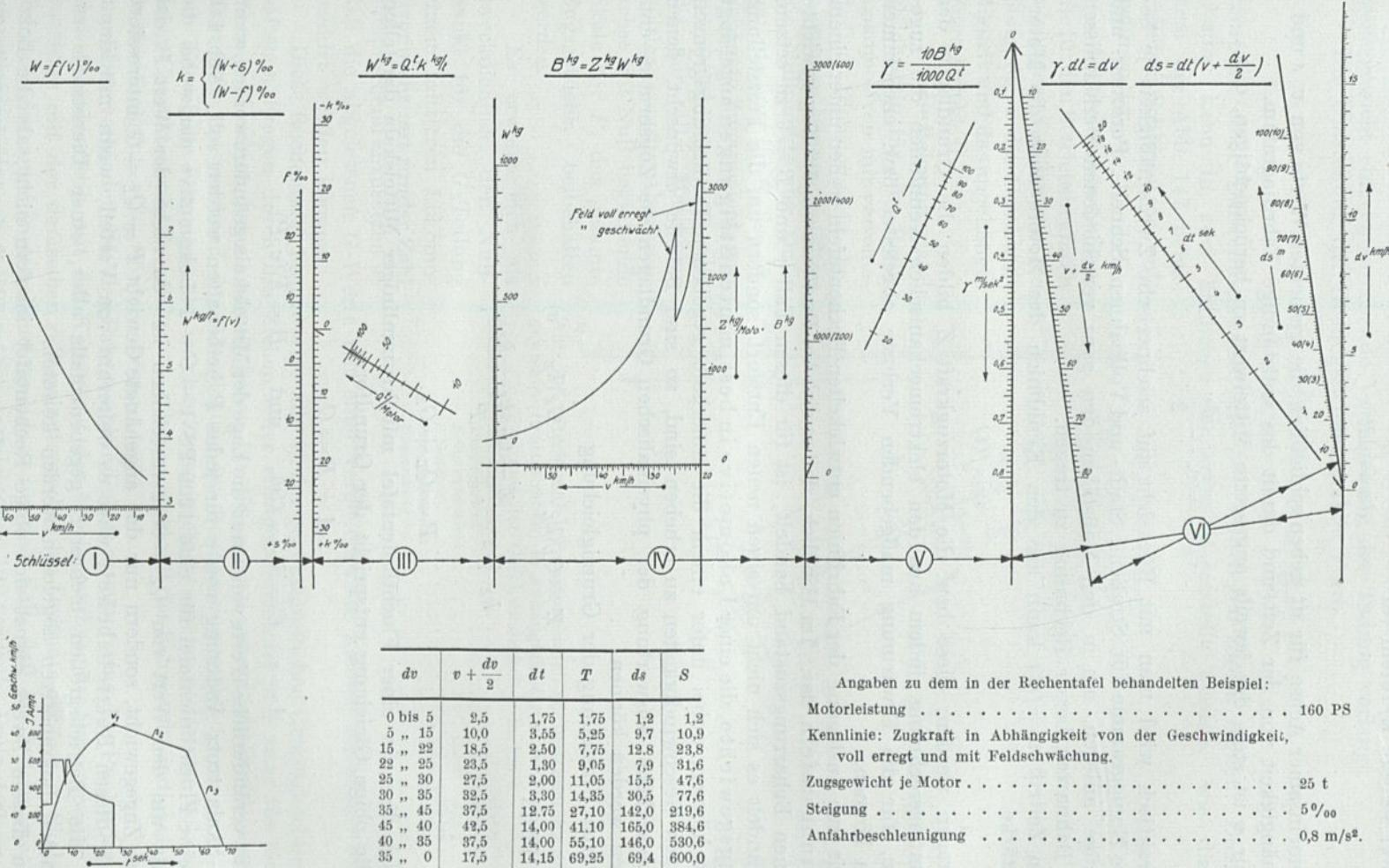


Abb. 145. Rechentafel zur Ermittlung von Bewegungsbildern.

Angaben zu dem in der Rechentafel behandelten Beispiel:

Motorleistung	160 PS
Kennlinie: Zugkraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, voll erregt und mit Feldschwächung.	
Zugsgewicht je Motor	25 t
Steigung	5 %
Anfahrbeschleunigung	0,8 m/s ²

Zwei weitere Z -Tafeln für

$$dv = \gamma dt$$

und

$$ds = vdt$$

mit gemeinsamer Achse für dt geben schließlich die gesuchten Werte von v , s und in Abhängigkeit von der Zeit und damit das vollständige Fahrdiagramm.

Für v ist stets der jeweils angesetzte Mittelwert zu berücksichtigen, d. h.

$$v_{n+1} = v_n + \frac{dv}{2}.$$

Praktisch wird man mit Rücksicht auf zeichnerische Zweckmäßigkeit je besondere Nomogramme für Straßen-, Stadt- und Vollbahnen (Schnell-, Personen- und Güterzüge) anlegen, um in den Maßstäben den ganz verschiedenen Verhältnissen dieser Bahnarten besser Rechnung zu tragen.

Im Zeitriß $v = f(t)$ kann aus den Kennlinien des Motors auch die Motorstromstärke

$$i = f(t)$$

aufgetragen werden; diese bzw. die Motorzugkraft Z bilden die Grundlagen der Erwärmungsrechnung, indem aus den elektromechanischen Kennlinien die zugehörigen, für die Erwärmung maßgebenden Verluste abgeleitet bzw. entnommen werden können.

Die zur Auslegung der Fahrlinien entwickelten Rechentafeln stellen unter einem Belastungstafeln dar. Im Hinblick, daß es sich bei Bestimmung der Zugsgewichte um einen Beharrungszustand handelt, ist für diesen Fall γ und $B = 0$ zu setzen.

Handelt es sich nicht um einen neuen Entwurf, sondern um die Feststellung der Zugsgewichte, die einer Lokomotive in bestimmten Steigungen angehängt werden können, wobei unter einem die innerhalb gegebenen Erwärmungsgrenzen zulässigen Geschwindigkeiten zu erheben sind, so sind Behelfe erwünscht, denen ohne neuerliche Auswertung der physikalischen Grundlagen die Zugsbruttos entnommen werden können.

Durch Umstellung der Grundgleichung

$$Z = Q_L(k_L + s) + G_Z(k_Z + s)$$

in die Form

$$k_Z + s = \frac{Z - Q_L(k_L - k_Z)}{P},$$

wo

$$P = Q_L + G_Z,$$

lässt sich diese in einer Fluchtlinientafel mit krummliniger Mittelskala darstellen.

Die obige Gleichung entspricht der Grundform

$$A + B = C,$$

wo

$$A = s, \quad C = k_Z = f(v), \quad \text{und} \quad B = F(v, P).$$

Für veränderliche Werte von v muß die Lage der Mittelskala geändert werden, wenn die B -Skala trotz Änderung von v für jedes P beibehalten werden soll. Abb. 146 stellt eine Fluchtlinientafel für eine 1200 PS 1—C—1-Lokomotive dar, wobei die B -Skala um den Wert von $Q_L = 68$ t verschoben ist, da nicht der Wert P das gesamte Zugsgewicht, sondern nur das angehängte Gewicht $P - Q_L = G$ interessiert.

Für diesen Betriebsbehelf wäre es weiterhin von Vorteil, wenn mit einem Index die Betriebsgrößen mehrerer, gegebenenfalls aller, einer Dienststelle zugeordneten Lokomotiven abgelesen werden könnten.

Zu diesem Zweck eignet sich obige Rechentafel insofern nicht, als die Lokomotivcharakteristiken sich in dieser Darstellungsweise überdecken, andererseits auf

der B -Achse höchstens zwei Skalen angebracht werden können, da jedes Lokomotivgewicht eine entsprechende Verschiebung der Teilung verlangt.

Die Umstellung der Grundgleichung in die Form

$$\frac{k_Z + s}{Z - Q_L(k_L - k_Z)} = \frac{a}{P} a$$

führt zu einer Darstellungsweise, die sich für diesen Zweck eignet. Diese Proportion kann in zwei ähnlichen Dreiecken dargestellt werden, wie dies aus dem der Abb. 147 beigegebenen Schlüssel zu entnehmen ist.

Angeschrieben sind nur die für den Betriebsbeamten wichtigen Größen, s die Steigung, v die Geschwindigkeit und das angehängte Zugsgewicht G .

Um die Belastungstafel gleichzeitig für eine Reihe Lokomotiven mit verschiedenen Dienstgewicht benutzen zu können, müßten die Nullpunkte der Ordinatenteilung für G , das angehängte Zugsgewicht, entsprechend verschoben oder die für alle Maschinen gültige, von der Abszissenachse mit Null beginnende Skala für P , das gesamte Zugsgewicht, beibehalten werden.

Es erweist sich als zweckdienlich, den Nullpunkt für die G -Teilung einem mittleren Lokomotivgewicht mit runder Zahl entsprechend anzusetzen, so daß die abgelesenen G -Werte mit einer vergleichsweise kleinen Korrektur (G) verwendet werden können.

Diese Rechentafel beantwortet alle in der gegenständlichen Grundgleichung enthaltenen Fragen durch das Ziehen einer einzigen Suchlinie, und zwar für eine bestimmte Maschine jeweils streng genau für die anderen unter Berücksichtigung einer Korrektur entsprechend der Abweichung im Lokomotivgewicht.

Es sei die Frage gestellt, welches Zugsgewicht kann eine bestimmte Lokomotive, deren Charakteristik $[Z - Q(k_L - k_Z)]$ bekannt ist, mit der Fahrgeschwindigkeit v km/h in der Steigung s $^{\circ}/_{\text{oo}}$ fördern können.

Man verbindet den der Fahrgeschwindigkeit v entsprechenden Punkt der Lokomotivcharakteristik mit der Kote s auf der Abszissenachse; der Schnittpunkt dieser Suchlinie mit der demselben s -Wert entsprechenden Ordinate der $(s - a)$ Skala, gibt die Zahl der angehängten Bruttotonnen G für den Fall, daß die Lokomotive 100 t schwer wäre. Hat sie z. B. ein Dienstgewicht von 132 t, wie die Reihe 100, so dürfen

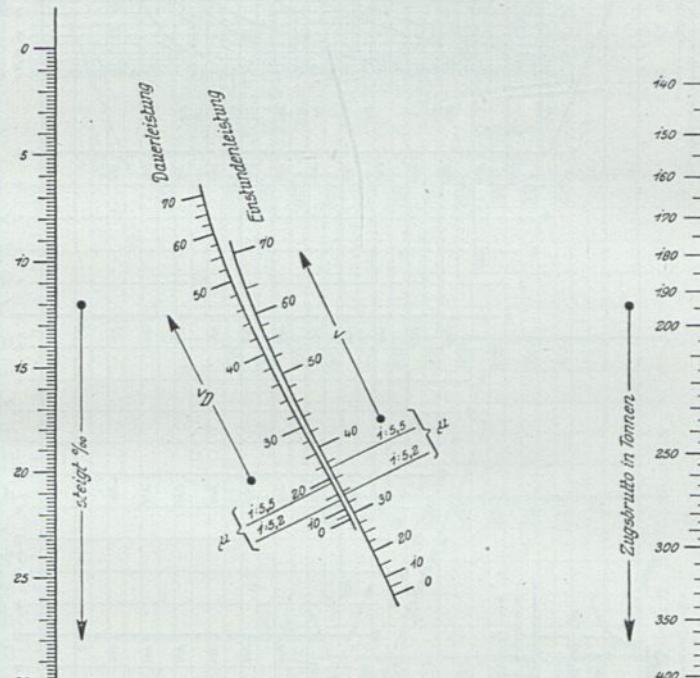
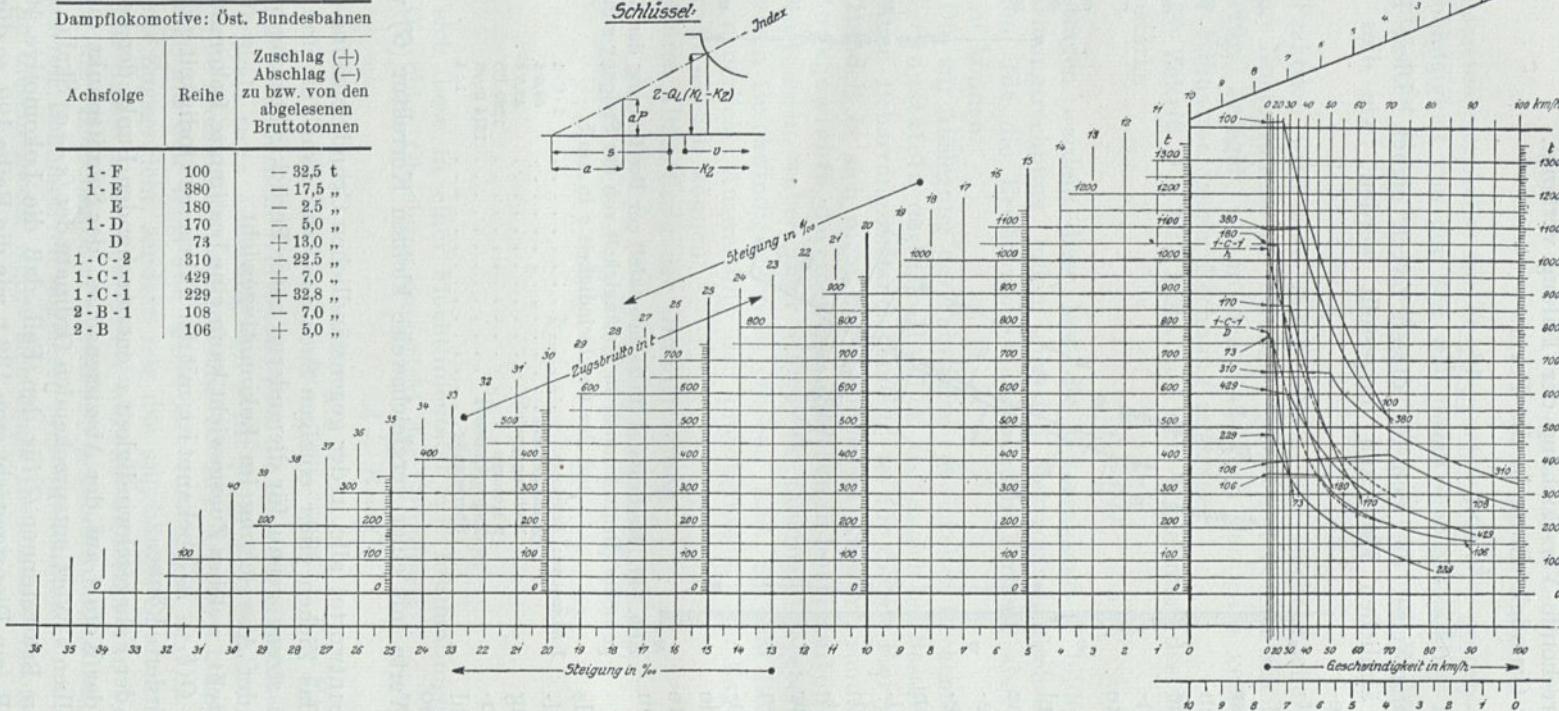


Abb. 146. Rechentafel (Belastungstafel) zur Bestimmung der Zugsgewichte (Bruttotonnen) in Abhängigkeit von der Steigung s in $^{\circ}/_{\text{oo}}$ und der Geschwindigkeit v in km/h.

Lokomotive:	Achsfolge	1-C-1
	Dienstgewicht	68,0 t
	Reibungsgewicht	43,5 t
	2 Motoren	1200 PS
	Raddurchmesser	1614 m/m
	Übersetzung	1 : 4



$$\text{Gleichung: } \frac{kZ + s}{Z - Q_L \cdot (k_L - k_Z)} = \frac{a}{Pa}.$$

Symbolen:

$P = Q_L + G_Z$ gesamtes Zuggewicht in t
 Q_L Lokomotiv-Dienstgewicht in t
 G_Z angehängtes Bruttogewicht in t

Z Zugkraft am Radumfang in kg
 $k_L = f(v)$ Zugwiderstand der Lokomotive
 $k_Z = f(v)$ Zugwiderstand des Zuges

v Geschwindigkeit in km/h
 s Steigung in ‰
 α Festwert

Abb. 147. Belastungstafel für Dampflokomotiven System Seefehlner (Gebirgsstrecken für kleine Geschwindigkeiten und große Steigungen, Kennlinien der Dampflokomotiven nach Sanzin).

nur um 32 t weniger angehangt werden. Eine leichtere Lokomotive zieht umgekehrt dem Gewichtsunterschied entsprechend ein höheres Brutto.

Dem Vorstand der Zugförderung sei die Aufgabe gestellt, auf wissenschaftlich einwandfreier Grundlage kurzer Hand diejenige der ihm zur Verfügung stehenden Lokomotiven zu bestimmen, die am besten geeignet ist Regelzüge mit vorgeschriebenem Gewicht (G) über eine gewisse Strecke mit der Steigung $s^{\circ}/_{100}$ mit einer ebenfalls vorgeschriebenen Geschwindigkeit (v) zu fördern. Man wählt irgendein nach allgemeiner Kenntnis der Sachlage entsprechendes Lokomotivgewicht und korrigiert dementsprechend das vorgeschriebene Brutto. Man zieht hierauf vom gegebenen Zahlenwert s auf der Abszissenachse zu dem $G \pm Q$ Wert auf der in s gezogenen Ordinate der ($s-a$) Skala eine Suchlinie bis in den Bereich der Ordinate v im Bezugssystem für die Lokomotivcharakteristiken. Dieser Index zeigt, welche Lokomotivtype die gegebenen Bedingungen am besten erfüllt. Man kann nunmehr den richtigen Zahlenwert des Lokomotivgewichtes in die Rechnung einführen und durch Ziehen eines neuerrlichen Suchstrahles den genauen Wert der Geschwindigkeit bzw. des Zugsgewichtes erheben, welches durch die gewählte Lokomotivtype gefördert werden kann.

Die Rechentafel lässt weiterhin sofort erkennen, welche

Seefehlner, Elektr. Zugförderung.

Elektrische Lokomotive		
Achslage	Gewicht in t	Zuschlag (+) Abschlag (-) zu bzw. von den abgelesenen Bruttotonnen
Lötschbergbahn	1-E-1	- 7 t
Preuß. Staatsbahnen	B + B	+ 7 t
Mittenwaldbahn	1-C	+ 47 t
Wien-Preßburg	1-B-1	+ 46 t
Österreichische Bundesbahnen	1-C-1	+ 32 t

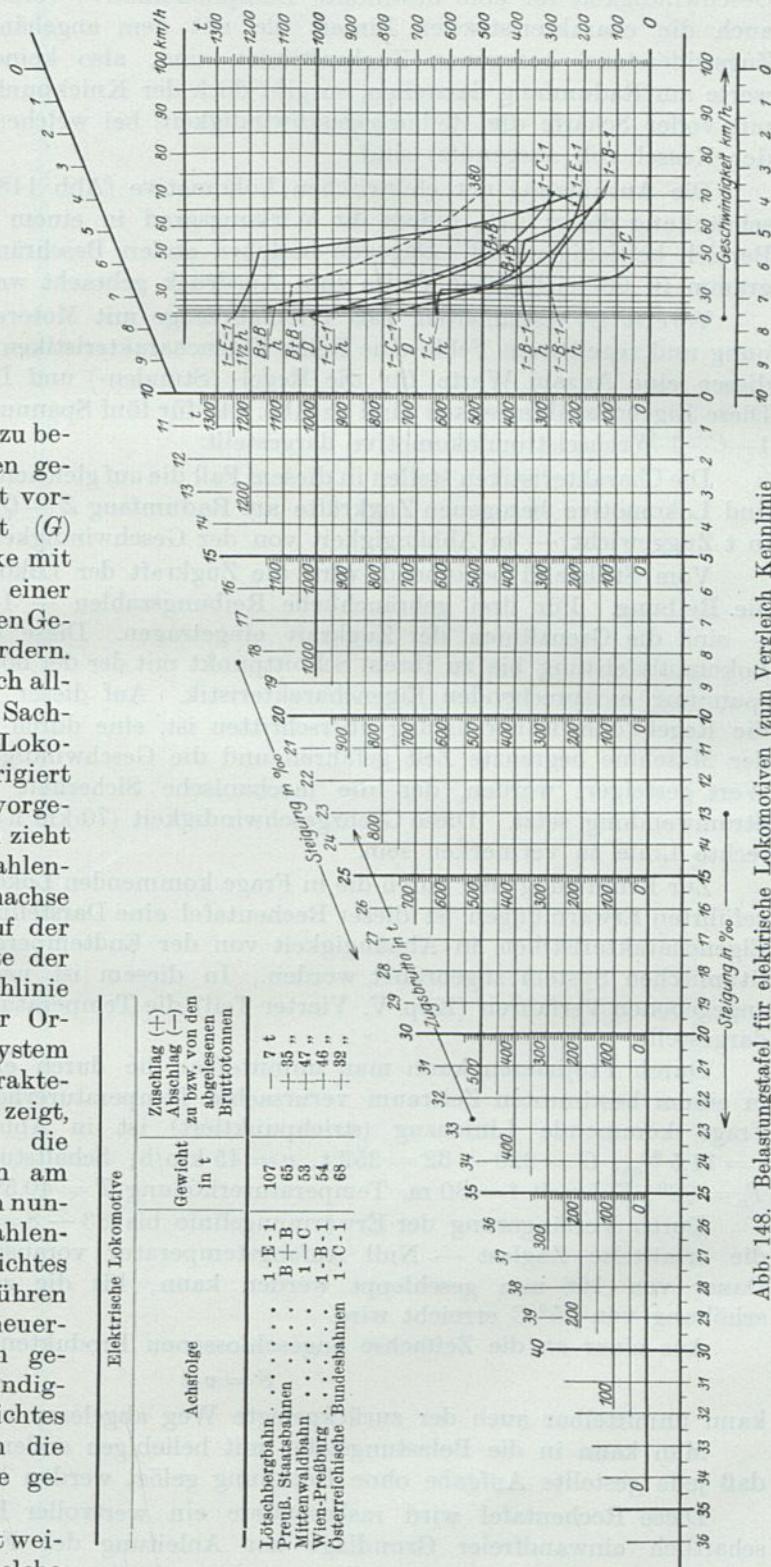


Abb. 148. Belastungstafel für elektrische Lokomotiven (zum Vergleich Kennlinie der Reihe 380, 1-E, Dampflokomotive der Österreichischen Bundesbahnen).

Geschwindigkeit für eine bestimmte Dampflokomotive vorzuziehen ist, denn wenn auch die charakteristischen Linien die mit dem angehängten Zug auf gleichen Zugswiderstand bezogenen Zugkraftlinien sind, also keine wirklichen Zugkraftwerte am Radumfang darstellen, so gibt doch der Knickpunkt in der Charakteristik mit voller Schärfe die Reibungsgeschwindigkeit, bei welcher das Treibgewicht und der Kessel voll ausgenützt sind.

Die Ausnutzung der elektrischen Lokomotive (Abb. 148) unterliegt keiner Beschränkung dieser Art, indem ihr Wirkungsgrad in einem vergleichsweise großen Bereich befriedigend ist. Dagegen bestehen andere Beschränkungen, die im Nomo gramm in übersichtlicher Weise zum Ausdruck gebracht werden können.

Vorerst ist festzuhalten, daß Triebfahrzeuge mit Motoren mit regelbarer Spannung und regelbarem Felde eine Reihe Eigencharakteristiken besitzen und innerhalb dieser eine Anzahl Werte für die Regel- (Stunden-) und Dauerleistung aufweisen. Diese Eigencharakteristiken sind in Abb. 149 für fünf Spannungsstufen einer 1200 PS 1—C—1-Wechselstromlokomotive dargestellt.

Die Charakteristiken stellen in diesem Fall die auf gleichen Rollwiderstand von Zug und Lokomotive bezogenen Zugkräfte am Radumfang $Z - Q_L (k_L - k_Z)$ — gemessen in t Zuggewicht — in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (Zugswiderstand) dar.

Vom Stillstand beginnend, wird die Zugkraft der Lokomotive begrenzt durch die Reibung. Für drei gebräuchliche Reibungszahlen — 181,5, 190 und 200 kg/t — sind die Grenzlinien der Zugkraft eingetragen. Diese bilden die Grenze der Lokomotivleistung bis zu ihrem Schnittpunkt mit der der höchst zulässigen Betriebsspannung entsprechenden Eigencharakteristik. Auf dieser kann, je nachdem, ob die Regel- oder Dauerleistung überschritten ist, eine durch den Temperaturzustand der Maschine begrenzte Zeit gefahren und die Geschwindigkeit bis zu demjenigen Wert gesteigert werden, den die mechanische Sicherheit oder die befriedigende Stromwendung setzt. Diese Grenzgeschwindigkeit (70 km/h) wird durch eine senkrechte Linie zu vermerken sein.

Zur Ermittlung der durch die in Frage kommenden Lokomotivleistungen herbeigeführten Erwärmungen ist dieser Rechentafel eine Darstellung der oben erwähnten Eigencharakteristiken in Abhängigkeit von der Endtemperatur in einem halblogarithmischen System zugeordnet werden. In diesem ist nach dem vom Verfasser angegebenen Verfahren (Kap. V. Vierter Teil) die Temperaturcharakteristik ebenfalls dargestellt.

Durch Projizieren kann man unmittelbar die durch eine gegebene Belastung in einem bestimmten Zeitraum verursachte Temperaturerhöhung ablesen. Der in Frage kommende Linienzug (strichpunktiert) ist in Abb. 149 für das Beispiel $s = 11,5 \text{ \%}$, $G = 220 + 32 = 252 \text{ t}$, $v = 45 \text{ km/h}$, Schaltstufe 4, Spannung 440 V., $T_0 = 83^\circ$, Fahrzeit $t = 30 \text{ m}$, Temperaturerhöhung $T = 40,5^\circ \text{ C}$ eingetragen.

Durch Verlängerung der Erwärmungslinie bis $83 - 8 = 75^\circ \text{ C}$ geht hervor, daß die ermittelte Zuglast — Null Anfangstemperatur vorausgesetzt — während der Dauer von 106 min geschleppt werden kann, bis die zugelassene Temperaturerhöhung von 75° C erreicht wird.

Aus einer an die Zeitachse angeschlossenen Produktentafel für die Beziehung

$$S = v \cdot t$$

kann unmittelbar auch der zurückgelegte Weg abgelesen werden.

Man kann in die Belastungstafel mit beliebigen anderen Größen eingehen, so daß jede gestellte Aufgabe ohne Rechnung gelöst werden kann.

Diese Rechentafel wird insbesondere ein wertvoller Behelf, um auf wissenschaftlich einwandfreier Grundlage zur Anleitung der Fahrer die zweckmäßige Wahl der Schaltstufen festzustellen.

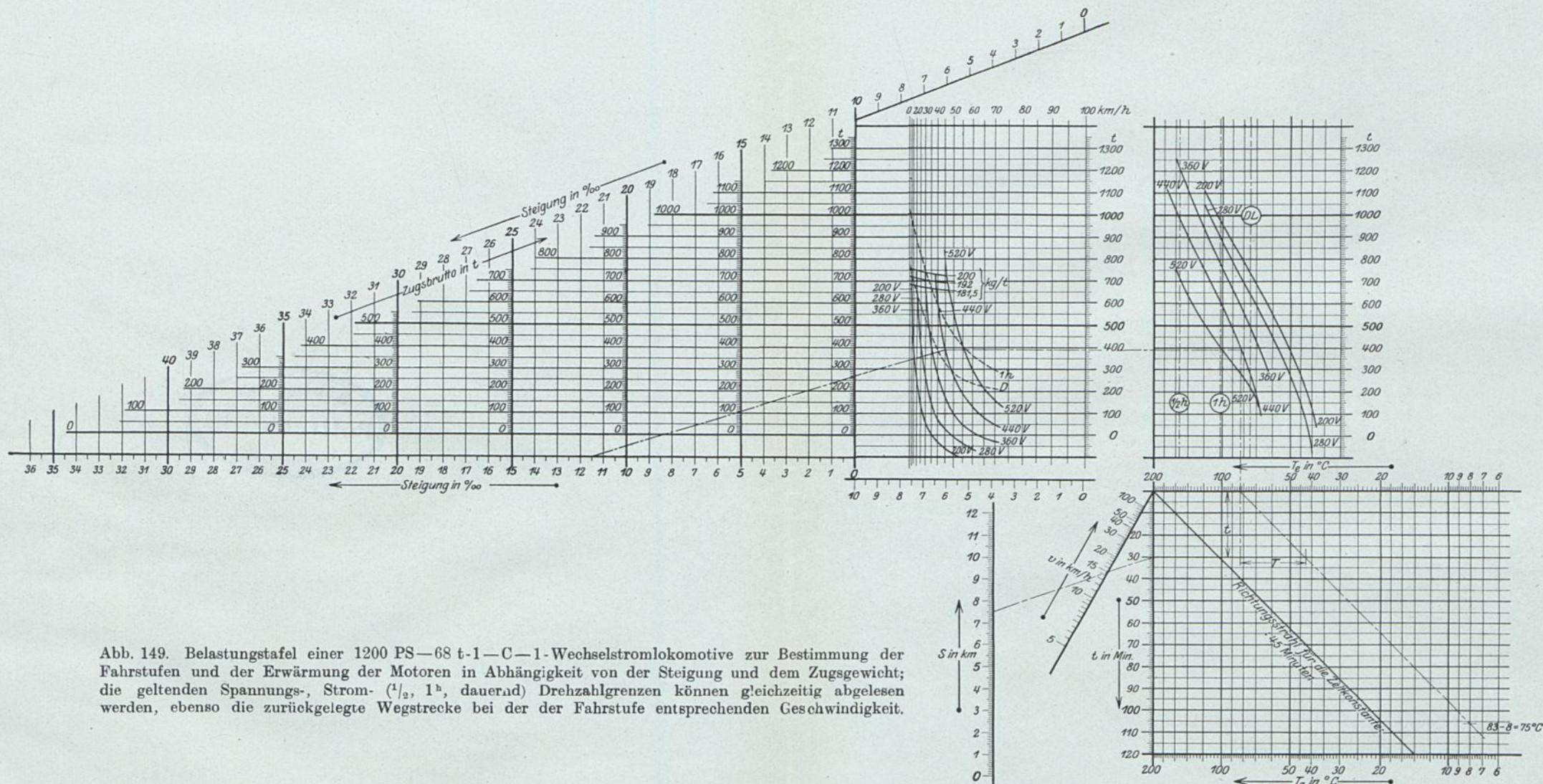


Abb. 149. Belastungstafel einer 1200 PS—68 t-1—C—1—Wechselstromlokomotive zur Bestimmung der Fahrstufen und der Erwärmung der Motoren in Abhängigkeit von der Steigung und dem Zugsgewicht; die geltenden Spannungs-, Strom- ($\frac{1}{2}$, 1^h , dauernd) Drehzahlgrenzen können gleichzeitig abgelesen werden, ebenso die zurückgelegte Wegstrecke bei der der Fahrstufe entsprechenden Geschwindigkeit.

7. Haltezeiten der Züge. Für die genaue Ermittlung der Motorleistung wird man im allgemeinen sich nicht auf die Auswertung eines Bewegungsbildes beschränken, vielmehr die Auswertung derselben über die ganze zurückzulegende Strecke vornehmen. In allen Fällen müssen die üblichen bzw. möglichen Haltezeiten berücksichtigt werden, die insbesondere bei kurzer Folge der Haltestellen die kommerzielle Reisegeschwindigkeit stark beeinflussen.

Sofern diese durch besondere Verkehrsrücksichten nicht anders bestimmt sind, kommen für verschiedene Bahnarten folgende Haltezeiten in Betracht:

	Haltezeiten	Entfernung der Haltestellen:
Schnellzüge	5 min	50 bis 80 km
Personenzüge	2 min	5 bis 8 "
Überlandbahnen (Motorwagenbetrieb) . .	10 bis 30 sek	2 "
Stadtbahnen	10 sek	0,8 "
Straßenbahnen	7 sek	270 bis 300 m

Die Haltezeiten können auch auf Grund der Beobachtung der Aus- und Einsteigezeiten der Reisenden berechnet werden:

Zahl der einsteigenden Reisenden	Zeitaufwand für die Person sek
4	2 "
10	1 $\frac{1}{4}$ "
20	1 "
40	0,9 "

8. Fahrgeschwindigkeiten der Zugförderung.

Der dem Bewegungsbild entsprechende Zeitaufwand für die Befahrung der Strecke ist die reine Fahrzeit, welcher eine mittlere Fahrgeschwindigkeit entspricht. Die letztere ist größer als die auch kommerzielle Geschwindigkeit genannte Reisegeschwindigkeit, weil dieser Durchschnittswert sich nach Hinzufügung der Haltezeiten zur reinen Fahrzeit errechnet.

Die mittlere Geschwindigkeit findet man durch Berechnen oder Planimetrieren der Fläche des Bewegungsbildes und Division mit der reinen Fahrzeit; ebenso die Reisegeschwindigkeit durch Division mit der Reisezeit.

Die bei Auslegung des Bewegungsbildes in Erscheinung tretenden Fahrwiderstände bestimmen den Kraftverbrauch und die Betriebsaufgabe der jeweiligen Art der Bahnanlage den wirtschaftlich gerechtfertigten Stromaufwand.

Dieser wirtschaftliche Umstand in Verbindung mit der jeweils gebotenen Sicherheit der Reisenden und der Fahrzeuge bestimmt die wirtschaftliche Fahrgeschwindigkeit, für welche die Erfahrung bestimmte praktische Grenzwerte erkannt hat, innerhalb welcher sich die gebräuchlichen und zweckmäßigen Geschwindigkeiten der Zugförderung bewegen.

Art der Bahnanlagen	Mittlere Geschwindigkeit km/h	Reise-	Höchst-
Industriebahnen	4—10	—	15—20
Straßenbahnen	12—19	10—15	35
Stadtbahnen	27—35	19—30	50—60
Überlandbahnen	35	30	60 (90)
Vollbahnen: Güterzüge . . .	15—25	12—22	50
Personenzüge	35—45	30—40	75
Schnellzüge	70—80	60—70	100—120

Angaben über Stadtbahnen.

Bahn anlage:	Mittlerer Abstand der Haltestellen m	Reisegeschwin- digkeit km/h
Subway-New-York	525	18,54
Hoch- und Untergrundbahn Berlin	775	24,80
Stadtbahn Berlin (Dampf)	1100	21,57
Berlin-Lichterfelde, Ost	465	32,80
Vorortebahn Hamburg-Blankenese	1650	30,6
London:		
Mansion House-Ealing 9 bzw. 16 Haltestellen .	{ 1940 1040	{ 38,7 30,9
Elephant-Castle to Watford	1280	32,2
Hammersmith-Finsbury-Park	1000	28,6
Charing Cross-Golders Green	{ 900 2450	{ 28,7 36,7
Charing Cross-Highgate	{ 650 2700	{ 25,2 35,4
Liverpool Street-Wood Lane	840	27,2
Clapham Common-Euston	900	21,9

Aus diesen Angaben geht eindeutig hervor, daß vergleichsweise kurze Entfernungen der Haltestellen die Reisegeschwindigkeiten wesentlich verringern, indem in allen Fällen die praktische höchstzulässige Beschleunigung und Verzögerung zur Anwendung zu kommen pflegt!

Die elektrische Ausrüstung der Triebfahrzeuge.

III. Der Bahnmotor.

Literatur:

- Adler. Regelung von Straßenbahnmotoren mittels Feldschwächungswiderständen. E.T.Z. 1916. H. 49.
Ref. E.u.M. 1917. H. 11.
- Alexanderson. The single phase repulsion motor. E.R.J. Okt. 1913.
- Alexanderson. Single phase Motorcar equipment for trunk line service. G.E.R. May 1913.
- Arnold. Die asynchronen Wechselstrommaschinen. II. Die Wechselstromkommutatormaschinen. Julius Springer. Berlin 1912.
- Behn-Eschenburg. Bahnmotoren für Einphasen-Wechselstrom-Sch. E.T.Z. Aug. 1904. E.T.Z. 1907. H. 45. Helios. 1908. Nr. 24. E.T.Z. 1908. H. 39. Ref. E.u.M. 1906.
- Benischke. Die asynchronen Wechselfeldmotoren. Verl. Julius Springer. Berlin 1920.
- Cronbach. Gleichstrom-Wechselstromwagen der A.E.G. E.B. 1905. H. 11.
- Dean. Manufacturers' tests of materials for railway motors. E.R.J. Aug. 1919. S. 321.
- Döry. Einphasenbahnmotoren. Sammlung Vieweg. Braunschweig 1919.
- Eichberg. Wechselstrommotoren für Bahnen. E.B. 1904. H. 2.
- Eichberg. Einphasen-Kollektormotoren und ihre Regelung. E.T.Z. 1904. H. 4.
- Eichberg. Über Einphasenbahnen. Z.f.E. Wien 1904. H. 9.
- Eichberg. Der Stand der elektr. Vollbahnen mit besonderer Berücksichtigung der Einphasenbahnen. Z.V.D.I. 1908. S. 1145.
- Eichberg. Über die Entwicklung des Einphasenbahnsystems. E.T.Z. 1908. H. 24.
- Engel. Das Parallelarbeiten von Gleichstromreihenschlußmaschinen im Bahnbetriebe. E.K.B. 1919. H. 18.
- Fleischmann. Zur Theorie des Winter-Eichbergmotors. E.T.Z. 1905. H. 33.
- Franklin-Seyfert. Über die Raumausnutzung bei Einphasenreihenschlußmotoren. Proc. 1910. Ref. R. Richter. E.T.Z. 1910. H. 37.

- Fynn. Die Theorie der Wechselstromkollektormotoren in ihrem Zusammenhang mit der der Gleichstrommotoren. E.u.M. 1908. H. 5. E.T.Z. 1906. H. 29.
- Gerstmeyer. Die Wechselstrombahnmotoren. Verl. Oldenbourg. Berlin u. München. 1919.
- Görge. Das Verhalten der Wechselstrommotoren in einheitlicher Betrachtungsweise. E.T.Z. 1907. H. 30.
- Hammel-Heymann. Wechselstrom-Kollektormotoren. Verl. A.E.G., Berlin 1911.
- Heubach. Der Wechselstromserienmotor. Sammlung Voit. Verl. Enke. Stuttgart 1904.
- Heyland. Allgemeine Gesichtspunkte über die Entwicklung und die Aussichten des Einphasenbahnbetriebes. E.T.Z. 1907. H. 37.
- Heyland. Einphasenmotor mit zur Hauptachse neutraler Kurzschluß- und Anlaufachse. E.T.Z. 1913. H. 30.
- Kummer. Über die Abklärung in der Anwendung verschiedener Motorsysteme innerhalb der Einphasentraktion. Sch.B.Z. Dez. 1912.
- Kummer. Über die Bemessung der Umdrehungszahl bei elektrischen Bahnmotoren. Sch.B.Z. 1919. Bd. 53. Nr. 24.
- Latour. Ein für übersynchronen Betrieb geeigneter Wechselstromkollektormotor mit elliptischem Feld. E.T.Z. 1906. H. 5.
- Latour. Repulsionsmotor. E.T.Z. 1903. H. 24.
- Latour. Einphasenmotoren ohne Phasenverschiebung. E.T.Z. 1903. H. 43.
- Latour. Traktor mit Einphasenstrom. Regelung der Geschwindigkeit und Wiedergewinnung der Arbeit. E.T.Z. 1903. H. 51.
- Latour. Die zweite Form des Repulsionsmotors und des kompensierten Motors. E.T.Z. 1904. H. 45.
- Latour. Neuer Einphasenmotor für Eisenbahnzwecke. E.T.Z. 1904. H. 13.
- Latour. Einphasenwechselstrom-Kollektormotoren. E.T.Z. 1912. H. 48.
- Latour. Die Bahnmotoren für einphasigen Wechselstrom. E.u.M. 1912. H. 48.
- Latour. Commutation in alternating-current machinery. Proc. 1918. H. 2.
- Marguerre. Beiträge zur Kenntnis der Wechselstrom-Kommutatormotoren. E.K.B. 1911. H. 27.
- Marguerre. Singlephase motorcar equipment for trunk line service. G.E.R. Mai 1913.
- Moser. Die Bestimmung der Transformator- und Rotationsspannung bei Einphasenkollektormotoren mit Bürstenverschiebung und Doppelbürsten. E.u.M. 1918. H. 15.
- Moser. Der Gleichstromanker im Wechselfeld. E.u.M. 1919. H. 3.
- Müller. Die Bergmann-Einphasenwechselstrombahnmotoren. E.T.Z. 1912. H. 12.
- Müller. Zur Theorie des Winter-Eichberg-Motors. E.T.Z. 1904. H. 43.
- Müller-Mattersdorf. Die Bahnmotoren für Gleichstrom. Verl. Julius Springer. Berlin 1903.
- Niethammer. Der Elektromotor als Eisenbahnmotor. Z.f.E. 1903. H. 24 u. H. 47.
- Niethammer. Wechselstromkommutatormotoren. Verl. A. Raustein. Zürich 1905.
- Niethammer. Wechselstromkommutatormotoren. Z.f.E. 1904. H. 49. E.u.M. 1906. H. 1.
- Niethammer. Anlaufverhältnisse der Einphasenkommutatormotoren mit Reihenschlußcharakteristik. E.K.B. 1912. H. 1.
- Niethammer. Die Arbeitsweise von Wechselstromkommutatormotoren mit Berücksichtigung aller wesentlichen Streuflüsse. E.u.M. 1913. H. 43.
- M.-F. Örlikon. Wechselstromreihenschlußmotor für Schmalspurbahnen. E.T.Z. 1907. H. 45.
- Osnos. Kreisdiagramm des Repulsionsmotors. E.T.Z. 1903. H. 44.
- Osnos. Der Wechselstromserienmotor. Z.f.E. 1903. H. 52.
- Osnos. Die einphasigen Wechselstromkommutatormotoren, deren Entstehung, Arbeitsweise und vergleichende Kritik. E.T.Z. 1904. H. 1.
- Osnos. Theorie des Atkinson'schen Repulsionsmotors. Z.f.E. 1904. H. 7.
- Osnos. Diagramm für den kompensierten Serienmotor. E.T.Z. 1904. H. 11.
- Osnos. Der Wechselstromdoppelschlußmotor der Felten & Guilleaume-Lahmeyer Werke. E.T.Z. 1907. H. 15.
- Osnos. Über Wechselstromkommutatormotoren mit besonderer Berücksichtigung der Bahnmotoren. E.T.Z. 1908. H. 1.
- Ossana. Dimensionierung der einphasigen Kommutatormotoren mit besonderer Berücksichtigung der schweren Zugförderung. E.T.Z. 1911. H. 24.
- Ossana. Untersuchungen über den einphasigen Kollektormotor mit besonderer Berücksichtigung der schweren Zugförderung. E.u.M. 1916. H. 31.
- Pannel. Entwurf von Gleichstrombahnmotoren. J.I.E.E. 1916. Ref. E.u.M. 1917. H. 16. E.T.Z. 1916. H. 51. — En. 17. März 1916.
- Pichelmayr. Über Einphasenkommutatormotoren. E.T.Z. 1904. H. 22.
- Pichelmayr. Der Wechselstromkollektormotor für schwere Zugförderung. E.u.M. 1909. H. 9.
- Pichelmayr. Über die Wahl der zweckmäßigsten Periodenzahl für schwere Zugförderung. E.u.M. 1911. H. 11.
- Priest. The motor used on 300 ton electr. locomotives of the Ch.M.&St.P.Ry.G.E.R. Nov. 1916.

- Rasch. Regelung der Motoren elektrischer Bahnen. Julius Springer. Berlin 1903.
- Reichel. Bahnmotor von 350 Stunden PS für einphasigen Wechselstrom von 25 Perioden. E.K.u.B. 1907. H. 4.
- Reichel. Bemerkungen über die Kommutierung und die Spannungsempfindlichkeit von Wechselstromkollektormotoren für Vollbahnbetrieb. E.K.B. 1908. H. 15.
- Richter. Über den Anlauf von Wechselstromkollektormotoren. E.T.Z. 1906. H. 7.
- Richter. Der Wechselstromreihenschlußmotor der S.S.W. E.T.Z. 1906. H. 23. 1907. H. 34.
- Richter. Zur Funkenunterdrückung bei Wechselstromkollektormotoren. E.T.Z. 1911. H. 50.
- Schenkel. Einheitliche Gesichtspunkte für die Berechnung der Kollektoren von Wechselstromkollektormotoren beliebiger Bauart und Phasenzahl. E.T.Z. 1917. H. 8.
- Schmidt. Drehfeldtheorie des einphasigen Kollektormotors. E.u.M. 1909. H. 39.
- Schnetzler. Ein neuer Repulsionsmotor und seine Vorausberechnung. E.T.Z. 1905. H. 3.
- Schnetzler. Einphasenkollektormotoren der Firma Brown Boveri & Co. E.T.Z. 1907. H. 3.
- Schnetzler. Regelung der Repulsionsmotoren durch Bürstenverschiebung. E.T.Z. 1907. H. 46.
- Steimetz. Der Wechselstrom-Bahnmotor. Ref. E.T.Z. 1904. H. 18.
- Stillwell. Zur Frage der Periodenzahl bei Wechselstrombahnen. Proc. 1907. H. 3.
- Sumec. Die einphasigen Kommutatormotoren. Z.f.E. 1905. H. 12.
- Thormann u. Kummer. Eignung der Traktionssysteme mit Bezug auf die Anforderungen des Bahnbetriebes. Schweiz. Studienkommission. 1915. H. 4. Allgemeiner Vergleich der Eigenschaften und Eignung der Systeme. Rascher & Co. Zürich.
- Unger. Die Abmessungen der Einphasen-Bahnmotoren. E.T.Z. 1920. H. 1.
- Vallauri. Einiges über die Systemfrage bei der Elektrisierung der Hauptbahnen. E.K.u.B. 1914.
- Vallauri. Funkenunterdrückung bei Einphasenbahnmotoren. E.u.M. 1915. H. 19.
- Winkler. Beiträge zur Kenntnis zeitgemäßer Gleichstrombahnmotoren. E.T.Z. 1919. Nr. 44/45.
- Wittek. Die Periodenzahl bei einphasigen Wechselstrombahnen. E.u.M. 1910. H. 38.
- Zehme. Großer Lokomotivmotor für Einphasen-Wechselstrom. E.T.Z. 1907. H. 6.
- Zipp. Elektrische Vollbahnlokomotiven für einphasigen Wechselstrom. Verl. O. Leiner. Leipzig 1915.
- * * * Über Wechselstrom-Kommutatormotoren. E.T.Z. 1906. H. 33.
- * * * Frage der Periodenzahl bei Wechselstrombahnen. Proc. 1907. H. 3. Ref. E.u.M. 1907. H. 19.
- * * * Die Wechselstrom-Kollektormotoren der Midland-Railway. El. Juni 1908. Ref. E.u.M. 1908.
- * * * The constant speed motor in heavy electric traction. E.R.J. Juni 1919. S. 1201.
- * * * A good word for the constant speed-railway-Motor. E.R.J. Okt. 1917. S. 750.
- * * * Das Westinghouse-Einphasen-Bahnsystem. Ref. E.T.Z. 1908. H. 5.
- * * * Eine transformatorische Wirkung beim Schalten der Erregerspulen von Straßenbahnmotoren während des Befahrens von Kreuzungen. E.R.J. 1922. Bd. 55. S. 383. Ref. E.T.Z. 1921. H. 17.

1. Kennlinien des Bahnmotors (Abb. 150). Bereits im Rahmen der Krafterzeugung wurde die Bedeutung des Umstandes betont, alles zu vermeiden, was geeignet

ist, die Belastungsspitzen zu steigern bzw. in das System Starrheit zu bringen.

Da der Bahnbetrieb naturgemäß wechselnde Belastung bringt, weil die Züge nach Bedarf vom Stillstand beschleunigt, dann mit verschiedener Geschwindigkeit in den jeweils vorliegenden Steigungen befördert werden müssen, so ist es klar, daß diejenige Motorart den Anforderungen des Bahnbetriebes am besten entsprechen kann, die, sei es selbsttätig, sei es mit einfachen Hilfsmitteln, auf konstante Leistung bei wechselnder Zugkraft und Geschwindigkeit reguliert.

Die Elektrotechnik kennt zweierlei charakteristisches Verhalten der Motoren, welches entsprechend dem Umstand, daß es in ausgesprochener Weise bei den betreffenden Gleichstrommotorarten vorkommt, einerseits mit der Nebenschluß-, andererseits mit der Reihenschluß-Charakteristik bezeichnet wird.

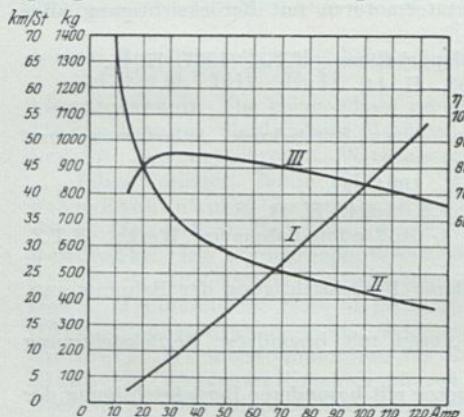


Abb. 150. Kennlinien eines Straßenbahnmotors (A.E.G.).

Leistung 44 PS/h
 Spannung 650 V
 Übersetzung 1:3
 Raddurchmesser 800 mm
 Zeichenerklärung: I. Zugkraft, II. Fahrgeschwindigkeit, III. Wirkungsgrad.

Wie aus der Motortheorie bekannt, ist das Verhalten der beiden Motorarten bei einer festen Klemmenspannung durch folgende Gleichungen gekennzeichnet:

Nebenschlußmotor

$$\begin{aligned}\Phi \text{ bzw. } i &= \text{const.} \\ D &= CJ \\ n &= C \\ \frac{J}{i} &= \text{veränderl.}\end{aligned}$$

Serienmotor

$$\begin{aligned}\Phi &\text{ veränderl. } \Phi = f(J) \\ D &\approx c J^2 \\ n &= f(J) \text{ bzw. } f(D) \\ \frac{J}{i} &\approx \text{Const.}\end{aligned}$$

Hier bezeichnet:

- Φ den Flux,
- i „ Erregerstrom,
- J „ Ankerstrom,
- D das Drehmoment,
- n die Drehzahl.

Das Nebenschlußverhalten ist demnach gekennzeichnet durch ein unveränderliches vom Ankerstrom unabhängiges Feld Φ , das von einem Nebenstrom i der bei gegebener fester Spannung unveränderlich ist, erzeugt wird. Sieht man vom Spannungsverlust im Anker ab, wird für eine gegebene Klemmenspannung auch die Umlaufzahl n für jede Belastung des Motors unveränderlich bleiben.

Der Nebenschlußmotor läuft demnach bei veränderlichem Drehmoment mit einer fast unveränderlichen Drehzahl, da die konstante Gegen-EMK bei konstantem Felde nur so entstehen kann, wogegen der Serienmotor aus dem gleichen Grunde mit abnehmendem Strom, also abnehmendem Φ und fallender Gegen-EMK, schneller laufen muß.

Das Drehmoment ist proportional dem Ankerstrom J und da dieser sich mit der Leistung ändert, ist das Verhältnis $J:i$ im Betriebe beim Nebenschlußmotor mit der Leistung veränderlich.

Beim Reihenschluß ist das Feld dem Ankerstrom proportional insoweit die Sättigung nicht erreicht ist. Das Feld ist veränderlich, ebenso die Drehzahl. Das Drehmoment ist verhältnisgleich dem J^2 und

$$\frac{J}{i} = \text{Const.}, \text{ weil } J = i.$$

Trägt man das Drehmoment bzw. die Zugkraft eines Motors in Abhängigkeit von der Drehzahl auf, wird das diesen Verhältnissen entsprechend verschiedene Verhalten der beiden Motorarten augenfällig.

Die eisenbahntechnische Bedeutung dieser charakteristischen Linien (Abb. 151) ist am besten durch Hinzufügung der Hyperbel (b) für konstante Leistung zu erkennen.

Um eine Systematik in der schematischen Darstellung zu sichern, sei erläuternd festgestellt, daß Anker mit Gleichstromwicklungen und Kollektoren stets nur mit solchen Feldern ein Drehmoment erzeugen können, deren Achse senkrecht auf die

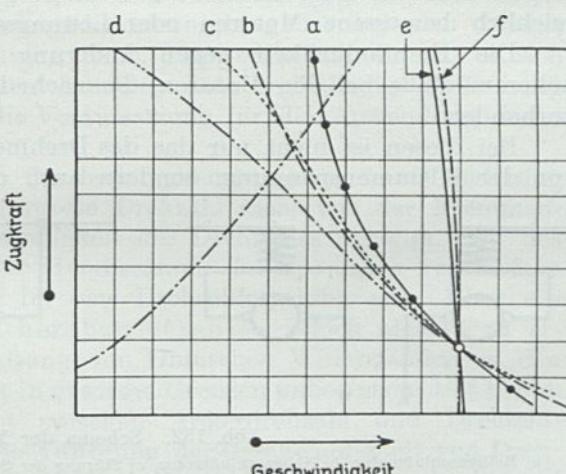


Abb. 151. Kennlinien der verschiedenen Motorarten:

- a) Reihenschlußmotor
- e) Nebenschlußmotor } Gleichstrom,
- c) Reihenschlußmotor, Wechselstrom,
- f) Induktionsmotor,
- d) Dampflokomotive,
- b) Hyperbel konstanter Leistung.

Bürstenachse ist. Dies ist in der schematischen Darstellung (Abb. 152) zum Ausdruck gebracht. Wicklungen in der Bürstenachse sind durch Induktion d. h. bei Wechselstrom transformatorisch verkettet; bei Gleichstrom tritt bei gleichachsigen Wicklungen eine Summierung oder Subtraktion der magnetomotorischen Kräfte ein. Entsprechend dem weiteren Umstand, daß die Änderung der Drehrichtung oder der Übergang von Motor zu Generatorwirkung beim Hauptschlußmotor jeweils den Wechsel der relativen Schaltfolge von Anker und Feld bedingt, wird dies auch in den grundsätzlichen Darstellungen zum Ausdruck gebracht. Ebenso dann, wenn, wie es bei Fahrzeugen, die mit zwei Motoren ausgerüstet sind, fast immer der Fall ist, die selbstverständlich gleichartig gebauten Motoren räumlich um 180° gedreht angeordnet sind. Für gleiche Fahrtrichtung müssen daher die zwei Motoren in bezug auf die relative Lage von Anker und Feld verschieden geschaltet sein.

2. Die Abhängigkeit von der Klemmenspannung. Aus den Grundgleichungen der beiden Motorarten geht eine vom Standpunkt der Zugförderung wichtige Tatsache hervor: der Zusammenhang des Drehmomentes mit der Linienspannung.

Das Drehmoment des Reihenschlußmotors ist unabhängig von der Klemmenspannung, gestattet daher in der Bemessung der Leitungen die aus wirtschaftlichen Gründen gebotene Wahl zu treffen. Die Stromart — Gleich- oder Wechselstrom — ist dabei ohne Belang.

Der Erregerstrom des Nebenschlußmotors ist proportional der Klemmenspannung. Das Drehmoment nimmt somit — innerhalb der Grenzen der Proportionalität zwischen Feld- und Erregerstrom — im Verhältnis zur Klemmenspannung ab. Der Betrieb mit Nebenschlußmotoren verlangt demnach, gleiche Verhältnisse vor Augen haltend, gegenüber dem Reihenschlußmotor in bezug auf Drehmoment reichlich bemessene Motoren oder Leitungsanlagen mit höherem Kupferaufwand.

Die Empfindlichkeit gegen Änderung der Klemmenspannung ist in noch höherem Maße bei den Motoren, die nach dem Induktionsprinzip gebaut sind, vorhanden.

Bei diesen ist nicht nur das das Drehmoment erzeugende Feld in Abhängigkeit von der Klemmenspannung, sondern auch die unter der Kraftwirkung stehenden

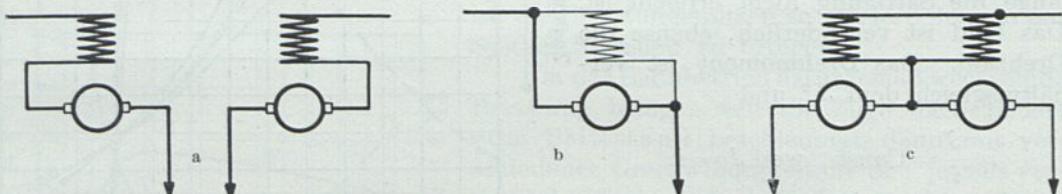


Abb. 152. Schema der Motorschaltungen.

a) Reihenschlußmotor, b) Nebenschlußmotor, c) Störung der Seriencharakteristik durch eine Ausgleichsverbindung.

Ströme sind diesem Feld bei gegebener Schlüpfung proportional. Das Drehmoment des Induktionsmotors nimmt daher quadratisch mit der Klemmenspannung ab.

Dieser Mangel des Induktionsmotors wird dadurch aufgewogen, daß man bei diesem wegen Fehlen des Stromwendeapparates — ohne Transformierung am Fahrzeug — höhere Spannungen anwenden kann als beim Gleichstrommotor; daher wird bei einem gegebenen Kupferaufwand ein verhältnismäßig kleinerer Spannungsabfall auftreten.

In der Praxis besteht diese Überlegenheit des Drehstrommotors nicht mehr unberührt, denn es ist gelungen Anordnungen — Serienschaltung der Motoren — zu treffen, die es ermöglichen im Gleichstrombetrieb die im Bahnbetrieb mit Drehstrom gebräuchliche Spannung von 3000 Volt anzuwenden.

Der Vorteil des Drehstrombetriebes beschränkt sich demnach auf etwa 12,5% Ersparnis an Leitungsmaterial, wobei der induktive Spannungsverlust noch nicht berücksichtigt ist.

3. Die Regelung der Geschwindigkeit (Drehzahl). Die Kennlinien der verschiedenen Motorarten weisen unter einem den Weg, welcher zum Zwecke einer wirtschaftlichen Geschwindigkeitsregelung einzuschlagen ist.

Die Drehzahl des Reihenschlußmotors ändert sich, eine bestimmte Zugkraft vor Augen haltend, proportional der Gegen-EMK, wobei die Zugkraft vom jeweiligen Wert der Gegen-EMK bzw. — da der Spannungsabfall im Motor verhältnismäßig klein ist — auch vom Wert der Klemmspannung unabhängig ist.

Der Hauptschlußmotor kann durch Änderung der Spannung wirtschaftlich geregelt werden.

Bei Gleichstrombetrieb steht zu diesem Zweck die Reihenschaltung mehrerer Motoren zur Verfügung.

Das Wechselstromsystem verwendet zu diesem Zweck den Stufentransformator.

Die Geschwindigkeit des Gleichstromnebenenschlußmotors kann in großen Grenzen betriebssicher nur durch Änderung der Ankerspannung beeinflußt werden, wobei die Erregerspannung zunächst aufrecht zu halten ist.

Eine nicht zu weit gehende Geschwindigkeitsregelung ist bei den beiden Motorarten auch durch Feldschwächung (Abb. 153) erzielbar, sofern es sich um nicht zu stark gesättigte Maschinen handelt. Eine vollständige Aufhebung des Ankerfeldes durch Wendepole ist die Voraussetzung für die Anwendung dieses Mittels.

Bei Induktionsmotoren versagt die Geschwindigkeitsregelung durch Änderung der Spannung, indem bei dieser Motorart die Drehzahl nicht von der Klemmspannung, sondern nur von der Geschwindigkeit des Drehfeldes abhängt. Da des weiteren sich das Drehmoment mit der Herabsetzung der Spannung vermindern würde, scheidet dieses Mittel als Behelf für eine Drehzahlregelung aus. Über ein unwirtschaftliches Mittel die Drehzahl herabzusetzen — jedoch niemals zu erhöhen — verfügt man in der Einschaltung von Ohmschen Widerständen in den Läuferstromkreis, wobei das Drehmoment in gewissen Grenzen unbeeinträchtigt bleibt.

Entsprechend dem Zusammenhang zwischen Ankerdrehzahl und Drehfeldgeschwindigkeit, kann eine wirtschaftliche Abstufung der Geschwindigkeit von Drehstrominduktionsmotoren mit Hilfe der Polumschaltung — Änderung der Polzahl — erzielt werden.

4. Das Anlassen. Im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis zur Eigencharakteristik wird die Motorzugkraft — eine stetige Drosselung des Stromes vorausgesetzt — durch eine zur Abszissenachse parallele Gerade dargestellt, indem die mit kleinem eigenen Widerstand behafteten Motoren in der Weise auf Touren gebracht werden, daß man veränderliche, mit der Geschwindigkeitszunahme abnehmende Widerstände vorschaltet die die Strombeanspruchung und damit die Zugkraft des Motors auf einen bestimmten Wert begrenzen (Abb. 154).

Die durch die Koordinaten eines Punktes der Kennlinien $Z = f(v)$ eingeschlossene Fläche bildet ein Maß für die Leistung ($Z \cdot v$) der Triebmaschine. Sieht

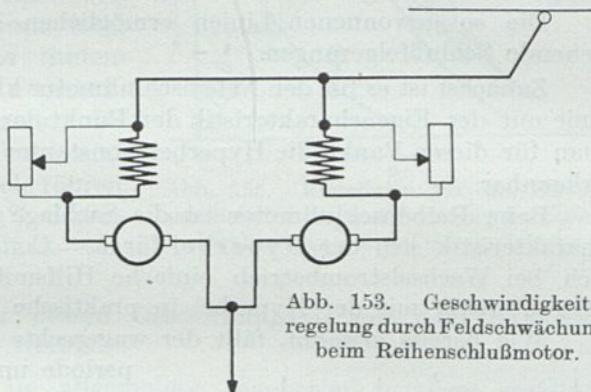


Abb. 153. Geschwindigkeitsregelung durch Feldschwächung beim Reihenschlußmotor.

man von den Verlusten in der Maschine selbst ab, ist die Zugkraft ein Maß für den Strom J und v bzw. n die Drehzahl für die Ankerspannung.

Für konstante an das System — Anker und vorgeschalteter Widerstand — angelegte Spannung messen auch die Stromstärken — die Ordinaten — die zugeführte bzw. abgegebene Leistung. Die zugeführte Leistung ist Annahme gemäß konstant; sie ist im rechtwinkeligen Bezugssystem durch eine zur Abszisse parallelen Geraden dargestellt.

Die abgegebene Nutzleistung wächst linear mit der Geschwindigkeit; die Lage der entsprechenden Geraden OA und OB ist durch den Nullpunkt des Systems und durch den Schnittpunkt mit der Eigencharakteristik gegeben, d. h. durch diejenige Geschwindigkeit, bei welcher kein Widerstand mehr vorgeschaltet ist.

Die so gewonnenen Linien ermöglichen bezüglich des Motorverhaltens weitgehende Schlußfolgerungen.

Zunächst ist es für den Nebenschlußmotor klar, daß der Schnittpunkt der Anfahrline mit der Eigencharakteristik den Punkt der größten Leistung gibt. Zeichnet man für diesen Punkt die Hyperbel konstanter Leistung, wird dies auch zeichnerisch erkennbar.

Beim Reihenschlußmotor ist die Sachlage viel günstiger, indem seine Eigencharakteristik sich der Hyperbel für $L = \text{Const.}$ sehr nähert, ja es stehen namentlich bei Wechselstrombetrieb einfache Hilfsmittel zur Verfügung, um die Motorcharakteristik mit der Hyperbel in praktische Übereinstimmung zu bringen.

Wie bereits erwähnt, fällt der wagerechte Teil des Diagrammes in die Anfahrperiode und stimmt zweckmäßigerweise mit der Stundennormalleistung des Motors überein.

Der eigentliche Arbeitsbereich liegt in der Eigencharakteristik im Mittel bei einem Punkt, der der Dauerleistung des Motors entspricht.

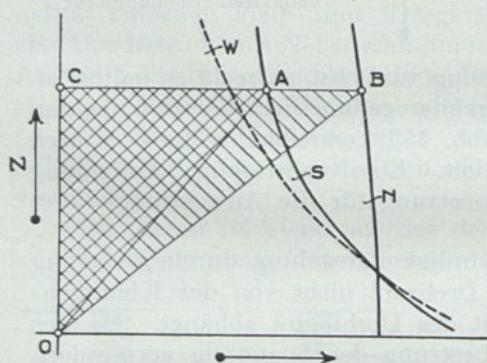


Abb. 154. Kennlinien $Z = f(v)$ bzw. $J = f(v)$ oder $L = f(v)$ für das Anfahren mit einem Serienmotor (OA) und einem Nebenschlußmotor (OB). (W) Wechselstrommotor.

gleichsweise hohen Geschwindigkeit bestimmte Höchstbeanspruchung des R.S.-Motors.

Die Leistung der Motoren ist bei

$$v = 0 \quad L = 0$$

im Punkte A bzw. B ist

$$L_s = Z v_s \quad L_n = Z v_n,$$

die Verbindungsgeraden OA bzw. OB teilen die Fläche der zugeführten Arbeit in die Nutzleistung und in die Dreiecke OAC bzw. OAB der Anfahrverluste. Auch diese sind beim N.-Motor wesentlich größer.

Die starre Charakteristik des N.-Motors bewirkt, daß die aufgenommene Leistung proportional der Zugkraft steigt, d. h. der N.-Motor wird in einer großen

Steigung proportional mehr belastet, weil er seine Geschwindigkeit beibehält. Die Geschwindigkeit des R.S.-Motors läßt nach, daher wird dessen Beanspruchung entsprechend weniger zunehmen.

Aus dieser Darstellung sind die Mittel zu erkennen, mit deren Hilfe einerseits die Anfahrverluste herabgesetzt werden können, andererseits wie die Eigencharakteristik in eine Hyperbel konstanter Leistung überführt werden kann.

Gelingt es, die Betriebsspannung herabzusetzen, zu unterteilen, bzw. die Motorcharakteristik in einen anderen Geschwindigkeitsbereich zu verlegen, verminderen sich die Anfahrverluste dementsprechend, d. h. bei halber Spannung auf die Hälfte usw. Bei Gleichstrom steht für diesen Zweck eine beschränkte Stufenzahl durch die Reihen nebeneinander Schaltung (Abb. 155) zur Verfügung, bei Erreichung der Eigencharakteristik kann eine Feldschwächung (Abb. 155) zum Ziele führen. Diese ist bei Wendepolmotoren bis 50% Stromschwächung zulässig, die Nebenschlüsse vermindern jedoch die Betriebsicherheit.

Beim Wechselstrommotor kann dessen Geschwindigkeit mit dem Stufentransformator verlustlos geregelt werden.

Der Wechselstrommotor ist im allgemeinen magnetisch weniger gesättigt als der Gleichstrommotor, seine Charakteristik nähert sich sehr der Hyperbel konstanter Leistung, d. h. die Geschwindigkeitslinie fällt weniger steil ab als beim Gleichstrommotor, so daß bei denselben prozentischen Schwankungen vom Mittelwert viel weniger Reglerstufen nötig sind.

5. Parallelbetrieb. Der Reihenschlußmotor (Abb. 156) arbeitet in Parallelschaltung vollständig stabil, weil bei Zunahme der Drehzahl eines der parallel laufenden Motoren dessen Gegen-EMK wächst und damit die Stromstärke und das Drehmoment abnimmt, bis wieder Gleichgewicht mit dem Gegendrehmoment entsteht. Serienmotoren arbeiten auch stabil, wenn ihre Kennlinien nicht übereinstimmen; es stellt sich lediglich eine der für alle parallel laufenden Motoren eines Fahrzeuges identische Geschwindigkeit entsprechende Stromstärke bzw. Zugkraft ein, wobei die Summe der einzelnen Zugkräfte gleich dem zu überwindenden Widerstand sein muß.

Es ist dabei unzulässig, etwa zum Zwecke der gleichen Aufteilung der Leistung auf alle parallel geschalteten Motoren eine die Felder und Anker für sich parallel schaltende Ausgleichverbindung zu legen (Abb. 152c). Hierdurch wird die Grundlage des stabilen Verhaltens, das unveränderliche Verhältnis von Anker und Feldstrom gestört. Diese Tatsache wird klar, wenn man z. B. annimmt, die Erregung eines Motors werde unterbrochen. In diesem Falle tritt in dem mit den übrigen an einer bestimmten Spannung parallel liegenden Anker des betreffenden Motors ein Kurzschluß auf, weil die Gegen-EMK bis auf die Remanenz verschwindet.

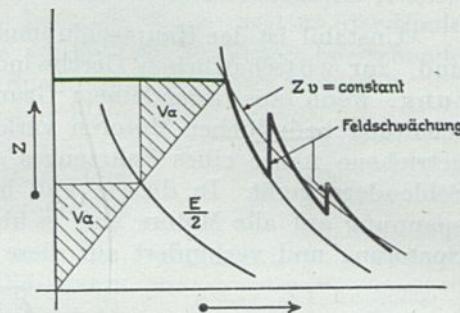


Abb. 155. Kennlinien für die Serienparallelschaltung und Änderung der Eigencharakteristik durch Feldschwächung.

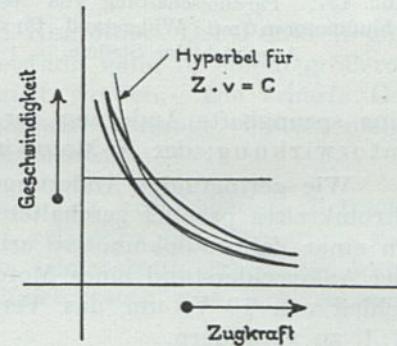


Abb. 156. Ungleiche Geschwindigkeit-Zugkraft-Kennlinien zweier Serienmotoren.

Zu dem Zwecke des Ausgleichs der Leistungen kommt auch die für den Generatorbetrieb zweckmäßige Kreuzschaltung von Anker und Feldern nicht in Betracht, weil in dieser Schaltung die Motoren unstabil arbeiten.

Nimmt z. B. der Anker des Motors I weniger Strom auf, schwächt er hierdurch das Feld des Motors II und daher dessen Gegen-EMK. Dieser Vorgang setzt sich fort, bis die Gegen-EMK des Motors I über die Netzspannung steigt. Motor I arbeitet daher als Generator ins Netz, wodurch Motor II umpolarisiert wird.

Unstabil ist der Hauptschlüsselmotor in der zur Verminderung der Anfahrverluste und zur wirtschaftlichen Geschwindigkeitsregelung gebräuchlichen Reihenschaltung, wenn aus irgendeinem Grund die mechanische Kupplung der in Reihenschaltung befindlichen Motoren verloren geht. Dieser Fall tritt ein, wenn eine angetriebene Achse eines Fahrzeuges, dessen Motoren in Reihe geschaltet sind, ins Schleudern gerät. In diesem Fall hört die gleichmäßige Verteilung der Klemmenspannung auf alle Motoren auf; es übernimmt der durchgehende Motor fast die ganze Spannung und verhindert auf diese Art das Anfahren, indem wegen seiner hohen Gegen-EMK die erforderliche Stromstärke nicht zufließt kann.

Abgesehen von der hiermit verbundenen Betriebsstörung bringt dieser Umstand bei Hochspannungsmotoren, die dauernd zu zweit in Reihe geschaltet sind, die Gefahr mit sich, daß die Kollektoren mit einer weit aus größeren Spannung beansprucht werden, als für welche sie gebaut sind. Um dieser Gefahr zu begegnen, baut man Doppelmotoren, deren Anker gemeinsam auf ein Zahnrad arbeiten, so daß eine mechanische Kupplung erzielt wird.

Der N.-Motor ist in Nebeneinanderschaltung unstabil. Geringe Geschwindigkeits- oder Spannungsänderungen bewirken

Abb. 157. Parallelschaltung von Nebenschlußmotoren mit Widerstand für den Ausgleich der Ströme.

eine sprunghafte Änderung der Stromstärke, sogar eine Umkehrung zur Generatorwirkung; der N.-Motor ist daher für den Parallelbetrieb ungeeignet.

Wie geringfügige Änderungen in der Geschwindigkeit oder im Widerstand des Stromkreises parallel geschalteter N.-Motoren genügen, lehrt ein Beispiel (Abb. 157). In einer Zahnradlokomotive arbeiten zwei N.-Motoren von je 100 PS nebeneinander, der Ankerwiderstand eines Motors beträgt $0,058 \Omega$, daher genügt ein EMK-Unterschied von 10 V, um das Verhältnis der Stromstärken in beiden Motoren auf 2:1 zu verändern.

Es gilt für Vollast:

$$J = 250 \text{ A}, \quad E_1 = E_2 + 10,$$

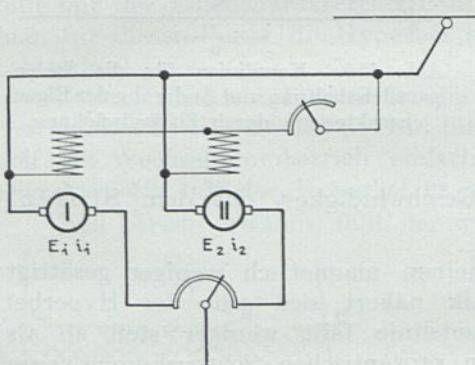
$$E_1 + i_1 \cdot 0,058 = E_2 + i_2 \cdot 0,058,$$

daher

$$i_1 = 82 \text{ A}, \quad i_2 = 168 \text{ A}.$$

Begegnet wird diesem Übelstand durch einen Ausgleichswiderstand gemäß der Schaltung Abb. 157.

Daß beim S.-Motor in Nebeneinanderschaltung keine Stromumkehr, also keine Generatorwirkung eintreten kann, geht aus seiner Geschwindigkeitscharakteristik hervor, die sich asymptotisch der Abszisse nähert. Die Umkehrung kann nur beim Wechsel der Geschwindigkeit oder was auf dasselbe herauskommt, wenn diese ihre Richtung nicht ändert, nach Umschalten des Ankers oder des Feldes eintreten.



Gegen den Nebenschlußmotor sprechen auch technologische Gesichtspunkte.

Der N.-Motor hat im Feld viele dünne Windungen, die mechanisch niemals so fest und sicher hergestellt werden können wie die Feldwicklung eines aus starken Drähten hergestellten R.-Motors.

Aus dem gleichen Grunde ist die Ausnutzung des Wickelraumes ungünstiger. In einem Wickelquerschnitt sind viele Isolationsschichten erforderlich, die außerdem an sich stärker bemessen sein müssen als beim R.-Motor, weil an der Spule die volle Betriebsspannung auftritt, wogegen die am Feld des R.-Motors herrschende Spannung kaum einige Prozent der gesamten Spannung ausmacht, dabei auch die Spannung gegen Erde sehr klein gehalten werden kann.

Die Selbstinduktionsspannung beim Ausschalten bildet dank der großen magnetischen Trägheit des Systems für die Feldwicklung eine Gefahr.

6. Vergleich mit der Dampflokomotive. Die Kennlinien (Abb. 152) eignen sich auch gut zur Beurteilung der Dampflokomotive, indem die Kennlinie der Dampflokomotive nahezu mit derjenigen des R.-Motors übereinstimmt. Für die Dampflokomotive gibt der Punkt A einen Grenzwert, die Reibungsgeschwindigkeit. Bei dieser ist die Lokomotivleistung die größte, indem die durch die Reibung begrenzte Zugkraft voll ausgenützt wird und auch diejenige größte Geschwindigkeit erreicht ist, welche die Kesselleistung noch erzielen läßt. Mit dieser Geschwindigkeit fördert die Dampflokomotive im allgemeinen die größte Tonnen-Kilometerzahl über eine gewisse Strecke. Jede Abweichung nach irgendwelcher Richtung beeinträchtigt die Leistung.

Nicht so die elektrische Lokomotive mit R.S.-Kennlinie. Der Punkt A gibt wohl die größte Leistung, aber nahezu dieselbe Leistung kann in einem größeren Arbeitsbereich mit gutem Wirkungsgrad erzielt werden. Die scharfe Geschwindigkeitseinschränkung, welche die Dampflokomotive verlangt, besteht nicht. Das elektrische Triebfahrzeug ist viel allgemeiner brauchbar.

7. Die Arten des Einphasen-Kollektormotors. Die vorstehenden Betrachtungen gelten für Gleich- und Wechselstrom und erläutern die Bedeutung der Reihenschlußcharakteristik eines Bahnmotors. Für Gleichstrom ist damit ohne weiteres gegeben, für welche Wicklungsart des Triebmotors man sich zu entscheiden hat.

Weniger einfach liegt die Sachlage beim einphasigen Wechselstrom, indem bei diesem die elektromechanische Energieumformung nicht nur durch die Zufuhr des Stromes zu den magnetisch verketteten Wicklungen, sondern auch durch Induktion erzielt werden kann. Es sind eine große Zahl von Schaltmöglichkeiten für die Motoren angegeben und auch entwickelt worden, die jedoch nicht gleichwertig sind, weil der für den Betrieb außerordentlich wichtige Kommutationsvorgang — die Stromwendung — sich nicht bei allen Bauarten gleich gut abspielt. Auch in bezug auf Phasenverschiebung arbeiten die verschiedenen Motorarten nicht gleich.

Die scharfen Anforderungen des Bahnbetriebes haben auch auf diesem Gebiete das weniger Wertige bald erkennen lassen.

Es darf behauptet werden, daß zurzeit die Motoren nach dem Induktionsprinzip mit oder ohne Ankererregung mit festen oder verschiebbaren Bürsten-

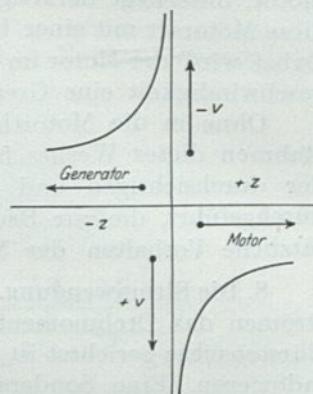


Abb. 158. Stromumkehr der Reihenschlußmaschine.

systemen — soweit Einzelleistungen von mehr als etwa 50 PS in Betracht kommen — der Geschichte angehören.

Alle diese Motoren kommutieren nur in der Nähe des Synchronismus gut; sie sind mehr oder weniger an einen kleinen in der Nähe des Synchronismus befindlichen Geschwindigkeitsbereich gebunden. Diese Motoren verlangen bestimmte Polzahlen, die nur dann zu guten Bauformen führen, wenn es sich um langsamlaufende Motoren handelt.

Der reine R.-Motor mit seiner Abart, dem doppeltgespeisten Reihenschlußmotor, unterliegt derartigen Einschränkungen nicht; es ist ohne weiteres möglich, diese Motorart mit einer bei allen Geschwindigkeiten guten Stromwendung zu bauen. Dabei wird der Motor im Gewicht leicht, da nur die Anker- bzw. Kollektorumfangsgeschwindigkeit eine Grenze bildet.

Ohne in die Motortheorie und Berechnung der Motoren — als nicht in den Rahmen dieses Werkes fallend — tiefer eindringen zu wollen, seien hier an Hand der durchsichtigen und klaren Betrachtungen Vallauris diejenigen Ableitungen durchgeführt, die zur Beurteilung einer Motorart nötig sind, nachdem das grund-sätzliche Verhalten der Neben- und Reihenschlußmaschinen schon bereinigt wurde.

8. Die Stromwendung. Das Hauptfeld — das ist dasjenige, welches mit den Ankerströmen das Drehmoment entwickelt und dessen Achse räumlich senkrecht auf die Bürstenachse gerichtet ist — kann im allgemeinen in der Ankerwicklung keine Ströme induzieren. Eine Sonderstellung nimmt jedoch die in der Bürstenachse befindliche durch die Kohlenbürste kurzgeschlossene Ankerspule ein, deren Achse mit dem Hauptfeld zusammenfällt. Diese Spule ist mit dem Hauptfeld transformatorisch verkettet und erzeugt in dieser statisch, also unabhängig von der Drehzahl, eine EMK, die mit dem Feld in Quadratur ist. Diese EMK bleibt hinter dem Feld um 90° zurück.

Durch den Umlauf im Ankerstreufeld entsteht wie bei jeder kompensierten Gleichstrommaschine die Stromwendedspannung, die in Phase mit dem Ankerfeld, daher in Phase mit dem Strom ist.

Der Effektivwert der statisch (transformatorisch) induzierten, in Quadratur mit dem Feld und Strom befindlichen Spannung ist

$$E_w = 6,28 w \sim F \cdot 10^8,$$

wo w die Windungszahl der kommutierenden Spule,

\sim die Periodenzahl und

F den effektiven Flux des Hauptfeldes pro Pol bezeichnet.

Zur Kennzeichnung der Phase läßt sich diese EMK in der Form

$$E_w = j \cdot k_2 I$$

ausdrücken; j ist die imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$.

Die durch diese Grundgleichung bestimmten Vorgänge sind ausschlaggebend für die Wahl der zurzeit am europäischen Kontinent vorherrschenden niedrigen Periodenzahl für Bahnen — 15 bis $16\frac{2}{3}$ — gewesen. Um für e_w den durch die stofflichen Eigenschaften der Kohlenbürsten bestimmten Wert von etwa 3,5 bis 4 Volt nicht zu überschreiten, muß die \sim möglichst niedrig sein, um noch für $w=1$ angemessene Poldimensionen zu erhalten.

Die Stromwendespannung ist

$$E_g = \xi v w A S L_0,$$

wo ξ eine Erfahrungszahl,

v die Ankerumfangsgeschwindigkeit,

w die Windungszahl für jedes Segment,

$A S$ die Ampèrestabzahl für den cm Ankerumfang und

L_0 die Motorbreite bedeutet.

Für eine bestimmte Maschine gilt

$$E_g = k_1 J n .$$

Gelingt es, ein zum Hauptfeld räumlich um 90° verschobenes Querfeld zu erzeugen, so wird dieses in der kurzgeschlossenen Spule eine EMK der Drehung erzeugen, welche in Phase mit dem Feld ist. Diese EMK sei

$$\eta = k_3 n \Phi .$$

Hieraus wird

$$\Phi = \frac{k_1 J n + j k_2 J}{k_3 n} = k_4 J + j k_5 \frac{J}{n} ,$$

die mit J phasengleiche Komponente hält der dynamischen Funkenspannung das Gleichgewicht, die dazu senkrechte ebenso der statischen.

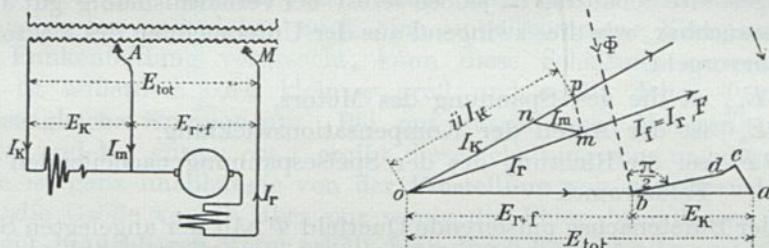


Abb. 159. Schaltung und Vektordiagramm des doppelt gespeisten Kollektormotors.

Bestünde die Möglichkeit, ein Querfeld Φ zu erzeugen, dessen Größe und Phase, d. h. dessen Vektor in Abhängigkeit von den beiden Betriebsvariablen J und n nach der obigen Formel verläuft, so wäre im ganzen Arbeitsbereich des Motors eine vollkommene Stromwendung gesichert.

Eine solche vollkommene Lösung ist nicht erreichbar.

Bei $n = o$, d. h. in dem für den Bahnmotor sehr wichtigen Betriebszustand des Anfahrens, müßte die unmögliche Bedingung befriedigt werden

$$\Phi = \infty .$$

Jenseits diesem, bei neuzeitlichen Motoren sehr geringen Prozentsatz des Gesamt-tourengebietes ist es möglich, die erforderliche Einstellung zu bewirken.

In bezug auf die Funkenspannung verhalten sich die verschiedenen Bauarten und Schaltungen ganz gleich; die abgeleiteten Beziehungen gelten daher allgemein.

Die verschiedenen Arten Kollektormotoren unterscheiden sich dagegen in bezug auf die Herstellungsweise der Gegenfunkenspannung bzw. des Querfeldes.

Diejenige Schaltung wird vorzuziehen sein, welche imstande ist, mit der kleinsten Aufwendung von Bau- und Betriebsumständlichkeiten die größte Annäherung an den als ideal erkannten, durch die obige Gleichung bestimmten Zustand zu erzielen.

Die Erfahrung hat die Zahl der gebräuchlichen Schaltungen stark verringert und zu zwei Hauptformen geführt, die als abgezweigte Reihenschaltung und als doppelte Speisung bezeichnet werden.

9. Der doppelt gespeiste Reihenmotor. Unter der letzteren allgemeinen Bezeichnung lassen sich verschiedene Schaltmöglichkeiten zusammenfassen, von welchen die hier an erster Stelle gesetzte insofern den anderen überlegen ist, als Feld- und Ankerstrom streng gleichphasig sind, die Drehmomentbildung daher am vorteilhaftesten vor sich geht (Abb. 159).

Über den elektromechanischen Umformungsprozeß erhält man durch Betrachtung der Wirkungsweise dieses Motors in den beiden Endstellungen des veränderlichen Mittelanschlusses A Einblick.

Fällt dieser mit dem Anschluß der Arbeits- oder Kompensationswicklung zusammen, arbeitet der Motor in reiner Reihenschaltung mit kurzgeschlossener Kompensationswicklung, d. h. die Leistung wird dem Rotor durch die Bürsten leitend zugeführt, am Anker herrscht praktisch die volle Arbeitsspannung.

Umgekehrt, wenn A an das andere Ende angeschlossen ist, erhält die Kompensationswicklung, die zur Arbeitswicklung wird, die volle Spannung und erzeugt durch Induktion die zur Drehmomentbildung erforderlichen Ströme.

In der amerikanischen Literatur wird dieser Motor auch Serien-Repulsionsmotor genannt.

In den Zwischenstellungen ist die an die Kompensationswicklung angelegte Spannung stets das Maß für den Anteil der induktiv auf den Anker übertragenen Leistung.

Die dargestellte Schaltung ist jedoch selbst bei verhältnismäßig gut ausgenützten Motoren unbrauchbar, wie dies zwingend aus der Untersuchung des Vektordiagramms (Abb. 159) hervorgeht.

$o a = E_{tot}$ ist die ges. Spannung des Motors,

$a b = E_k$ ist der Anteil der Kompensationswicklung,

$O F$ sei die Richtung des der Speisespannung nacheilenden Rotor- und Feldstromes.

Das in der Bürstenachse pulsierende Querfeld Φ hält der angelegten Spannung E_k das Gleichgewicht, wodurch Größe und Richtung von Φ eindeutig bestimmt ist. Der Vektor Φ muß auf die Gegen-EMK in der Kompensationswicklung senkrecht stehen. Es sind daher auch Größe und Phase der dieses Feld erregenden Amperewindungen gegeben. Diese resultieren aus den $A W$ der Kompensationswicklung und des Rotors.

Der Strom $J_k (on)$ in der Kompensationswicklung wird sich daher gegenüber $J_R (om)$, Rotorstrom so einstellen, daß unter Berücksichtigung der Windungszahl und des Wicklungsfaktors der beiden gleichachsigen Wicklungen, die für die Magnetisierung dieser gemeinsamen Achse resultierenden $A W$ die ganz bestimmte Größe und Phase $A W (pm)$ besitzen, wo mit Φ der mit den beiden gleichachsigen Wicklungen gemeinsam verbundene Flux bezeichnet wird. Von der Spannung e_k ist eine Teilspannung $(a c)$ entsprechend der Streuspannung der Kompensationswicklung \perp zu

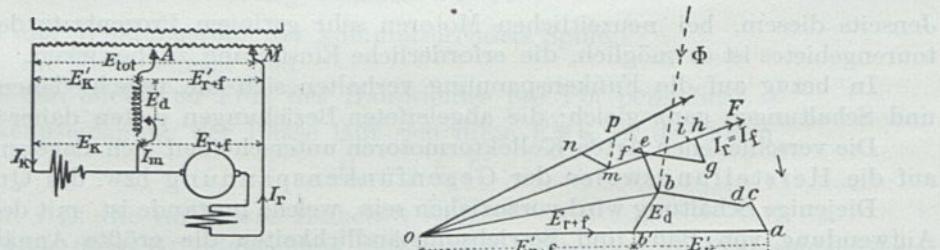


Abb. 160. Schaltung und Vektordiagramm des doppelt gespeisten Kollektormotors mit Drosselspule im Mittelleiter.

dem Vektor J_k und eine Teilspannung (cd) gleich und entgegengerichtet dem in derselben Wicklung auftretenden Ohmschen Spannungsabfall. Der resultierende Vektor (db) stellt die interessierende Querfeldspannung dar, welche die Größe und Phase des Querfeldes Φ bestimmt.

Da $o m = J_R = J_F$, so stellt diese Strecke in einem anderen Maßstab auch die Rotoramperewindungen dar. $mp \parallel \Phi$ und \perp auf bd stellt dann $A W_\Phi$ dar. Bedeutet \ddot{u} das Übersetzungsverhältnis der beiden Wicklungen, d. h.

$$\ddot{u} = \frac{\text{wirksame } AW \text{ der Komp.-Wicklung}}{\text{wirksame } AW \text{ der Rot.-Wicklung}},$$

so wird $op = \dot{u} J_k$ sein und in dem für die $A W$ gewählten Maßstab die Kompensations- $A W$ darstellen.

$$on = \frac{op}{u} = J_k$$

wird der Vektor des Kompensationsstromes und $nm = J_m$ derjenige des Mittelleiterstromes.

Der bereits angedeutete Mangel der betrachteten Schaltung geht aus diesem Vektordiagramm hervor: das Querfeld ist fast in Quadratur mit dem Hauptfeld, d. h. die mit J_R phasengleiche Komponente wird zu gering, als daß die dynamische Funkenspannung ausgeglichen werden könnte; die betrachtete Maschine wäre also eine schlechte Gleichstrommaschine.

Nur bei niedriger Drehzahl, bei welcher die absolute Größe dieser Funkenspannung niedrig ist und daher auch eine unvollkommene Kompensation keine unzulässige Funkenbildung verursacht, kann diese Schaltung verwendet werden, denn dann ist außerdem $\cos\varphi$ klein φ groß und erhält daher Φ eine größere mit J_r phasengleiche Komponente. Bei gut ausgenützten Motoren im normalen Tourengebiete und bei gutem $\cos\varphi$ ergibt diese Schaltung eine unzulässige Funkenbildung. Sie ist ganz unabhängig von der Einstellung von A unbrauchbar, da man durch diese die Größe von Φ , aber nur wenig die Phase beeinflussen kann.

Einen gut brauchbaren Motor erhält man durch Einschaltung einer Drosselspule in den Mittelleiter. Diese Schaltung ist bei vielen europäischen Lokomotiven mit bestem Erfolg benutzt worden. (Rhätische Bahnlokomotive Nr. 391, Wien-Preßburg 1 — B — 1 Lokomotive).

Das dieser Schaltung entsprechende Diagramm (Abb. 160) läßt sich nach dem oben Gesagten ohne weiteres ableiten. Das Diagramm läßt erkennen, daß der Winkel $F\Phi$ wesentlich kleiner als 90° ist; das Querfeld erhält daher einen größeren mit J_r phasengleichen Anteil, welcher die dynamische Funkenspannung ausgleicht.

Man hat es somit in der Hand, durch zweckentsprechende Einstellung der beiden verfügbaren Größen, d. i. der Spannung e_k und der Impedanz des Mittelleiters, Größe und Phase des Querfeldes Φ bzw. seine beiden Komponenten beliebig einzustellen.

Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß durch die Einstellung von E'_k in der Hauptsache die Größe, durch die Mittelleiterimpedanz in der Hauptsache die Phase des Querfeldes beherrscht werden können.

Die mit Motoren dieser Schaltung im schwersten Eisenbahnbetrieb gemachten Erfahrungen sind vorzüglich. Die Kollektoren sind nach einem sechsjährigen Betrieb mit Jahresleistungen bis zu 100 000 Lokomotivkilometern wie neu und stehen noch, ohne daß ein Abdrehen nötig oder in absehbarer Zeit zu erwarten wäre, im Betrieb. Drei Stufen am Mittelleiter erwiesen sich für einen Geschwindigkeitsbereich von 0 bis zum fünffachen Synchronismus als vollständig ausreichend.

10. Der Reihenschlußmotor mit abgezweigter Kompensation. Die eben behandelte Schaltung befriedigt insofern nicht, als sie nicht das erreichbar Einfachste darstellt. Der Spannungsteiler, die Mittelleiter-Drosselspulen und die zur Schaltung nötigen Schaltelemente sind im gedrängten Aufbau einer Lokomotive unerwünschte Zutaten. Man entledigt sich ihrer um so eher, als der reine Reihenschlußmotor mit der abgezweigten Kompensation, wie sie erstmalig von Behn-Eschenburg angegeben wurde, mit einfacheren Mitteln dieselben Ergebnisse erzielen läßt.

Im reinen Reihenschlußmotor sind F und Φ in Phase, weil nur ein Stromkreis vorhanden, daher $J_K = J_R = J_F$ ist. Wie aus dem Vektordiagramm (Abb. 161) hervorgeht, hat das Querfeld keine Komponente in der Richtung der statischen Funkenspannung, die Maschine ist dynamisch überkompensiert.

Schaltet man der Kompensationswicklung einen induktionsfreien Widerstand parallel, so erhält man eine zur Beherrschung der statischen Funkenspannung geeignete Teilspannung, indem die durch das pulsierende Querfeld in der Kompensationswicklung statisch induzierte Spannung im Ohmschen Widerstand einen phasengleichen Strom hervorruft, welcher die Phase des Kompensationsstromes gegenüber demjenigen des Rotorstromes verschiebt. Das von der resultierenden Erregung dieser beiden letzten Ströme erzeugte Feld ist nicht mehr in Phase mit den beiden Strömen und von der algebraischen Differenz der A-W. bestimmt, sondern ergibt sich aus der

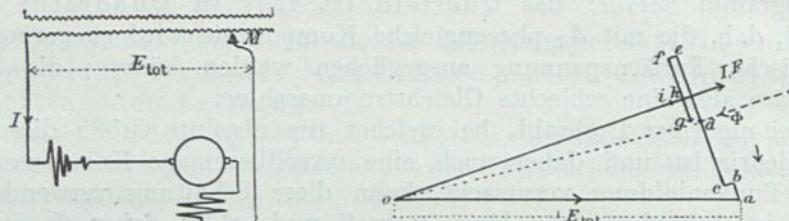


Abb. 161. Schaltung und Vektordiagramm des kompensierten Reihenschluß-Kollektormotors.

geometrischen Differenz derselben. Die bei der reinen Reihenschaltung fehlende, zu der Richtung des Hauptfeldes zeitlich senkrecht stehende Querfeldkomponente, welche zur Bekämpfung der statischen Spannung nötig ist, ist hier somit vorhanden.

Im Diagramm ist (Abb. 162)

$on = J_K$ der Strom in der Kompensationswicklung;
 $om = J_R$ der Strom im Nebenschlußwiderstand und
 $mn = J_W$ der Zweigstrom im Widerstand.

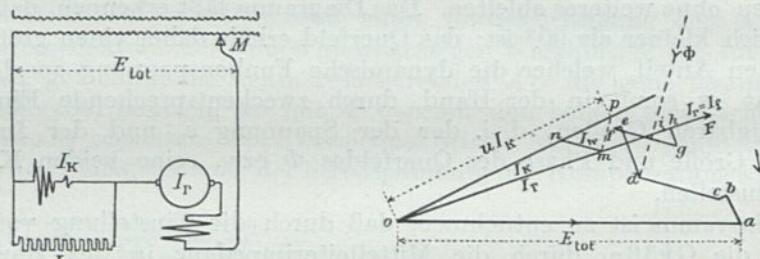


Abb. 162. Schaltung und Vektordiagramm des kompensierten Reihenschluß-Kollektormotors mit abgezweigter Kompensation.

Wenn in einem anderen Maßstab om die Rotor $A W$ darstellt, so wird $op = \ddot{u} J_k$ der Vektor der Kompensations- $A W$ und pm der Vektor der resultierenden Querfeld in Größe und Phase bestimmenden Querfeld $A W$.

Im Spannungsdiagramm bedeuten:

- $oa = E_{tot}$ Gesamtspeisespannung,
- $ab \perp J_k$ induktiver Spannungsabfall in der Kompensationswicklung,
- $bc \parallel J_k$ Ohmscher Spannungsverlust in derselben,
- cd die durch Φ induzierte Gegen-EMK $cd \perp \Phi$ und $\perp pm$,
- $de \perp J_R$ die Reaktanzspannung des Hauptfeldes in der Feldwicklung,
- ef Ohmscher Spannungsabfall in der Feldwicklung,
- $fg = \frac{cd}{\ddot{u}}$ die durch Φ in der Rotorwicklung induzierte EMK,
- gh induzierte Streuspannung } im Rotor,
- hi Ohmscher Spannungsabfall } im Rotor,
- $io \parallel F$ Gegen-EMK des Motors.

Zu der vollkommenen Stromwendung für sämtliche Betriebszustände genügt die Einstellung des Nebenschlußwiderstandes nicht. Hierzu müßte man an die Kompensationswicklung des Motors noch einen Serientransformator parallel schalten. Es ergibt sich, daß die Regelung dieses Transformators einer Regelung des Übersetzungsverhältnisses gleichkommt.

Bei einer Abart dieser Schaltung wird der Ohmsche Widerstand nicht mehr der ganzen Kompensationswicklung, sondern nur der inneren Spule, die in der Stromwendezone liegt und diese daher unmittelbar beeinflußt, parallelgeschaltet. Am übrigen Ankerumfang ist eine möglichst feldfreie Zone zu erstreben, was durch diese Schaltung besser erreicht wird, indem in der übrigen Kompensationswicklung ein mit dem Anker phasengleicher Strom fließt, welcher solcherweise die Ankerrückwirkung so vollständig als möglich aufheben kann. Ein weiterer Vorteil dieser Schaltung ist die Herabsetzung der Ohmschen Verluste im Nebenschlußwiderstand.

Untersucht man unter gegebenen Verhältnissen die hier behandelten beiden Schaltungsarten, ergibt sich, daß bei der beschränkten Stufenzahl eine den ganzen Arbeitsbereich des Motors umfassende Übereinstimmung nicht zu erzielen ist, daß jedoch die Abweichungen bei der abgezweigten Reihenschaltung kleiner sind als bei der doppelten Speisung.

Da weiterhin die abgezweigte Reihenschaltung auch weniger Schaltbehelfe und Hilfseinrichtungen benötigt, ist dieser Schaltung der Vorzug einzuräumen.

Nach dem heutigen Stande der technischen Entwicklung wird für die meisten vorkommenden Fälle der größeren Bahnmotoren die abgezweigte Reihenschaltung mit zum Wendefeld parallel gelegtem Widerstand vorzuziehen sein. Für den Anlauf kann durch Kurzschluß des Rotors eine Repulsionsschaltung erzielt werden, die bis zum Bereich des Synchronismus günstige Zugkraftverhältnisse und ein gutes $\cos \varphi$ gibt (Abb. 163).

Um die Auflösung dieses Kurzschlusses von der Tätigkeit des Führers unabhängig zu machen, überläßt man die Betätigung dieses Schalters einem Fliehkraftregler.

11. Gegenüberstellung des Wechselstrom- und Gleichstrommotors. Der neuzeitliche Einphasenbahnmotor ist ein kompensierter Gleichstromreihenschlußmotor mit geblättertem Statoreisen mit vielen Polen und vielen parallelen Ankerstromzweigen. Das praktische Verhalten gegenüber dem Gleichstrommotor ist nur im niedrigsten Drehzahlbereiche (etwa $\frac{1}{20} - \frac{1}{10}$) des Gesamtdrehzahlbereiches insofern verschieden, als Kurzschlußströme unter den Bürsten entstehen.

In anderer Hinsicht ist der Einphasenmotor dem Gleichstrommotor überlegen. Ersterer verlangt im Vergleich zu letzterem niedrige Betriebsspannungen — 250 bis 500 Volt gegen bis 1500 bis 2000 Volt — und daher große Stromstärken. Die großen Stromstärken führen im Bau des Motors zu keinen Nachteilen, dagegen ermöglicht die niedrige Betriebsspannung eine leichtere Isolation und eine größere Betriebssicherheit, und das ist im Bahnbetrieb nicht zu unterschätzen. Die Bemessung der Zuleitungen und Strombelastung der Schalteinrichtung kann durch Reihenschaltung mehrerer Motoren in mäßigen Grenzen gehalten werden.

Die niedrige Betriebsspannung des Einphasenmotors erhöht die gesamte Baustoffwirtschaft der elektrischen Vollbahnlokomotive auch insofern, als durch dieselbe die elektrischen und mechanischen Baubedingungen in bezug auf Raum und Gewicht in Übereinstimmung gebracht werden können. Diesbezüglich ist vor Augen zu halten, daß z. B. Hochspannungsschalter aus mechanischen Gründen viel kräftiger und schwerer bemessen sein müssen, als es die elektrische Beanspruchung verlangt,

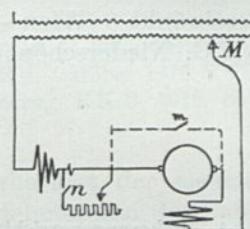


Abb. 163. Schaltung des Reihenschlußmotors mit zur Wendespule parallel gelegtem Widerstand. Anfahrt mit kurzgeschlossenem Anker.

wogegen umgekehrt Niederspannungsapparate meist schon aus elektrischen Gründen so bemessen sind, daß sie auch den mechanischen Beanspruchungen genügen.

12. Gleichstrombetrieb mit Wechselstromeinrichtungen. Der Wechselstromkollektormotor in seiner einfachsten Schaltung als Hauptschlußmotor läßt sich ohne weiteres auch mit Gleichstrom betreiben. Ursprünglich sah man hierin einen wichtigen Vorteil dieser Motorart und sind insbesondere in den Vereinigten Staaten anfänglich alle Wechselstromüberlandbahnen so gebaut worden, daß die Fahrzeuge im Bereich der Städte mit niedrig gespanntem Gleichstrom, auf den Überlandstrecken mit hochgespanntem Wechselstrom verkehrten konnten. Selbst die einen schweren Vollbahnbetrieb aufweisende N.Y.-N.H.-H.R.R. ist mit diesem System ausgerüstet worden. Dieses Zwittersystem hat sich wegen der Umständlichkeit der für die beiden Stromarten ganz verschiedenen beschaffenen Steuerungseinrichtungen nirgends voll bewährt. Die Anwendung blieb daher auf Einzelausführungen beschränkt. (Wien—Baden, Rotterdam—Haag—Scheweningen, Versuchsbetrieb der A.E.G. Niederschöneweide—Cöpenick, New York-New Haven—Hartford-Bahn.)

IV. Die elektrodynamische Bremsung.

Literatur:

- Abt. Sicherungsvorrichtungen an Steilbahnen. Z.f.K.B. 1919.
 Behn-Eschenburg. Anlage zur Nutzbremsung von Fahrzeugen mit Kommutatormotoren für Einphasen-Wechselstrom. E.T.Z. 1918. H. 49. E.u.M. 1918. H. 52.
 Behn-Eschenburg. Versuchsfahrten einer Wechselstromlokomotive mit elektrischer Nutzbremsung. Sch.B.Z. 1919. Bd. 74. Nr. 7.
 Benischke. Die Wechselstrom-Nebenschlußmaschine als Motor und Nutzbremsse. E. u. M. 1920. H. 7. Blondel. E.E. Febr. 1904.
 Boveri. Versuche über Energierückgewinnung auf einer Einphasenlokomotive. B.B.C.M. 1920. Nr. 11.
 Braun. Über die Bedeutung elektromagnetischer Schienenbremsen. E.K.B. 1919. H. 27.
 Brown-Boveri Co. Mitteilungen. Versuche mit Schienenbremsen. 1917.
 Coors. Regenerative electric braking on the lokomotives of the C.M. & St.P.Ry. G.E.R. 1918. Nr. 6.
 ** Système de freinage avec récupération d'énergie pour véhicules actionnés par moteurs monophasés à collecteur. G.C. 1918. S. 347.
 Frankl. Über Selbsterregung und Nutzbremsung von Reihenschluß-Kommutatormaschinen für Ein- und Mehrphasenstrom. E. u. M. 1912. H. 33.
 Funke. Elektromagnetische Schienenbremse. E.B. 1905. H. 21.
 Heilfron. Über einige neuere Fragen aus dem elektrischen Vollbahnwesen. (Arbeitsrückgewinnung.) E.T.Z. 1910. H. 13.
 Hellmund. Regenerative braking of electric vehicles. Proc. 1917.
 Kindler. Erfahrungen mit verschiedenen Bremsarten bei der Berliner Straßenbahn. E.K.B. 1921. H. 10.
 Kummer. Über elektrisches Bremsen mit Wechselstrom-Serien-Motoren. E.K.B. 1907. H. 19.
 Kummer. Kraftbedarf der Gotthardbahn. Sch.B.Z. 1912. Bd. 59. Nr. 11.
 Kummer. Das Urteil über die Energierückgewinnung bei elektrischen Bahnen. Sch.B.Z. 1918. Bd. 71. Nr. 18.
 Kummer. Die relative Energieersparnis durch die Nutzbremsung bei elektrischen Bahnen. Schw.B.Z. 1920. Bd. 75. Nr. 11.
 Kummer. Über Betriebskurven und Betriebsicherheit verschiedener Verfahren der Nutzbremsung. Sch.B.Z. 1921. Bd. 77. Nr. 13.
 Lafontaine. Nouveau système de traction autoregulateur. T.M. Bd. VIII. Nr. 6.
 Linebaugh. Regenerative electric braking. G.E.R. Nov. 1916.
 Luithlen. Schienenbremsen bei österreichischen Bahnen. E.K.B. 1918. H. 3.
 Mandl. Die Bremsung des Serienmotors. E.u.M. 1920. H. 36.
 Mester. Emploi du système à récupération Raworth sur les voitures de tramways. G.C. 1910. S. 372.
 Müller. Gegenstrom und Kurzschlußbremsung bei Reihenschlußkommutatoren. E.K.B. 1911. H. 32.
 Müller. Die elektrische Bremsung der Straßenbahnwagen. E.T.Z. 1902. H. 24.
 Müller. Die Entwicklung der elektromagnetischen Schienenbremsen. E.K.B. 1921. H. 10.
 Magnetbremsen-Gesellschaft, Berlin. Elektromagnetische Schienenbremsen 1912.
 Elektromagnetische Schienenbremse Bauart Braun. Z.V.D.I. 1909.

- Monath. Einige Verfahren und Schaltungen zur Nutzbremsung von Wechselstromlokomotiven. E.K.B. 1919. H. 27.
- Naumann. Über Versuche mit elektromagnetischen Schienenbremsen. E.T.Z. 1911. H. 2.
- Niethammer-Siegel. Über die Nutzbremsung von Wechselstromkommutatormotoren mit Seriencharakteristik. E. u. M. 1912. H. 35.
- Perret-Cauwenbergh. Die 1200 bis 1500 PS-Wechselstromlokomotive der französischen Südbahn. E.K.B. 1911. H. 27.
- Reutener. Nebenschlußtriebwagen und ihre Verwendung auf Gebirgsstrecken. E.K.B. 1913. H. 14.
- Rusch. Nutzbremsung der wichtigsten Kollektormotoren. E. u. M. 1911. H. 1.
- Sauveur. Gegen die rein elektrische Bremsung der Straßenbahnwagen. E.K.B. 1919. H. 20.
- Schenkel. Stromrückgewinnung bei Wechselstrombahnen. E.T.Z. 1920. H. 28. Ref. E.u.M. 1920. H. 52.
- Scherbius. Über Selbsterregung und Nutzbremsung von Maschinen mit Reihenschlußcharakteristik. E.T.Z. 1912. H. 49.
- Seefehlner. Die Rittnerbahn. E.K.B. 1908. H. 29.
- Seefehlner. Die elektrische Bahn Triest—Opcina. E.B. 1904. H. 14.
- Seefehlner. Die Nutzbremsung elektrischer Fahrzeuge im Eisenbahnbetrieb. E. u. M. 1917. H. 34. E.K.B. 1917. H. 24.
- Seefehlner. Zur Frage der rein elektrischen Bremsung der Straßenbahnwagen. E.K.B. 1919. H. 24.
- Volkers. Für die rein elektrische Bremsung der Straßenbahnwagen. E.K.B. 1918. H. 30. u. 1919 H. 16.
- Whittaker. D.C. Regenerative lokomotive on the Erie & Northern Ry. E.R.J. Oktober 1916. S. 730.
- Wolf. Neuere Schaltungen für elektrische Energierückgewinnung und Bremsung. E.K.B. 1916. H. 6. Regenerative braking with single-phase commutator motors. El. Juli 1919. S. 57.

1. Arten der elektrodynamischen Bremsung. Die Umkehrbarkeit der elektromechanischen Energieumformung bietet die Möglichkeit die Triebmotoren der Fahrzeuge zur Bremsung heranzuziehen. Hierbei kann die Bremsung unmittelbar oder mittelbar durch mit dem Bremsstrom betätigtes Behelfe bewirkt werden.

Beide Systeme kommen für Fahrzeuge in Betracht, die mit Gleichstrom-Reihenschlußmotoren angetrieben werden. Für beide Bremsmethoden ist die Bezeichnung Kurzschlußbremsung gangbar, indem die Motoren durch relatives Wechseln der Erregerwicklung in bezug auf den Anker in die Generatorwirkung überführt werden können.

Wird der gesamte, dem Fahrzeug innwohnende Kraftüberschuß durch die Triebmotoren in elektrischen Strom umgeformt und Widerständen zugeführt, liegt der Fall der unmittelbaren Bremsung vor.

2. Die unmittelbare Kurzschlußbremsung. Bei dieser Bremsart müssen die Motoren, welche die Umformung der Arbeit bewirken und die Widerstände, welche umgeformte Arbeit aufnehmen, von den Übertragungsverlusten abgesehen, für die ganze Bremsleistung des Fahrzeuges bemessen werden.

Diese Bremsmethode ist für allein fahrende Motorwagen fast ausschließlich gebräuchlich, sofern man von der elektrischen Bremsung nicht überhaupt absieht.

Diese Art der elektrischen Bremsung (Abb. 164) — gemeint ist hierbei die elektrische Kurzschlußbremsung überhaupt — weist den nicht unerheblichen Nach-

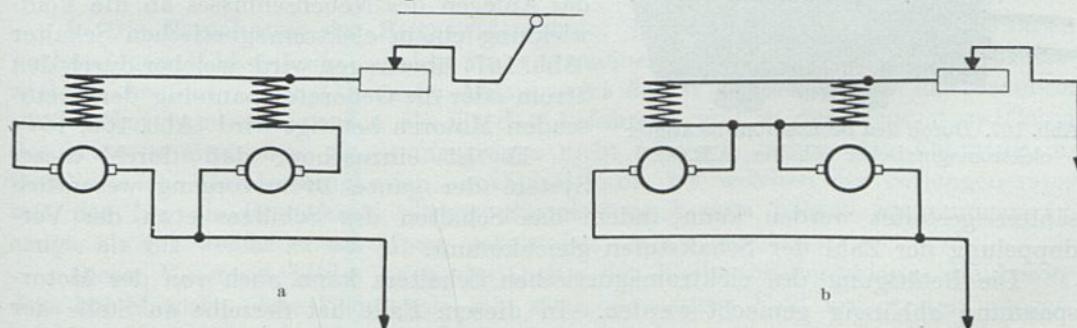


Abb. 164. Schaltung zweier Reihenschlußmotore für unmittelbare Kurzschlußbremsung.
a) Fahrt, b) Bremse.

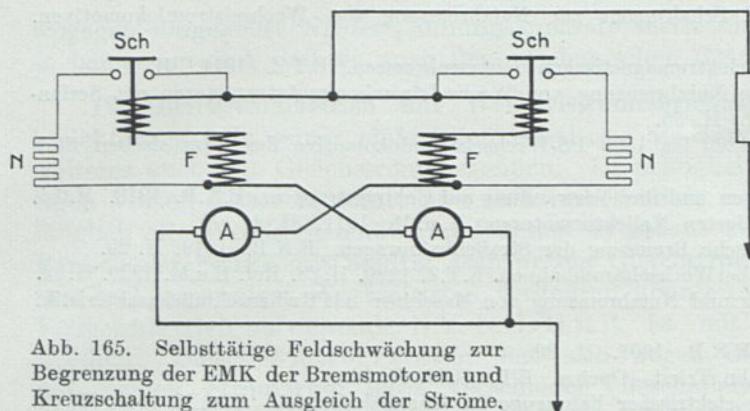


Abb. 165. Selbsttätige Feldschwächung zur Begrenzung der EMK der Bremsmotoren und Kreuzschaltung zum Ausgleich der Ströme.

stärke kann daher in bedenklichem Maße anwachsen; da selbsttätige Schalter oder Sicherungen im Bremsstromkreis unzulässig sind, bildet nur die Reibung zwischen Rad und Schiene eine Grenze für das Anwachsen des Stromes.

Abgesehen von diesen grundsätzlichen Mängeln der elektrischen Kurzschlußbremse — die sich im Betriebe auf ein praktisch zulässiges Maß begrenzen

lassen — beschränkt sich die Anwendung der Kurzschlußbremse auf Betriebe mit verhältnismäßig kleinen Zugsgewichten, weil mit Zunahme der Zugsgewichte die erwähnte Gefahr der momentanen Überlastung der Motoren wächst und weil schwere Züge verhältnismäßig schwere Widerstände zur Vernichtung der Bremsenergie erfordern.

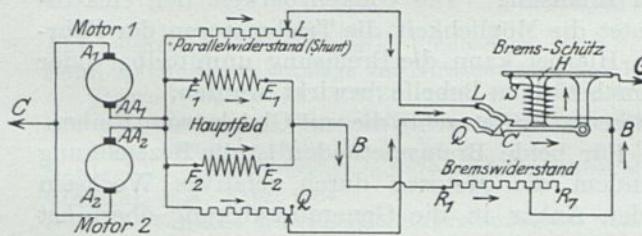


Abb. 166. Selbsttätige Feldschwächung zur Begrenzung der EMK der Bremsmotoren. Ausgleichschaltung, Zugspule im Hauptstromkreis.

Die direkte elektrische Bremse wird im allgemeinen nur bei Straßenbahnwagen mit 2 bis 4 je 50 bis 60 pferdigen Motoren angewendet.

Das Anwachsen der Spannung über das zulässige Maß kann durch Feldschwächung begrenzt werden; diese darf jedoch nicht auf alle Fälle vorgenommen werden, weil sonst das Einsetzen der Bremswirkung verzögert oder die Selbsterregung überhaupt in Frage gestellt wird. Dieser Übelstand läßt sich dadurch umgehen, daß das Anlegen des Nebenschlusses an die Feldwicklung einem elektromagnetischen Schalter (Abb. 167) übertragen wird, welcher durch den Strom oder die Generatorenspannung der bremenden Motoren betätigt wird (Abb. 165, 166).

Es ist einzusehen, daß durch dieses System der ganze Bremsvorgang wesentlich sanfter gestaltet werden kann, indem das Schalten des Schützes etwa der Verdoppelung der Zahl der Schaltstufen gleichkommt.

Die Betätigung des elektromagnetischen Schalters kann auch von der Motorspannung abhängig gemacht werden. In diesem Falle hat derselbe an Stelle der vom Ankerstrom betätigten Zugspule eine solche zu erhalten, die parallel zum Anker im Nebenschluß liegt. Da man dünnrähtige Nebenschlußwickelungen, die an der

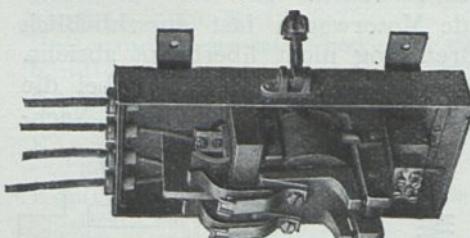


Abb. 167. Durch den Bremsstrom betätigter elektromagnetischer Schalter (A.E.G.).

vollen Betriebsspannung liegen, im Bahnbetriebe gerne vermeidet, ist die erstgenannte Anordnung mit einer mechanischen festen Spule mit wenigen Windungen gebräuchlicher.

Diese Schalter unterbrechen die Ströme nur mit den an den Feldspulen liegenden geringen Spannungswerten; da überdies die Schaltung so getroffen werden kann, daß die Felder an Erde liegen, ist diese Anordnung sehr betriebssicher und verlangt wenig Instandhaltung.

3. Die gemischte Bremsung (Abb. 168). Beide Mängel — Gefährdung der Motoren bei heftigen nur durch das Reibungsgewicht begrenzten Bremsungen und schwere Bremswiderstände — können wesentlich gemildert werden, wenn man auf die mittelbare Bremsung übergeht, d. h. den Motorstrom zur Betätigung besonderer elektromagnetischer Bremseinrichtungen verwendet. Üblich ist, den Motorwagen mit den Motoren abzubremsen, die Beiwagen dagegen mit durch den Kurzschlußstrom durchflossenen Solenoidbremsen, die das Bremsgestänge der Klotzbremsen betätigen. Da die Erregerenergie der Solenoide verhältnismäßig gering ist, werden bei dieser Methode die Motoren nur mit der Bremsenergie, die dem Gewichtsanteil des Motorwagens am Zugsgewicht entspricht, beansprucht.

Diese Vermischung der unmittelbaren mit der mittelbaren Bremsung weist den Nachteil auf, daß die eben geschilderte Aufteilung der Bremsleistung zwischen den Motoren und den Radreifenbremsen an den Beiwagen davon abhängig ist, wie die Kennlinien der Motoren geartet sind.

Sind in einem Betriebe verschiedene geartete Motoren vorhanden, d. h. Motortypen, die für eine bestimmte Stromstärke nicht dieselbe Zugkraft aufweisen, wird die Aufteilung der Bremsleistung verschieden sein.

4. Die mittelbare elektromagnetische Bremsung. Es ist folgerichtiger, von der Generatorwirkung der Triebmotoren nur insofern Gebrauch zu machen, als man eine von der Fahrleitung unabhängige Stromquelle braucht, um die auf allen Fahrzeugen angebrachten elektromagnetischen Bremsen zu betätigen. Es ist dann nicht nötig, die Zugsspulen der Magnetbremsen für diejenigen großen Stromstärken auszulegen, die bei der gemischten Bremsmethode erforderlich sind, damit die Triebmotoren ihrerseits die erforderliche Bremskraft ausüben können.

5. Die Berechnung der Bremswiderstände. Die zum Anfahren am Triebwagen vorhandenen Widerstände werden im allgemeinen auch zur Regelung der Bremswirkung benutzt. Der Ohmsche Anfangswert des Widerstandes für das Bremsen muß höher bemessen werden als für das Anfahren, weil in der Generatorwirkung der Motoren eine obere Spannungsgrenze nicht festliegt, indem das Fahrzeug im Gefälle solche Geschwindigkeiten annehmen kann, bei welchen der Seriengenerator mit der für die Bremskraft nötigen Stromstärke bereits höhere Spannungen erzeugt, als für welche er als Motor gebaut ist.

Dieser Umstand bildet auch die Quelle der Kollektorüberschläge, die besonders bei Motoren ohne Wendepole mit stark verzerrtem Feld aufzutreten pflegen.

Der Höchstwert des Bremswiderstandes muß demnach nicht mit Rücksicht auf die im weiteren verlangte Verzögerung bzw. Bremskraft bemessen werden, sondern

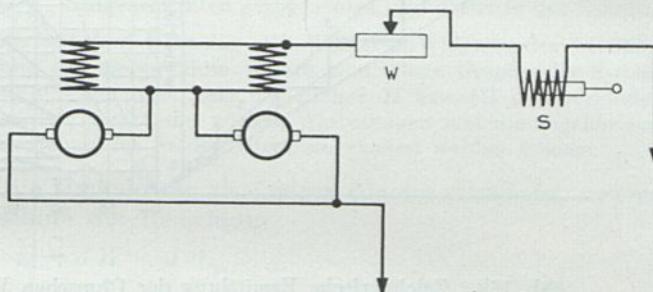


Abb. 168. Schaltplan für mittelbare und gemischte elektrodynamische Bremsung.

mit Bedacht darauf, daß bei einer Bremsung von der praktisch vorkommenden Höchstgeschwindigkeit die dem Motor zuträgliche Spannung nicht überschritten werde.

Die Spannungscharakteristik für die fragliche Geschwindigkeit gibt hierüber Aufschluß. Im allgemeinen wird man gut tun, höchstens eine um 20% erhöhte Bremsspannung zuzulassen.

Für diese Art der Bemessung des Bremswiderstandes spricht auch der Umstand, daß es vom Standpunkt der Reisenden und auch zur Schonung der Fahrzeuge vom Vorteil ist, wenn die Bremsung zunächst sanft — mit einer verhältnis-

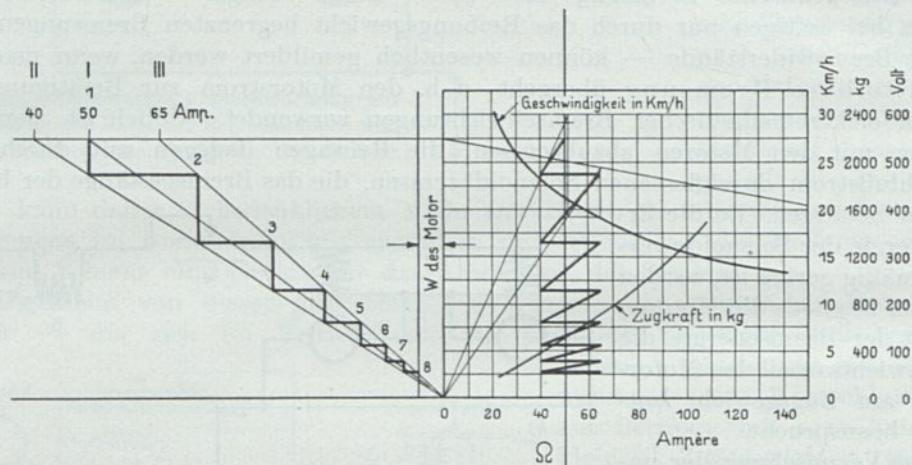


Abb. 169. Zeichnerische Ermittlung der Ohmschen Werte der Bremswiderstände aus den Kennlinien der Triebmaschine.

mäßig kleinen Verzögerung — einsetzt. Wenn die Fahrgäste durch die ange deutete Bremswirkung ihr Muskelsystem entsprechend gespannt haben, können sie eine verhältnismäßig viel größere, vom Standpunkt des Bahnbetriebes im allgemeinen wünschenswerte Verzögerung vertragen, als wenn die Bremsung auf einmal ohne Vorbereitung einsetzt. Für das Fahrzeug ist dieser Vorgang deshalb von Vorteil, weil auf dem langen Weg der Kraft vom Ankerumfang über die Lager und Zahnräder zum Radumfang einerseits und das Untergestell andererseits zahlreiche freie Spiele — Totgänge — vorhanden sind, so daß die Kraftübertragung mehr oder weniger hintereinander erfolgt. Die große Beschleunigungskraft des Ankers trifft zunächst unverhältnismäßig kleine Massen und verursacht in diesen heftige Stöße; erst bis das ganze System in Spannung ist, tritt der gewünschte Grad der Beschleunigung auf. Diese Übelstände werden durch eine gewissermaßen vorbereitende Bremsstufe vermieden.

Aus der Zugkraftkurve des Motors kann man unter Hinzufügung der mechanischen Verluste mit für den Zweck ausreichender Genauigkeit die Bremskraftkurve ableiten. Aus dieser ergibt sich die entsprechende mittlere Stromstärke, von welcher man entsprechend der Stufenzahl des Bremsschalters Schwankungen nach oben und unten zulassen muß.

Der Vorgang der Berechnung der Bremswiderstände läßt sich an Hand eines Beispieles am klarsten ableiten.

In Abb. 169 sind die Kennlinien eines Motors für 550 Volt Klemmenspannung dargestellt. Die den verschiedenen Stromstärken entsprechenden EMKe erscheinen durch die vom Spannungswert 550 Volt dem Motorwiderstand entsprechend schief gezogene gerade Linie dargestellt. Die Höchstgeschwindigkeit soll 30 km/h betragen und hiebei die Verzögerung auf der ersten Stufe 0,2 m/sek² nicht überschreiten. Das Wagengewicht je Motor sei 10 t, die Strecke habe ein Gefälle von 40 %, der Zugwiderstand sei 6 kg/t. Die erforderliche Bremskraft ist

$$40 \cdot 10 + 0,2 \cdot 1000 - 10 \cdot 6 = 540 \text{ kg}.$$

Dieser Zugkraft entspricht eine Stromstärke von 50 Amp. Bei dieser Stromstärke läuft der Motor mit der Geschwindigkeit von 21,0 km/h. Der Geschwindigkeit von 30 km/h entspricht, wie aus der Ähnlichkeit der Hilfsdreiecke hervorgeht, die EMK 750 V. Hieraus folgt, daß der Motor bei 30 km/h nicht mit dieser Stromstärke belastet werden sollte. Man müßte sich im fraglichen Gefalle mit einer kleineren Bremskraft — Verzögerung etwa 0,1 m/sec² — 440 kg begnügen oder, sofern der gewählte Motor beibehalten werden soll, bezüglich der Geschwindigkeit derartige Maßregeln treffen, daß etwa 25 km/h nicht überschritten werden.

Der ersterrechnete Spannungswert von 750 Volt darf jedoch dann zugelassen werden, wenn es sich um eine Motortype handelt, die mit entsprechend verminderter Stromstärke auch mit der höheren Spannungsstufe verwendet werden darf. Dieser Fall kommt oft vor, denn es ist üblich, die Motorreihen so auszulegen, daß sie mit der niedrigeren Spannungsstufe von etwa 550 Volt langsamlaufend und mit der nächst höheren Regelspannung von etwa 750 Volt schnelllaufend verwendet werden können.

Um die Darstellung nicht durch weitere Linien zu verwirren, sei angenommen, dieser Fall liegt vor und lassen es bei der Sachlage bewenden.

Wenn für die Stromstärke ein Maßstab entsprechend b A, für die Spannung a V und für den Widerstand $c \Omega$ in der Längeneinheit gewählt wird, so erhält man, wenn parallel zur Ordinate eine Gerade in der Entfernung von $d = \frac{a}{bc}$ Längeneinheiten gezogen wird, auf dieser in den Schnittpunkten der Verbindungslien der EMK mit dem Ursprung den Wert des Widerstandes in Ohm.

Ähnlich erhält man den Widerstand für die gewählte untere und obere Grenze der Stromstärke. Trägt man diese Werte bei $v = 30$ km/h nach links auf nach I, II bzw. III und verbindet diese Punkte mit o , so gibt die Zickzacklinie direkt die nötigen Abstufungen und die zugehörigen Geschwindigkeiten, die bei richtiger Betätigung des Fahrschalters eingehalten werden müssen.

Das Verfahren ist demnach die Umkehrung desjenigen für das Anfahren, indem die für die EMK der Serienmaschine die Beziehung

$$E = JW + JW_m,$$

wo J die Stromstärke,

W_m den Motorwiderstand und

W den Bremswiderstand

bezeichnet. Da E proportional der Drehzahl bzw. der Geschwindigkeit und der Stromstärke ist, gilt

$$cJn = JW + JW_m,$$

somit

$$cn = W + W_m.$$

Die verschiedenen Werte für W bei gegebener Stromstärke liegen auf einer geraden Linie, das sind eben die in obiger Darstellung eingeführten Linien I o, II o und III o.

Vom Werte W des Bremswiderstandes sind die Widerstände der betätigten Zugspulen der Bremsmagnete abzuziehen. Wenn der Strom mehrerer parallel geschalteter Motoren die Widerstände durchfließt, sind diese mit dem $\frac{1}{2}$ bzw. $\frac{1}{4}$ Ohmschen Wert, jedoch entsprechend höherer Kapazität auszulegen.

6. Bremsschaltungen. Nachdem Straßenbahnen überwiegend zumindest mit zwei Triebmotoren ausgerüstet sind, ist das Verhalten dieser als parallel, auf einen Widerstand arbeitende Generatoren zu untersuchen.

Es ist praktisch unmöglich, auch nur zwei Maschinen derselben Type genau gleich herzustellen. Dieser Umstand ist für das Verhalten von selbsterregenden Hauptschlußmaschinen, die in Parallelschaltung arbeiten sollen, ausschlaggebend.

Von der Annahme verschiedener Kennlinien (Abb. 170) bei gleicher Geschwindigkeit ausgehend, ist zu ersehen, daß dieser Zustand nicht stabil sein kann, weil eine geringfügige Änderung, z. B. die Zunahme der Stromstärke der Maschine I,

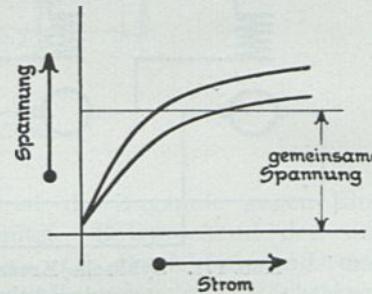


Abb. 170. Verschiedene Kennlinien $E = f(J)$ von zwei Hauptschlußgeneratoren in Parallelschaltung.

ein Wachsen der Spannung und damit ein weiteres Steigen der Stromstärke I und gleichzeitige Abnahme der Stromstärke der Maschine II bewirkt. Die Summe der Ströme muß nahezu konstant bleiben, weil eine gegebene Bremskraft vorausgesetzt wird. Hieraus folgt, daß dieser Zustand rasch zu einem Kurzschluß über die Maschine II bzw. zur Umpolarisierung der Letzteren führen muß.

In Wirklichkeit ist der Vorgang insofern ein anderer, als die Motoren — entsprechend der Fahrtrichtung in Generatorschaltung — noch unerregt an einen Widerstand gelegt werden. Erregt sich z. B. Motor I früher als Motor II, geht mit Rücksicht darauf, daß der Widerstand der Motoren wesentlich kleiner sein muß als der Bremswiderstand, der überwiegende Teil des Stromes durch Motor II und polarisiert diesen um. Die beiden Motoren arbeiten hintereinander in Kurzschluß. Durch Anlegen der in Abb. 164 b gezeichneten Verbindung ist das Ummagnetisieren des Motors II verhindert.

Aus demselben Grunde sind bei Fahrt im Gefälle — also stromlos — die Stromkreise sonst parallel geschalteter Motoren zu lösen oder, wenn dies in der Steuerung nicht vorgesehen ist, darf in Fahrt selbst ohne Strom die Schaltrichtung der Felder nicht gewechselt werden, weil sonst unvermeidlich unkontrollierbare Bremswirkungen entstehen. Dasselbe ist der Fall, wenn ein Wagen mit in Parallelschaltung befindlichen Motoren von einem anderen Fahrzeug in der anderen Fahrtrichtung geschleppt wird, als in welcher die Motoren vor dem Abstellen Strom aufgenommen hatten.

Diese Umstände lassen es wünschenswert erscheinen, die Steuerungen so zu bauen, daß in der „Aus“stellung keine Parallelschaltungen vorhanden sind.

Streng ausgeglichen und stabil wird der Parallelbetrieb zweier oder mehrerer Hauptschlüssegeneratoren, wenn man die Generatoren sich wechselweise erregen läßt. Die diesbezügliche Schaltung ist unter dem Namen Kreuzschaltung (Abb. 171) gebräuchlich und setzt voraus, daß bei mehreren Motoren Felder und Anker zirkisch vertauscht sind.

Ist eine Verschiedenheit der EMKs vorhanden, so entsteht dem Unterschied der EMKs entsprechend ein Ausgleichstrom, der, vom Anker des Motors mit höherer

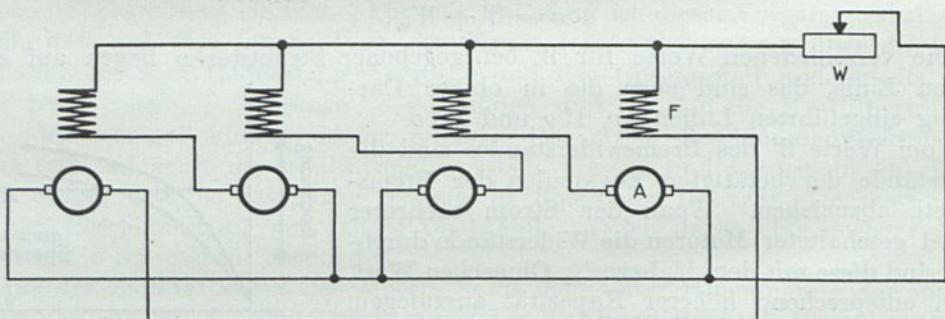


Abb. 171. Zyklische Kreuzschaltung zur Kurzschlußbremsung von vier Motoren.
A = Anker; F = Feld; W = Bremswiderstand.

Spannung ausgehend, das Feld der anderen Maschine mit kleinerer EMK durchfließt und diese steigert, im eigenen Feld der Erregerstromrichtung entgegengesetzt wirkend, die bestandene höhere EMK vermindert.

Befinden sich die Motoren in Fahrt in Reihenschaltung, kann nach Angaben der A.E.G. eine Bremschaltung vorgesehen werden, die auf der Voraussetzung beruht, daß der remanente Magnetismus zweier Motoren praktisch nie gleich groß ist. In Abb. 172 ist die Schaltung für Fahren und Bremsen dargestellt; man sieht, daß, wenn z. B. Motor II sich früher oder stärker erregt, hierdurch der Motor

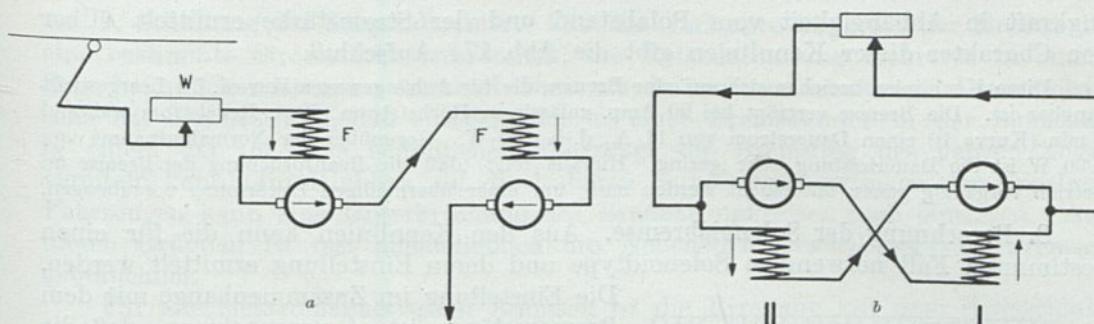


Abb. 172. Bremsschaltung der A.E.G.: a = Fahrt; b = Bremsung.

zweimal ummagnetisiert wird, aber im übrigen als Generator gemeinsam mit Motor I auf den Bremswiderstand arbeitet.

7. Elektromagnetische Solenoidbremsen (Abb. 173) sind Zugmagnete, die durch den Generatorstrom der Triebmotoren erregt werden. Der magnetische Stromkreis besteht aus einem zylindrischen einseitig geschlossenen Gehäuse aus Stahlguß bzw. neuerdings aus Gußeisen und einem achsial beweglichen einseitig konisch verjüngten Stahlkern, welcher das Gestänge der Klotzbremse betätigt. Das

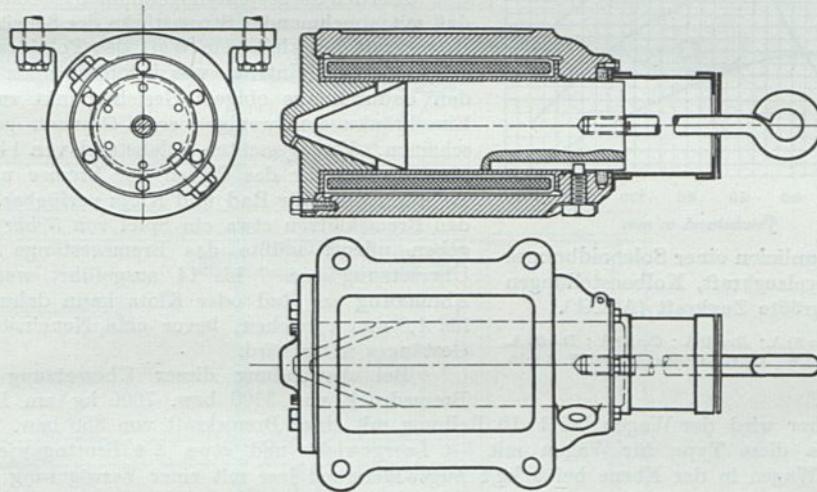


Abb. 173. Solenoidbremse der S.S.W.

ganze System ist vollständig gekapselt, insbesondere ist die Zugspule gegen Eindringen von Feuchtigkeit und Öl vollständig geschützt. Entsprechend den am europäischen Kontinent gebräuchlichen Wagentypen und Gewichten und den entsprechend gebauten Bremsgestängen werden Solenoidbremsen mit Höchstzugkräften von

250 bis 300,
400 bis 500 und
600 bis 700 kg

bei einem Gesamthub von etwa 140 bis 150 mm gebaut. Die Zugkraft ist jedoch nicht beständig, sie ändert sich mit der Lage des Kernes, d. h. innerhalb des Hubes, und ist verschieden je nach der Stromstärke.

Zur Beurteilung der zu wählenden Type und Wicklungsart, die von der verfügbaren Stromstärke abhängt, werden im Versuchswege die Kennlinien der Brems-

zugkraft in Abhängigkeit vom Polabstand und der Stromstärke ermittelt. Über den Charakter dieser Kennlinien gibt die Abb. 174 Aufschluß.

Diese Kennlinien beziehen sich auf eine Bremse, die für Anhängewagen von ca. 5 t Leergewicht gangbar ist. Die Bremse verträgt bei 90 Amp. zulässigem Höchststrom, 70 A. Regelstrom während 4 min (Kurve B) einen Dauerstrom von 11 A., d. h. 120 W. Gegenüber der Normalaufnahme von 4900 W ist die Dauerleistung sehr gering. Hieraus folgt, daß die Beanspruchung der Bremse im Betrieb vorgängig genau untersucht werden muß, um einer übermäßigen Erwärmung vorzubeugen.

8. Berechnung der Solenoidbremse. Aus den Kennlinien kann die für einen bestimmten Fall notwendige Solenoidtype und deren Einstellung ermittelt werden.

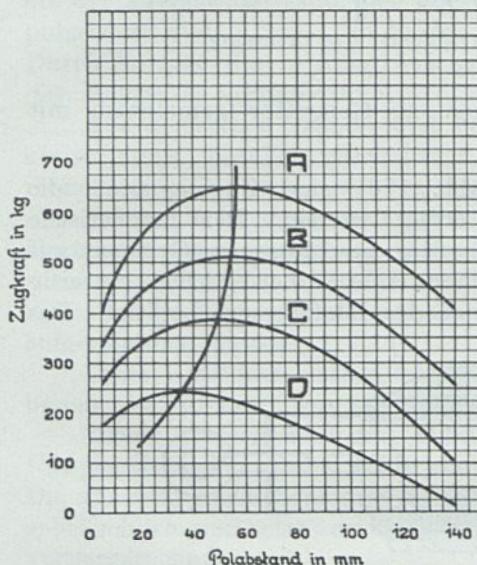


Abb. 174. Kennlinien einer Solenoidbremse für 500 kg Regelzugkraft, Kolbenstellungen für die größte Zugkraft (A.E.G.).

Stromstärken A=90 A.; B=70 A.; C=50 A.; D=30 A.
Dauerleistung 120 W., 11 A.; Leistung 4900 W. 4 min.

ausgeübt, daher wird der Wagen bei 1:10 Reibung und einer Bremskraft von 350 bzw. 700 kg abgebremst. Da diese Type für Wagen mit 5 t Leergewicht und etwa 8 t Bruttogewicht gebaut ist, wird der Wagen in der Ebene bei 5 kg/t Zugswiderstand leer mit einer Verzögerung

$$\frac{350 + 25}{500} = 0,75, \text{ beladen } \frac{350 + 40}{800} = 0,49$$

bzw.

$$\frac{700 + 25}{500} = 1,45, \text{ beladen } \frac{700 + 40}{800} = 0,92 \text{ m/sec}^2$$

abgebremst.

Dieses Rechnungsergebnis beweist im Hinblick darauf, daß die Bremsgestänge der in Betracht kommenden Wagen meist mit Übersetzung von etwa $\frac{1}{9}$ bis $\frac{1}{12}$ gebaut werden, daß selbst noch in starkem Gefälle und niedrigeren Stromstärken die nötige Bremskraft vorhanden sein wird, da man stärkere Verzögerungen als 0,5 bis 0,7 m/sec² mit Rücksicht auf die Reisenden nicht verwendet.

Die zu erwartende Erwärmung der Bremse ist, sofern die Bremse nur zum Anhalten der Züge dient, aus der Dauer der Bremszeit entsprechend der durch die mittlere Bremskraft erzielten Verzögerung zu berechnen, zu welchem Zweck man bei einem größeren Straßenbahnnetz das Fahrdiagramm für die mittlere Haltestellenentfernung als Grundlage zu nehmen hat. Dient die Bremse auch zur Dauerbremsung in Gefällsstrecken, so müssen für die jeweils vorliegenden Verhältnisse die Stromzeitlinien, ebenso wie es bezüglich des Fahrstromes bei den Motoren geschieht, ermittelt werden.

Die Solenoidbremsen weisen je nach der verlangten Leistung Eigengewichte von 70 bis 155 kg auf. Erstere Zahl gilt für eine Bremse mit einer Leistung von ca. 18 mkg während 4 min; letztere für eine solche mit rund 35 mkg.

Die Einstellung im Zusammenhange mit dem Bremsgestänge ist so vorzunehmen, daß die Bremsklötze noch vor derjenigen Stellung des Magnetkernes zum Anliegen kommen, in welcher die höchste Zugkraft insbesondere bei niedrigen Stromstärken erreicht ist. Es kann dann eine angemessene Abnutzung von Radreifen und Bremsklotz zugelassen werden, ohne daß eine Verminderung der Bremskraft oder gar ein volles Aufhören derselben zufolge Anliegen des Kernes eintreten könnte.

Aus den dargestellten Kennlinien ist zu entnehmen, daß mit abnehmender Stromstärke der Scheitelwert der Bremskraft bei kleinerem Wert des Polabstandes, also größerem Hub eintritt, was insoferne günstig ist, als den dadurch aus obigem Gesichtspunkt zutreffenden Einschränkungen weniger enge Grenzen gezogen erscheinen. Vom gesamten Polabstand von 140 mm sind etwa 70 mm für das Öffnen der Bremse und 25 mm als Abnutzung für Rad und Klotz verfügbar. Da man den Bremsklötzen etwa ein Spiel von 5 bis 10 mm zu geben pflegt, müßte das Bremsgestänge mit einer Übersetzung von 7 bis 14 ausgeführt werden. Die Abnutzung am Rad oder Klotz kann daher etwa 3,6 bis 1,8 mm erreichen, bevor eine Neueinstellung des Gestanges nötig wird.

Bei Anwendung dieser Übersetzung wird ein Bremsdruck von 3500 bzw. 7000 kg am Radumfang Reibung mit einer Bremskraft von 350 bzw. 700 kg abgebremst. Da diese Type für Wagen mit 5 t Leergewicht und etwa 8 t Bruttogewicht gebaut ist, wird der Wagen in der Ebene bei 5 kg/t Zugswiderstand leer mit einer Verzögerung

9. Schaltung der Solenoidbremse. Für die verlangte Zugkraft der Bremse ist eine bestimmte Stromstärke erforderlich; die Reihenschaltung mehrerer in einem Zuge befindlicher Bremsen erscheint somit als die richtige Schaltung. Diese Schaltung hat den Nachteil, daß ein Schaden in einer Bremse oder in der Zuleitung in einem der im Zuge befindlichen Fahrzeuge die Bremsung des ganzen Zuges vereiteln kann. Im Hinblick auf die lösbarcn Kupplungen zwischen den einzelnen Fahrzeugen kann eine Unterbrechung des Bremsstromkreises auch eintreten. Aus diesen Gründen ist fast ausschließlich die Nebeneinanderschaltung der Bremsen gebräuchlich.

Für alle elektromagnetischen Bremsen ist die Erregung mit dem Kurzschlußstrom der als Generatoren geschalteten Motoren die bequemste Art der Betätigung, daher meist die Regel. Da hierbei die Bremse ihre Arbeit mit verhältnismäßig großen Stromstärken und niedrigen Spannungen verrichtet, führt diese Betriebsart auch vom fabrikatorischen Standpunkt zu betriebssichereren Bauformen. Wenn man von der Drehung der Räder bzw. der Reibung zwischen Rad und Schiene unabhängig sein will, kann die Erregung der Bremse von der Oberleitung oder einer mitgeschleppten Batterie entnommen werden. Letzteres wird meist für Steilbahnen

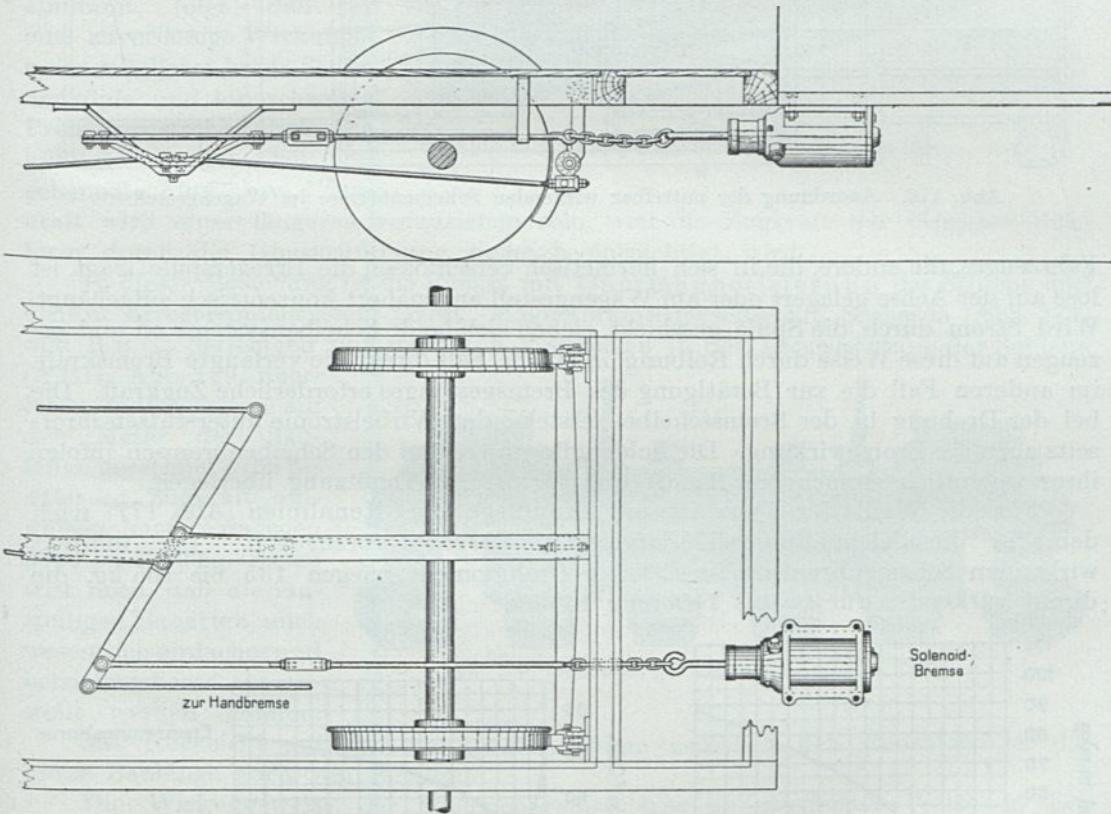


Abb. 175. Anordnung der Solenoidbremse im Wagengestell (S.S.W.).

von seiten der Behörden verlangt, man baut dann, um die Leistung der Batterie einzuschränken, die Bremsen mit sogenannter Verbundwicklung, d. h. eine Starkstromspule für Dauerbetrieb mit Motorstromerregung und eine mit Liniенstrom betätigtes sogenannte Frischstromwicklung für Notbremsungen. Letztere Wicklung wird nicht unmittelbar, sondern unter Vorschaltung eines Widerstandes an die Oberleitung oder eine Batterie gelegt.

10. Die Scheibenbremse. Diese wird in zwei grundsätzlich verschiedenen Bauarten erzeugt.

Die unmittelbar wirkenden Bremsen erzeugen das volle Bremsmoment auf der Wagenachse; die mittelbar wirkenden sind eigentlich elektromagnetische Kupplungselemente, die mittelst einer Kette das Hebelsystem der Klotzbremse betätigen (Abb. 176).

Beide Bauarten sind bis auf den Unterschied der verlangten Drehmomente identisch und bestehen aus zwei Scheibensystemen. Die eine Scheibe sitzt fest auf der Achse des

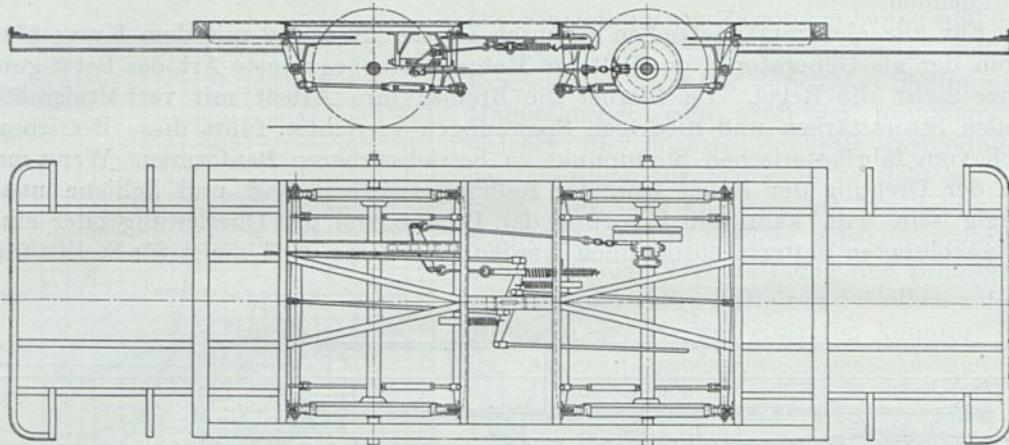


Abb. 176. Anordnung der mittelbar wirkenden Scheibenbremse im Wagengestell.

Fahrzeuges, die andere, die in sich hermetisch verschlossen die Erregerspule trägt, ist lose auf der Achse gelagert oder am Wagengestell angenähert konzentrisch aufgehängt. Wird Strom durch die Spule geschickt, ziehen sich beide Scheibensysteme an und erzeugen auf diese Weise durch Reibung in einem Fall direkt die verlangte Bremskraft, im anderen Fall die zur Betätigung des Bremsgestänges erforderliche Zugkraft. Die bei der Drehung in der Bremsscheibe entstehenden Wirbelströme unterstützen ihrerseits auch die Bremswirkung. Die Solenoidbremsen sind den Scheibenbremsen infolge ihrer wesentlich einfacheren Bauart und geringeren Abnutzung überlegen.

Für die Wahl der Type ist auf Grundlage der Kennlinien (Abb. 177) nach dem für die Solenoidbremsen dargelegten Vorgang vorzugehen. Die indirekt wirkenden Scheibenbremsen für 100 kg Drehmoment wiegen 135 bis 165 kg, die direkt wirkenden für 90 bis 110 mkg 130 kg.

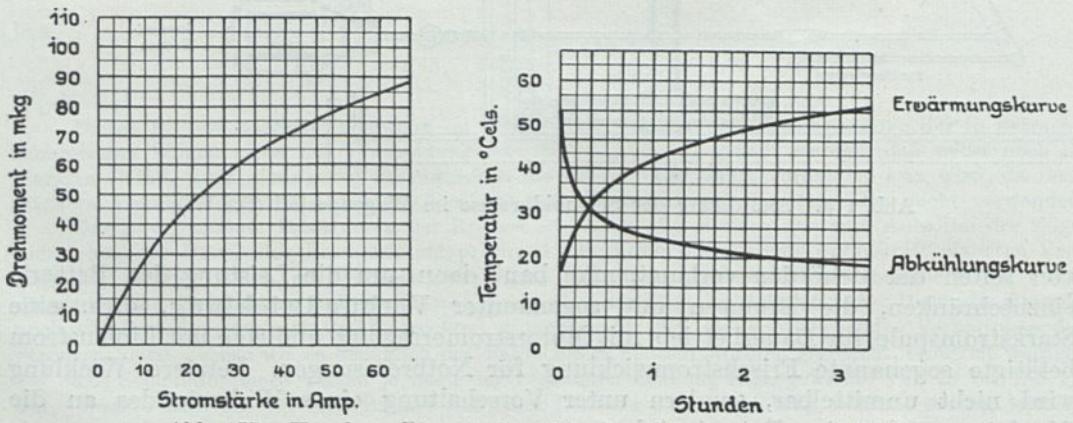


Abb. 177. Kennlinien der direkt wirkenden Scheibenbremse (A.E.G.).

11. Die Schienenbremsen gelangen in der Hauptsache auf Bahnen mit starkem Gefälle — über 60 ‰ — zur Anwendung; sie sind auch bei Straßenbahnen dann vorzusehen, wenn besondere Verkehrsverhältnisse — hohe Geschwindigkeit, enge Straßen, starker Fuhrwerksverkehr und dergl. — es als wünschenswert erscheinen lassen, über ein Bremsbehelf zu verfügen, der von der Schienenreibung unabhängiger ist als das Triebrad.

Der magnetische Stromkreis der Schienenbremsen besteht aus einem Jochsystem, das die Erregerspulen trägt; den Schluß bildet der Schienenkopf. Hieraus und aus dem Umstand, daß die magnetische Zugkraft mit Zunahme des Luftabstandes sehr rasch abnimmt, folgt, daß für eine zuverlässige Wirkungsweise möglichst breite Schienenköpfe und ein schweres Profil anzustreben sind. Die kürzeste Bauart bei gegebenem Flux bzw. Zugkraft wird einer längeren vorzuziehen sein, weil die Zugkraft der längeren Bauform durch die Gleiskrümmung mehr beeinträchtigt wird.

In dieser Beziehung ist die Bauart mit Quermagnetisierung der Schiene und einem Erregerspulensystem (West., Magnetbremsengesellschaft, Secheron (Abb. 178) und B.B.C.) derjenigen mit mehreren Folgepolen in der Längsrichtung der Schiene (A.E.G., Abb. 179) überlegen, indem erstere auf den Meter der Baulänge gerechnet 3750 bis 4450 kg Zugkraft aufweisen, letztere dagegen 2300 bis 3060 kg. Hinzu tritt noch, daß die einspuligen Bauarten auch wesentlich einfacher und betriebssicherer hergestellt werden können.

Mit Rücksicht auf den verfügbaren Raum zwischen den Radsätzen ist die kurze Baulänge auch von Belang.

Die Wirkungsweise der Schienenbremse tritt in zweifacher Weise in Erscheinung. Unmittelbar entspricht der zwischen Schiene und Bremse wirkenden Pressung eine Reibungskraft, andererseits wird das auf den Achsen lastende Gewicht des Wagens, sofern die Bremse auf dem Wagengestell aufgehängt ist, entsprechend der Zugkraft der Bremse vermehrt. Die letztere Wirkung ist ohne Belang, weil man wegen rascher Abnahme der Zugkraft mit der Länge des Luftweges die Tragfedern der Bremse kaum stärker bemessen wird, als es zum sicheren Hochheben der Bremse außer Betrieb nötig ist. Diese Federspannung vermindert andererseits die Schienenpressung der Bremse.

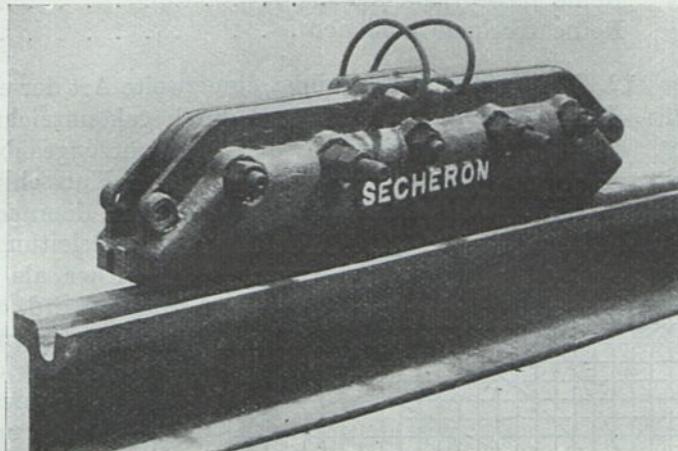


Abb. 178. Einspulige Schienenbremse (Secheron, Genf).

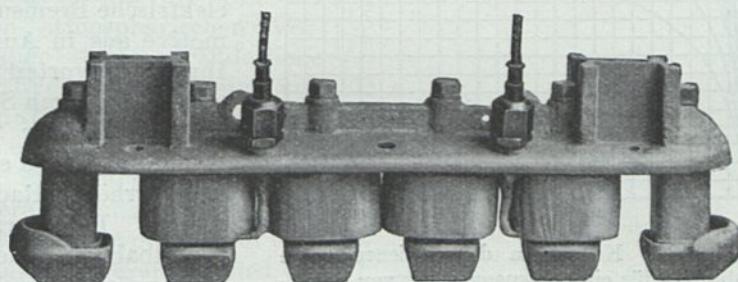


Abb. 179. Sechspolare Schienenbremse (A.E.G.).

Für die Bremswirkung (Abb. 180) der Schienenbremsen ist die Reibungszahl der Bewegung, und zwar Stahl auf Stahl zu rechnen, weil ein anderes Material aus magnetischen Gründen nicht in Betracht kommt. Bei Versuchen sind folgende Reibungszahlen ermittelt worden:

Regenfeuchte, mit Straßenschmutz verunreinigte Schienen	$\frac{1}{20}$	bis	$\frac{1}{30}$
Reine nasse Schienen	$\frac{1}{7}$	"	$\frac{1}{15}$
Reine trockene Schienen	$\frac{1}{5}$	"	$\frac{1}{7}$

12. Die Nutzbremsung bildet eine zweite Art der elektrodynamischen Bremsung.

Diese Bremsart ist grundsätzlich dadurch gekennzeichnet, daß die freie Energie des

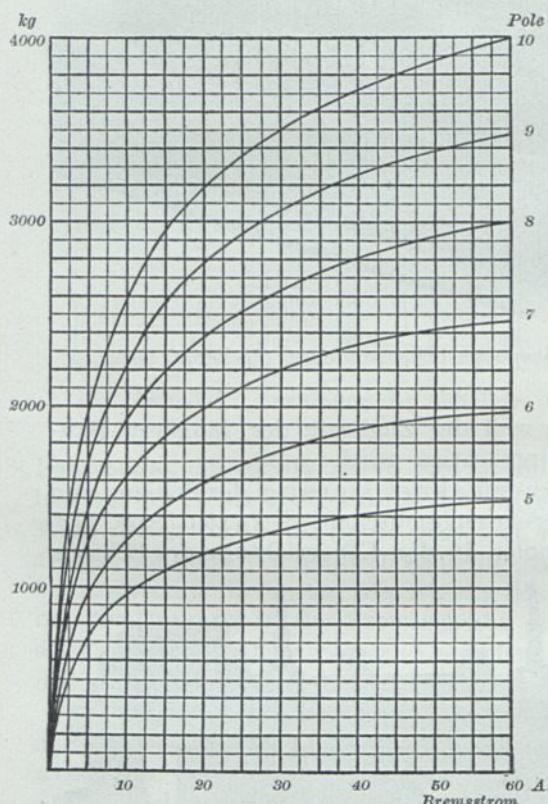


Abb. 180. Kennlinien der Schienenbremse
Abb. 179 für ein Schienengewicht von mindestens 46 kg je lfd. m und nicht gewölbten Schienenkopf.

Fahrzeugs bzw. des Zuges nicht wie bei der Kurzschlußbremsung in Wärme überführt, demnach vernichtet, sondern an die Arbeitsleitung oder in etwa mit geführte Speicher als elektrische Arbeit zurückgeliefert wird. Man wendet sie insbesondere dann an, wenn so große Arbeitsmengen in der Talfahrt der Züge frei werden, die sich mit bequemen Einrichtungen nicht mehr in Wärme umsetzen lassen oder wo die Ersparnisse an Strom von Wichtigkeit sind.

Gegen diese Betriebsart bestanden bei Vollbahnen bislang Bedenken, indem laut den bestehenden Betriebsvorschriften das Auflaufen des Zuges auf die Lokomotive vermieden werden soll. Nachdem die Praxis in Italien und Amerika bewiesen hat, daß diese Bedenken unbegründet sind, kann die elektrische Bremsung der Züge von der Lokomotive aus in Aussicht genommen werden. Ihr Hauptvorteil ist meist nicht in der etwa erzielbaren Stromersparnis zu suchen, sondern in der Tatsache, daß man die Sicherheit durch eine weitere Bremseinrichtung erhöht, Radreifen und Bremsklötze schont. Bei warmen Tunnels — Untergrundbahnen — kommt noch die Abfuhr der Bremswärme durch die Leitung in Betracht, weiter daß der Bremsklotzstaub bei mechanischer Bremsung eine arge Plage bildet.

Daß die Stromersparnis als solche keine entscheidende Rolle spielen kann, lehrt folgende Überlegung:

Es sei w der gesamte Zugswiderstand/t
 s die Steigung %

so wird bei η_B Nutzeffekt der Lokomotive zwischen Rad und Stromabnehmer in der Bergfahrt eine Leistung entsprechend der Zugkraft/t

$$Z_B = \frac{w + s}{\eta_B}$$

zuzuführen sein.

In der Talfahrt wird die Zugkraft

$$Z_T = (s - w) \cdot \eta_T$$

frei, daher ist

$$Z_T = Z_B \frac{(s - w) \eta_T \cdot \eta_B}{s + w}$$

Z. B. für

$$s = 2w, \eta_B = 80\%, \eta_T = 75\%$$

wird

$$Z_T = 0,2 Z_B$$

d. h. bei Steigungen unter 10% ist der Rückgewinn kaum 20% , da w mit etwa 5 kg angenommen werden kann. Herabgesetzt wird dieses Ergebnis noch weiter dadurch, daß die Annahme, daß der Zugswiderstand für das beim Bremsen treibende Zugsgewicht dasselbe ist, wie er für den bergauf geschleppten Zug festgestellt wurde, nicht zutrifft.

Tatsächlich sind bis jetzt auf den Strecken der Giovi-Linie in Italien und denjenigen der Chicago-Milwaukee-St. Paulbahn in den U.S.A. ($s = 31\%$ und 20%) Ersparnisse von nur etwa 14% vom Jahresstromverbrauch nachgewiesen worden. Das macht bei 20% Anteil der Stromkosten an den Ausgaben nur 3% Ersparnis im gesamten Ausgabenat aus.

Wichtiger ist der Umstand, daß durch die Nutzbremsung die freiwerdende Energie nicht zu schädlicher Arbeit, d. h. Abnutzung von Rad und Bremsklotz verwendet wird, weiter, daß die von der Geschwindigkeit und den atmosphärischen Verhältnissen abhängige, daher stark veränderliche Bremswirkung der Klotzbremse durch eine von all diesen Umständen unabhängige Kraft, die elektromechanische Wechselwirkung in den Triebmotoren, ersetzt wird. Zugunsten dieser Bremsmethode spricht insbesondere bei langen Zügen auch der Umstand, daß der ganze Bremsvorgang auf eine Bedienungsstelle, die Lokomotive, vereinigt wird, die schon aus anderen Gründen unter ständiger Aufsicht steht; diese Betriebsart gewährleistet die höchsterreichbare Sicherheit.

13. Die Nutzbremsung mit Gleichstrom-Nebenschlußmotoren erfordert keine besondere Einrichtung, indem die Umkehrung der Wirkungsweise vollständig selbsttätig erfolgt, wenn die Zugkraft in umgekehrter Richtung, bezogen auf die Richtung der Bewegung, wirkt. Die Starrheit der Wirkungsweise dieser Motorart ist unerwünscht, infolgedessen ist es zweckmäßig, Hilfseinrichtungen vorzusehen, welche diesen Übelstand mildern.

Statt die Erregung von der Fahrleitung parallel zum Anker zu speisen, sieht man mittelst eines Motorgenerators eine Fremderregung vor, die sich den Spannungs-

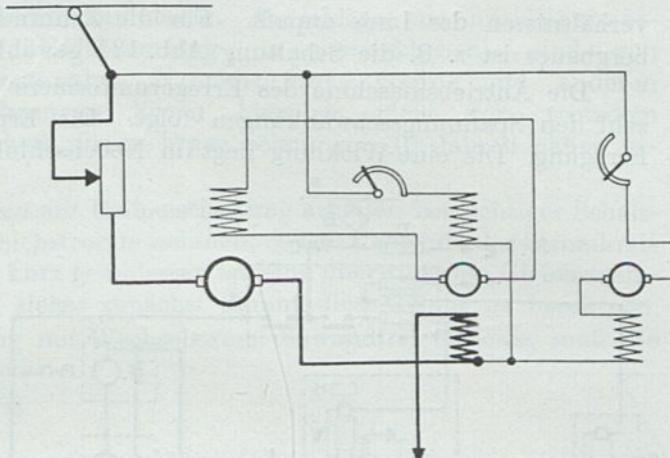


Abb. 181. Schaltplan zur Nutzbremsung mit einem Nebenschlußmotor, abfallende Charakteristik durch Umformererregung erzielt. Das Feld der Erregermaschine wird durch den Liniенstrom geschwächt (A.E.G.U.).

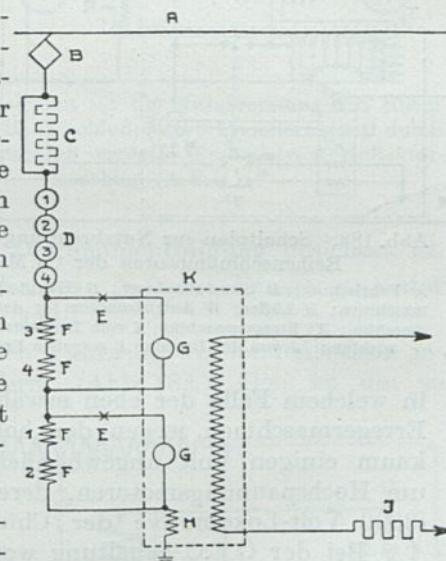


Abb. 182. Schaltprinzip der Nutzbremsung der Lokomotiven der Ch. M. & St. P. Bahn (G.E.C.).

verhältnissen der Linie anpaßt. Für die Zahnradlokomotiven des Eisenerzer Erzbergbaues ist z. B. die Schaltung Abb. 181 gewählt worden.

Die Antriebsmaschine des Erregerumformers ist ein R.S-Motor, dessen Drehzahl den Spannungsschwankungen folgt. Die Erregerdynamo hat eine gemischte Erregung. Die eine Wicklung liegt im Nebenschluß an der Fahrleitung, eine zweite, entgegengesetzt wirkende, im Stromkreis des Triebmotors.

Tritt auf der Linie z. B. plötzlich ein starker Spannungsabfall ein, wäre ein starker Stromstoß und dementsprechend ein heftiger mechanischer Stoß im Fahrzeug die Folge. Diese Wirkung wird gemildert durch den gleichzeitigen Tourenabfall der Erregermaschine, weiter durch die Gegenwirkung der Hauptstromwicklung auf das Feld der Erregermaschine.

Die rasche Folge der angestrebten Wechselwirkungen wird durch die magnetische Trägheit der Triebmaschine etwas beeinträchtigt. Im Bedarfsfalle kann man die Trägheit des Systems zum Teil dadurch abschwächen, daß man die Feldwicklung in zwei Gruppen schaltet, die bei Fremderregung mit halber Spannung parallel, bei Fahrt mit Linienerregung in Reihe liegen.

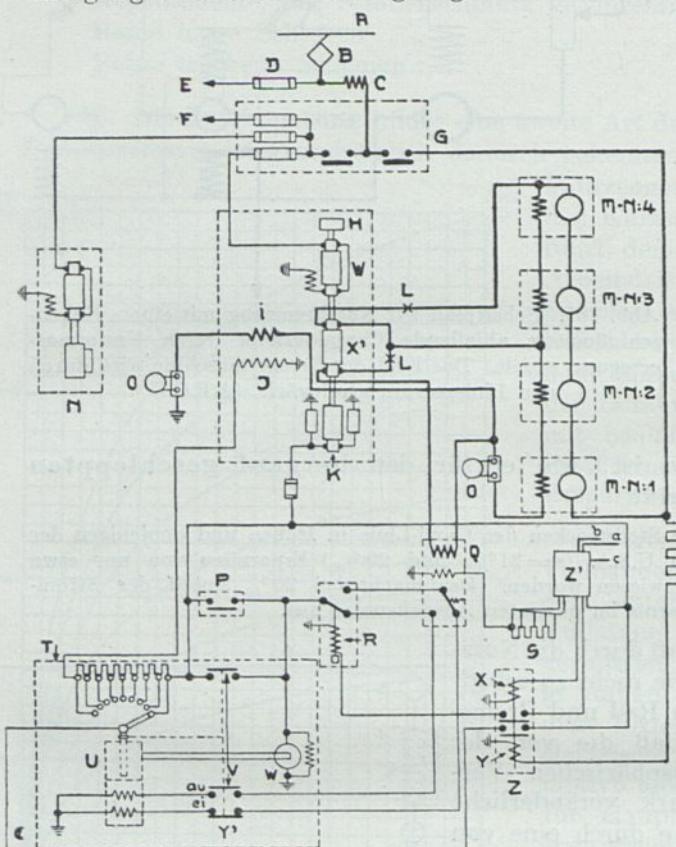


Abb. 183. Schaltplan zur Nutzbremsung mit Hochspannungs-Reihenschlußmotoren der Ch.M. & St.P. Bahn.

A Fahrleitung; B Stromabnehmer; G Hauptschalter; M 1 bis 4 Triebmaschinen; H Lüfter; W Antriebsmotor für den Lüfter und die Erregermaschine; X' Erregermaschine; i vom Bremsstrom durchflossene Erregerwicklung; J von der Dynamo k gespeiste Erregerwicklung (G.E.C.).

in welchem Falle der eben erwähnte Übelstand sich Erregermaschinen wegen der hohen Stromstärken und niedrigen Spannungen von kaum einigen Volt ungewöhnliche Dimensionen erhalten, außer es handelt sich um Hochspannungsmotoren, deren Feld einen relativ hohen Widerstand aufweist. (3000 Volt-Lokomotive der Chicago-Milwaukee-St. Paul-Bahn Abb. 182 u. 183).

Bei der G.E.C.-Schaltung werden je zwei Felder von einer Hilfsdynamo fremd erregt; die Erregung dieser Dynamo wird vom Bremsstrom beeinflußt. Die West-Gesellschaft verwendet eine Schaltung mit Beruhigungswiderstand; den Erregerstrom liefert eine Achsdynamo. Der Bremsstrom durchfließt einen induktionsfreien Widerstand, über den die Erregerdynamo die Feldwicklung speist. Jeder Stromstoß bewirkt unmittelbar die gewünschte Änderung der EMK.

14. Für die Nutzbremsung mit Drehstrominduktionsmotoren gilt das bezüglich der Gleichstromnebenschlußmotoren Gesagte mit der Ergänzung, daß hier wirtschaftliche Mittel zur Milderung der Starrheit des Verhaltens nicht bekannt sind.

15. Nutzbremsung mit Wechselstrommotoren. Vorschläge, um mit Wechselstrom-Kollektormotoren die Nutzbremsung zu verwirklichen, sind von Behn-Eschenburg, Cauwenberghe, Niethammer, Osnos und anderen gemacht worden. Betriebserfahrungen liegen hierüber nicht vor, trotzdem die französische Südbahngesellschaft dieser Frage schon vor 10 Jahren näher getreten ist.

Wechselstromkollektormotoren mit Reihenschaltung arbeiten bei richtiger Schaltfolge von Stator und Rotor wie Gleichstrommaschinen; es tritt daher, da der Stromkreis durch die Transformatorwicklung kurz geschlossen ist, eine unerwünschte Gleichstromerregung auf. Alle Schaltungen zielen zunächst darauf, diese Gefahr zu beseitigen.

Damit die Stromrücklieferung mit Wechselstrom einwandfrei einsetze, muß die Generatorenspannung der Größe und der Phase nach der Linienspannung das Gleichgewicht halten.

Weiter müssen auch die Bedingungen einer guten Stromwendung erfüllt sein.

Nach einem Patent der A.E.G — Abb. 184 u. 185 — wird das Feld eines Motors durch eine Nebenschlußkollektormaschine erregt und auf diese Art zur Nutzbremsung gezwungen. Der Erregerstrom der Erregermaschine bleibt wegen der Selbstinduktion der Feldwicklung gegenüber der Speisespannung um nahezu 90° zurück. Die durch Drehung in der Erregermaschine erzeugte EMK ist also auch in Quadratur mit der Klemmenspannung; an das Motorfeld angelegt liefert sie in dieses einen um weitere 90° verschobenen, also einen mit dem Rotorstrom fast cophasialen Strom, so daß die Drehmomentbildung gesichert ist.

Diese Schaltung krankt daran, daß wegen des $\cos \varphi \approx 0$ der Erregergenerator für vergleichsweise große KVA ausgelegt werden muß.

Sind mehrere Motoren in dem zu bremsenden Fahrzeug vorhanden, kann jeweils ein Motor die Erregung des anderen liefern. (Abb. 184.) Dies ist um so

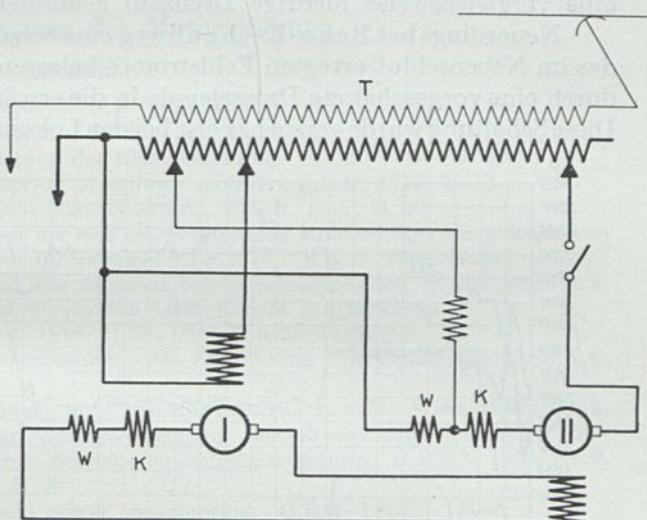


Abb. 184. Schaltplan für die Nutzbremsung mit einem Wechselstrom-Hauptschlußmotor, Fremderregung durch eine im Nebenschluß erregte Wechselstrom-Kollektormaschine (A.E.G.).

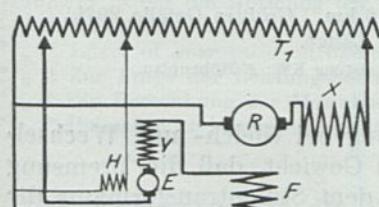


Abb. 185. Schaltprinzip für die Nutzbremsung mit einer Wechselstrom-Hauptschlußmaschine.

Fremderregung gemischt: von der Linie und einer im Nebenschluß erregten Kollektormaschine.

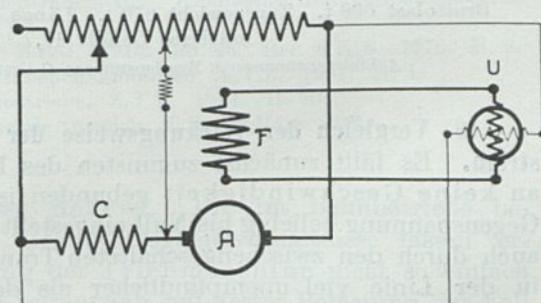


Abb. 186. Schaltplan für die Nutzbremsung mit einem Wechselstrom-Hauptschlußmotor, Felderregung durch einen Phasenspalter.

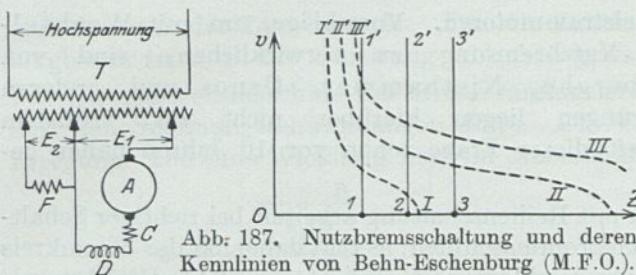


Abb. 187. Nutzbremseschaltung und deren Kennlinien von Behn-Eschenburg (M.F.O.).

seinen Maßen noch größer, weil die Induktionsmaschine durch ihre Polzahl an eine vergleichsweise niedrige Drehzahl gebunden ist. (Abb. 186.)

Neuerdings hat Behn-Eschenburg eine Schaltung angegeben, bei welcher die Phase des im Nebenschluß erregten Feldstromes belassen, dagegen diejenige des Rotorstromes durch eine vorgeschaltete Drosselspule in die erwünschte Lage gebracht wird (Abb. 187). Diese Schaltung wurde versuchsweise bei den Lokomotiven der Gotthardbahn angewendet.

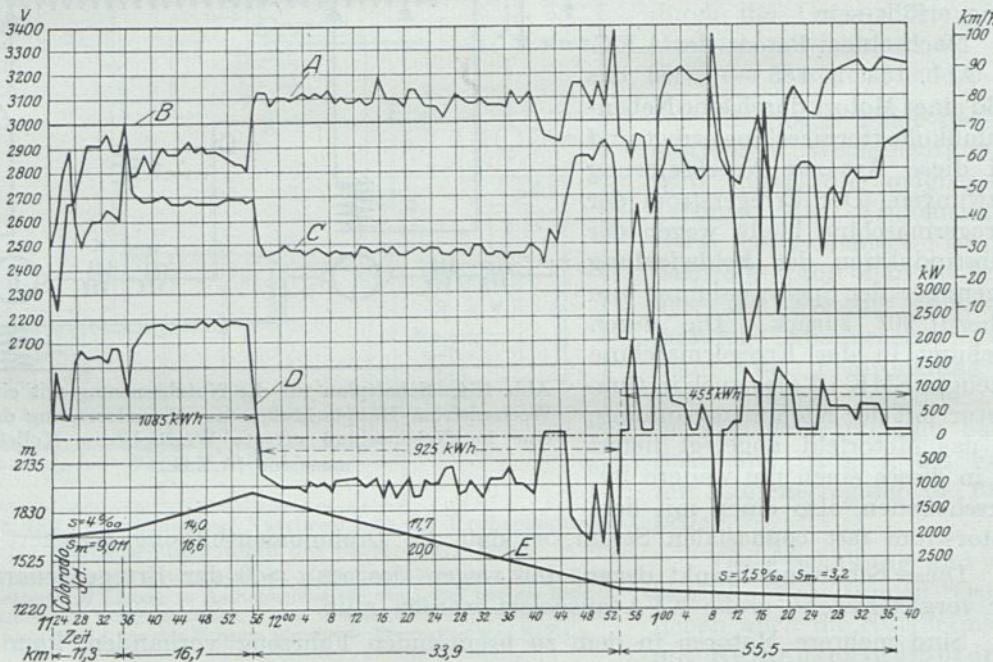


Abb. 188. Stromzeitlinie einer mit Nutzbremsung fahrenden Lokomotive der Ch.M.St.P.Bahn. Bruttolast 600 t. Zugsgewicht 870 t. Länge der Strecke 116 km. Größtes Gefälle 20%, mittleres Gefälle 17,7% auf 33,9 km Länge.

A Linienspannung; B Regelspannung; C Geschwindigkeit; D Leistung KW; E Höhenplan.

16. Vergleich der Wirkungsweise der Nutzbremsung bei Gleich- und Wechselstrom. Es fällt zunächst zugunsten des Letzteren ins Gewicht, daß die Bremsung an keine Geschwindigkeit gebunden ist, weil mit dem Stufentransformator die Gegenspannung beliebig bis Null eingestellt werden kann. Der Wechselstrommotor ist auch durch den zwischengeschalteten Transformator gegenüber allen Vorkommnissen in der Linie viel unempfindlicher als der mit Hochspannung betriebene Gleichstrommotor. Dabei sind die Einrichtungen in den beiden Fällen ziemlich gleichviel verwickelt. Die Hilfsmaschinen sind bei Wechselstrombetrieb nicht von der Hochspannung gefährdet.

ehler möglich, als bei den im Vollbahnbetrieb praktisch vorkommenden Steigungen von selten über 26% die halbe Motorzahl für die Bremsung stets ausreicht.

Mit einem zweiphasig gewickelten Induktionsgenerator kann die oben gestellte Aufgabe mit einer Einankermaschine gelöst werden, doch wird dieser in

Bedenklich ist des weiteren der Umstand, daß das mit Gleichstrom betriebene Fahrzeug bei Abschaltung der Strecke die Spannung, da es selbsterregend weiterarbeitet, nicht verliert, wogegen bei Drehstrom und Wechselstrom in diesem Fall jede weitere Stromlieferung aufhört.

Bei Gleichstrom treten bei hoher Geschwindigkeit hohe Ankerströme auf, wenn eine gewisse Bremskraft verlangt wird, d. h. der Stromwendeapparat ist hierdurch stark gefährdet, weil das Feld geschwächt sein muß.

Bei Wechselstrom besteht diese Gefahr nicht, weil das Verhältnis: Ankerstrom zum Feldstrom durch den Stufentransformator beliebig eingestellt werden kann.

V. Die Bemessung der Motorleistung.

Literatur:

- Adler. Luftgekühlte Bahnmotoren der A.E.G. E.K.B. 1915. H. 32.
 Adler. Die Ankererwärmung der Bahnmotoren. E.T.Z. 1917. H. 26.
 Adler u. Schiebeler. Die Leistungsbewertung der Elektromotoren. E.T.Z. 1920. H. 25.
 Armstrong u. Thirlwall. Power consumption of railway motors. G.E.R. 1915. H. 10.
 Bethge. Der Stromverbrauch bei städtischen Schnellbahnen. E.K.B. 1917. H. 20.
 Bethge. Betrachtung über die Überlegenheit der sich selbst lüftenden Motoren über die gekapselten. E.K.B. 1918. H. 35. A.E.G.-Mitteilungen für Bahnbetriebe 1919. E.K.B. 1919. H. 31.
 Broomall. Unterschied in der Erwärmung der Motoren bei Verschiedenheiten in den Raddurchmessern des Wagens. E.R.J. 1915. Bd. 46. S. 452. Ref. E. u. M. 1916. H. 2.
 Cooper. Ventilierte Bahnmotoren. E. J. Okt. 1918. H. 35. Ref. E. u. M. 1919.
 Engel. Graphisches Verfahren zur Vorausbestimmung der Erwärmung von Bahnmotoren. E.K.B. 1915. H. 35.
 Fischer-Hinnen. Erwärmung von Maschinen und Transformatoren. E. u. M. Wien 1918. H. 18.
 Gut. Ein neues graphisches Verfahren zur Vorausbestimmung der Erwärmung elektrischer Maschinen und Apparate für intermittierende Betriebe einschließlich Bahnen. B.S.E.V. 1918. Nr. 2.
 Knorr. Der Fahrdiograph. E.K.B. 1920. H. 8.
 Laying. Relation between car operation and power consumption. G.E.R. 1915.
 Mauermann. Die Stromersparnisse im Fahrbetriebe von Gleichstromanlagen. E.T.Z. 1917. H. 32.
 Müller. Die Arbeitsleistung beim Lokomotivbetrieb. E.K.B. 1916. H. 27.
 Müller-Gerthe. Der Stromverbrauch elektrischer Straßenbahnen. V.T. 1921. H. 4.
 Neidt. Graphisches Verfahren zur Bestimmung von Fahrgeschwindigkeiten und Vorschaltwiderständen für elektrisch angetriebene Fahrzeuge. E.T.Z. 1899. H. 2.
 Schermerholm. A light weight railway motor. G.E.R. 1916.
 Schreiber. Berechnung des Stromverbrauches elektrischer Bahnen. Verl. Enke, Stuttgart.
 Seefehlner. Zeichn. Rechenbehelfe für den Entwurf und den Betrieb elektr. Bahnen. E.T.Z. 1921. H. 9.
 Thormann. Der Energieverbrauch der elektrischen Zugförderung der Berner Alpenbahn. E.K.B. 1916. H. 25. G.C. Nov. 1916. S. 352.
 Unger. Die Abmessungen der Einphasenbahnmotoren. E.T.Z. 1920. H. 1.
 Volkers. Berechnung des Wattstundenverbrauches elektrischer Bahnen. E.T.Z. 1901. H. 24.
 Wichert. Über die Normung der Leistungen von Straßenbahn-, Kleinbahn- und Vollbahnmotoren. E.T.Z. 1921. H. 25.
 * * * Effect of gear ratio on operating economy. E.R.J. 1915. Bd. 46. Ref. E.K.B. 1916. H. 2.
 * * * Zur Frage der Leistungsbezeichnung von Straßenbahnmotoren. E.T.Z. 1901. H. 4.
 * * * Die Berechnung der Motorleistung im Bahnbetriebe. Z. f. E. 1904. H. 30.
 * * * Puissance et capacité thermique des moteurs de traction. L.E. 4. März 1916.

1. Grundsätze für die Bemessung der Motoren. Die im Bahnbetriebe bestehenden veränderlichen Zugkraft- und Geschwindigkeitsverhältnisse lassen erkennen, daß die Bestimmung der Leistung der Triebmaschine nicht so einfach durchführbar ist, als es sonst bei einem Kraftantrieb mit fester Belastung der Fall ist. Die Grundlage bilden die Fahrlinien, in welchen die Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit $f(T)$ bzw. die Zugkraft und damit die Stromstärke als $f(T)$ dargestellt werden.

Grundsätzlich kommen zwei Gesichtspunkte in Betracht:

- der Motor muß ohne Schaden für den Stromwende- oder Stromabnahmegerät oder für seine mechanische Festigkeit diejenigen Stromstärken vertragen, die zur Ausübung der verlangten Zugkräfte nötig sind.
- muß seine Wärmeaufnahmefähigkeit so groß sein, daß er sich im regelmäßigen Betrieb nicht über die zulässigen Grenzen erwärmt.

Diese zweifachen Gesichtspunkte kommen auch in der üblichen Deklaration der Bahnmotoren zum Ausdruck. Diese werden ausgelegt:

- für die Stundenleistung, die eine praktische Grenze für das betriebsmäßig größte Drehmoment bildet, dann
- für die Dauerleistung, durch welche derjenige Strommittelwert gegeben ist, den die Triebmaschine im Dauerbetrieb verträgt. Außerdem ist es
- üblich, denjenigen Höchstwert des Stromes bzw. der Zugkraft zu bestimmen, welcher vorübergehend sekundenweise beim Anfahren auftreten darf, ohne Schaden zu verursachen.

Je nach der Bestimmung des Motors ist dem einen oder dem anderen Gesichtspunkt größere Bedeutung beizulegen. Die Fahrlinien von Stadt-, Vorort- und Straßenbahnen weisen keinen länger andauernden Beharrungszustand auf. Für die Bemessung des Motors ist daher in erster Linie die sprunghaft einsetzende Anfahrt leistung ausschlaggebend. Die verlangten großen Motormomente führen unter solchen

Umständen meistens zu Motordimensionen, welche die erforderliche Wärme Kapazität, d. h. Dauerleistung aufweisen.

Im Betrieb der Vollbahnen und oft auch bei Industriebahnen, Bergbahnen, kommen Anfahrten vergleichsweise seltener vor, für die Beanspruchung der Triebmaschine wird die anhaltende Leistung im Beharrungszustand maßgebend.

Für Vollbahnen ist es daher meist zwecklos, bis in alle Einzelheiten gehende Fahrlinien zu ermitteln und aufzutragen; die Feststellung der mittleren Leistung in charakteristischen Abschnitten genügt im allgemeinen.

Für Stadtbahnen und ähnlich geartete Bahnbetriebe ist eine weitgehende Auswertung der Bewegungsvorgänge (Abb. 189) unerlässlich, ebenso für Straßenbahnen. Bei letzteren ist eine mittlere Haltestellenentfernung als Grundlage anzunehmen.

Die Fahrlinien können allerdings erst mit Hilfe der Motorkennlinien (Abb. 190 bis 194) aufgetragen werden, setzen also bereits die getroffene Wahl der Motortypen voraus. Es ist notwendig, sich zunächst über den Arbeitsaufwand auf der in Frage kommenden Strecke ein angenähertes Bild zu machen.

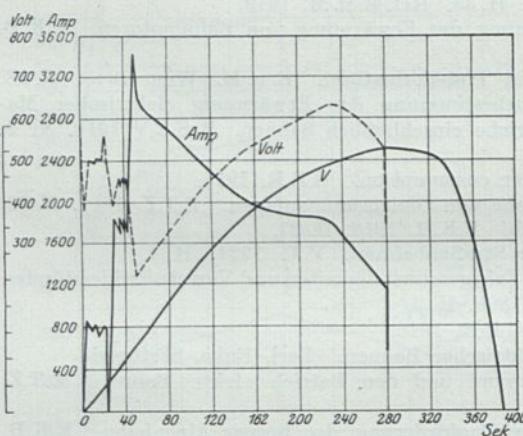


Abb. 189. New York-Zentralbahn. Bewegungsbild einer Wettfahrt zwischen einer elektrischen und einer Dampflokomotive.

	Elektrische Lokomotive	Dampflokomotive
Reihe	6000	Pacific
Achsanordnung	1-4 A-1	2-C-1
Dienstgewicht	t 91	155
Triebgewicht	t 64	69
Zuggewicht	t 276	230
Mittl. Beschleunig. bis 80 km/h . m/sec ²	0,175	0,109

bis 194) aufgetragen werden, setzen also bereits die getroffene Wahl der Motortypen voraus. Es ist notwendig, sich zunächst über den Arbeitsaufwand auf der in Frage kommenden Strecke ein angenähertes Bild zu machen.

2. Die Berechnung des Stromverbrauches. Zur angenäherten Feststellung des Stromverbrauches d. h. der mittleren Anstrengung der Triebmaschine genügt folgende überschlägige Rechnung:

a) Die Reibungsarbeit ist in der Hin- und Rückfahrt auf denjenigen Strecken nur in einer Richtung zu leisten, wo $s > w$. Für w wird ein fester Mittelwert entsprechend der beabsichtigten Geschwindigkeit eingesetzt. Auf allen Strecken, wo $s = 0$ oder $s < w$, ist auch auf der Rückfahrt Arbeit zur Überwindung des Reibwiderstandes aufzuwenden, und zwar für $s = 0$ die vollen $100\% = w$, sonst im Verhältnis $(w - s)/w$: w weniger. Die in Betracht kommenden Teilstrecken sind in diesem Verhältnis zu kürzen.

Auf diese Art berechnet sich die virtuelle Länge der Strecke

$$L + \sum L \frac{w-s}{w} = L_v$$

und $\frac{1 \cdot w \cdot L_v}{366 \cdot 2 \cdot L} = a_r$ Stromver-

brauch je t zur Überwindung der Reibung in wh/tkm bei $\eta = 1$.

b) Die Hebeungsarbeit wird für eine Hin- und Rückfahrt

$$\frac{\Sigma h \cdot 1000}{366 \cdot 2 \cdot L} = a_h,$$

wo h den Höhenunterschied der einzelnen Teilstrecken bedeutet.

c) Die Bremsarbeit ist

$$\frac{n \cdot 100 \cdot v^2}{366 \times 2 \times 2 \times L} = a_b.$$

Hier bezeichnet n die Anzahl der Anfahrten.

$$\frac{a_r + a_h + a_b}{\eta} = A$$

der gesamte Arbeitsverbrauch in wh für das t/km . Bei gegebenem Zuggewicht ist damit auch die gesamte mittlere Motorleistung für den Zug gegeben.

Genau genommen ist es unzulässig, für alle drei Arbeitskategorien dieselben Wirkungsgrade zu nehmen, insbesondere müßte für die Bremsarbeit ein schlechterer eingesetzt werden. Da mit dem Verlust der vollen Bremsarbeit gerechnet wird, in Wirklichkeit durch den Auslauf einiges nutzbar zurückgewonnen wird, ist dieser Vorgang für diese Annäherungsrechnung zulässig.

Das auf diesem Wege gewonnene Rechnungsergebnis kann als orientierende Grundlage für die Wahl des Motors verwendet werden. Für die wirkliche Beanspruchung bildet sie kein vollwertiges Maß, weil die Erwärmung der elektrischen Triebmaschinen bzw. der elektrischen Ausrüstung nicht vom arithmetischen Mittelwert der Beanspruchung bzw. der Stromstärke, sondern zum Teil vom geometrischen Mittelwert der Stromstärke bzw. dem Drehmoment abhängt.

Für eine genaue Untersuchung der Erwärmung der Triebmaschinen wird man demnach die genauen Fahrlinien auswerten und entsprechend den mit diesen gefundenen Beanspruchungen die für die Erwärmung maßgebenden Verluste ermitteln. Mit Hilfe der Erwärmungsgesetze und der für die betreffenden Maschinen verfügbaren Kennwerte kann der Verlauf ihrer Temperaturerhöhung bestimmt werden.

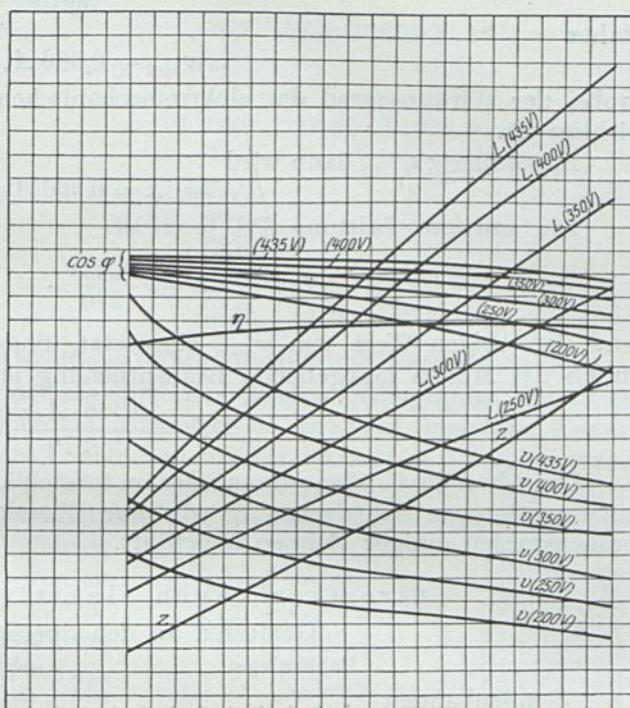


Abb. 190. Kennlinien des 1250 PS.-Motors der 1-E-1-Lokomotiven der Lötschbergbahn.

Z Zugkraft kg; L Leistung PS; V Geschwindigkeit km/h; η Wirkungsgrad %.
1 Teilstrich = 200 A, 5 km/h, 50 PS, 500 kg.

Umgekehrt, wenn auf einer gegebenen Strecke der Stromverbrauch mit $A \text{ wh/tkm}$ ermittelt wurde, so kann aus dieser Zahl der Mittelwert des gesamten Zugwiderstandes für das Tonnenkilometer errechnet werden, denn

$$A = \frac{w_{\text{mittl}} 1000}{366},$$

daher

$$w_{\text{mittl}} = 0,366 A,$$

wobei der Wirkungsgrad der elektromechanischen Umformung noch nicht berücksichtigt ist.

Es sei dieser $\eta \%$, dann wird

$$w_{\text{mittl}} = 0,366 A \cdot \eta.$$

Die mittlere Leistung PS je t ist

$$L = \frac{w_{\text{mittl}} v}{270}.$$

und den obigen Wert von w_{mittl} eingesetzt, findet sich die für die Dauerleistung in PS des Motors maßgebende Beanspruchung je t Zugsgewicht zu

$$L = \frac{0,366 \cdot A \cdot \eta \cdot v}{270}$$

Um über die Größenordnung der im tatsächlichen Betriebe für die Zugförderung aufzuwendenden elektrischen Arbeit eine Übersicht zu geben, seien hier die Verbrauchsdaten einiger Bahnen angeführt.

Stromverbrauch elektrischer Bahnen.

(Gemessen an den Speisepunkten.)

Bahnanlage	wh/tkm	Stromart
Straßenbahnen	40—60	G.S. 500—750 V.
Überlandbahnen:		
Montreux-Berner Oberland (Gebirgsbahn)	124,0	G.S. 750 V.
Ville-Franche-Bourg Madame	80,0	G.S. 800 V.
Liverpool-Southport	30,0	G.S. 600 V.
” ” Verschubdienst	70,0	G.S. 600 V.
Milano-Varese	29,0	G.S. 650 V.
New York-State Railway	68,4	G.S. 600 V.
Rhätische Bahn	52,0	W.S. 11 000 V. 15 ~
Stubaitalbahn (Gebirgsbahn)	70,0	W.S. 2500 V. 45 ~
Preuß. Staatsbahnen, Speicherwagen . . .	20,0	G.S.
Stadtbahnen:		
Hamburg-Blankenese	34,5	W.S. 6000 V. 25 ~
Paris-Nord-Süd	68,8	G.S. 600 V.
Baltimore-Ohio	70,0	G.S. 600 V.
New Havenbahn	45,5	G.S. 600 V. und W.S. 11 000 V. 25 ~
Vollbahnen:		
Chicago-Milw. & St. Paul B.	22,7	G.S. 3000 V. (Nutzbremsung Ersp. etwa 15%)
Italienische Staatsbahnen, Valtellina . . .	32,0	Drehstr. 3000 V. 15 ~
” ” Giovi . . .	{ 22,3 29,0	mit Nutzbremsung ohne ”
Lötschbergbahn, Triebwagen	24,0	W.S. 15 000 V. 16 2/3 ~
” Lokomotiven	21,0	W.S. ” ”

Stromverbrauch elektrischer Bahnen.

(Gemessen an den Speisepunkten.)

Bahnanlage	wh/tkm	Stromart
Vollbahnen (Fortsetzung):		
Preuß. Staatsb. Dessau-Bitterfeld:		
Schnell- und Personenzüge	30,5	W.S. 15 000 V. 16 2/3 ~
Güterzüge	17,4	"
New-Haven:		
Lokalzüge	60,0	W.Str. 11 000 V. 25 ~
Schnellzüge	34,0	"
Gütereilzüge	29,0	"
Güterzüge	29,5	"
Lokalgüterzüge	55,0	"
Riksgränsen	21,0	W.S. 15 000 V.
Simplon	34,0	D. S. 3000 V. 15 ~

3. Die Erwärmung und die Abkühlung: ihre Gesetze und Berechnung¹⁾. Die Zulässigkeit eines Belastungsfalles, den als durch das Belastungsdiagramm (Belastung in Abhängigkeit von der Zeit) gegeben vorauszusetzen ist, wird auf Grund der Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Triebmotors mittels der Gesetze der Erwärmung untersucht. Diese Untersuchung, die im allgemeinen zur Aufstellung eines Temperaturdiagrammes (Übertemperatur in Abhängigkeit von der Zeit) führt, wird in manchen Fällen mittels vereinfachter Verfahren (quadratischer Mittelwert) bewirkt werden können; den Einblick hierin werden gleichfalls die Gesetze der Erwärmung gewähren.

a) Grundgesetze der Erwärmung. Die thermische Zustandsgleichung einer elektrischen Maschine ist durch das Gleichgewicht zwischen der aus der Arbeit der Verluste erzeugten Wärmemenge einerseits und der unter Temperaturzuwachs aufgenommenen und der infolge des Temperaturgefälles an die Umgebung abgegebenen Wärmemenge andererseits gegeben.

Die in Wärme umgesetzten Verluste seien W Watt; 4189 Watt bedeuten die Entwicklung einer WE je sec. Die im Zeitelement dt erzeugte Wärme ist

$$W dt \text{ Watt-sec (Joule)} \dots (1)$$

Die von einem Körper des Gewichtes G kg und der spezifischen Wärme c Watt-sec (Joule) je kg und Grad Celsius unter dem Temperaturzuwachs dT aufgenommene Wärme ist

$$G c dT = A dT \text{ Watt-sec (Joule)} \dots (2)$$

wobei

$$A = G c$$

die Wärmekapazität der Maschine (Watt-sec je Grad Celsius) bedeutet.

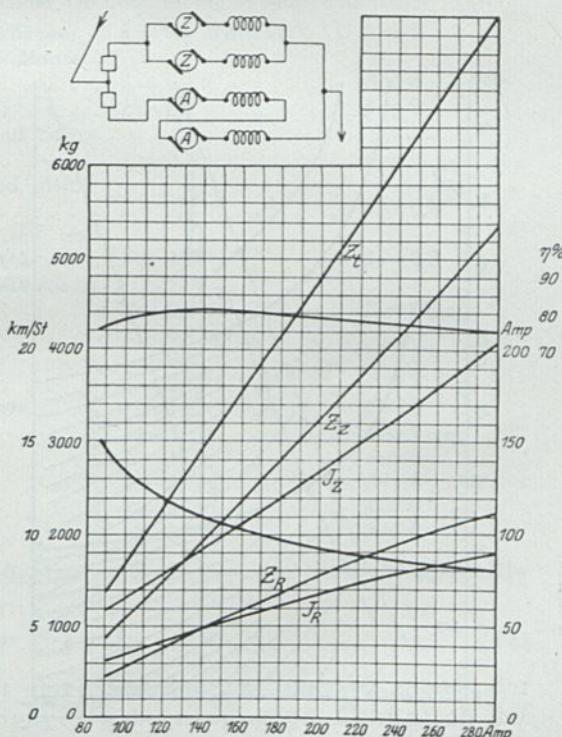


Abb. 191. Triebwagen für gemischten Betrieb (Reibung und Zahnstange) Monthey-Champéry-bahn. Schaltprinzip und Kennlinien des Fahrzeuges in Abhängigkeit des gesamten Stromes.

Z_R Zugkraft; J_R Stromstärke des Reibungsmotors; Z_Z und J_Z dasselbe für den Zahnradmotor; Z_t Zugkraft total am Radumfang; η Wirkungsgrad %.

¹⁾ Bearbeitet unter Mitwirkung von Dr. A. Winkler, Wien.

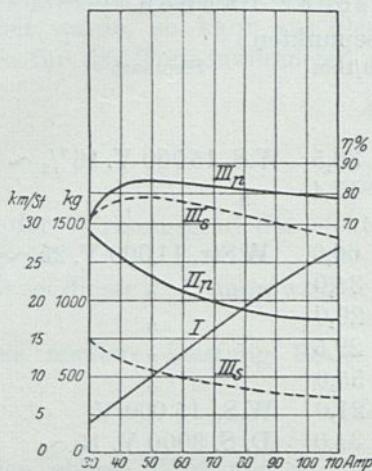


Abb. 192. Kennlinien des Motors für den Reibungsantrieb der Motorwagen der Monthey-Champerybahn.

Regelleistung	75 PS
Betriebsspannung	750 V
Umlauf je min.	500
Übersetzung	1 : 4,5
Raddurchmesser	885 mm

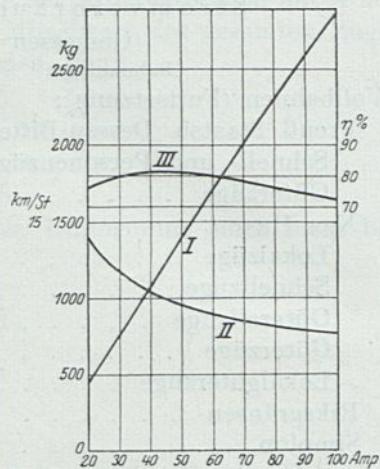


Abb. 193. Kennlinien des Zahnradmotors der Triebwagen der Monthey-Champerybahn.

Regelleistung	75 PS
Betriebsspannung	750 V
Umlauf je min.	500
Übersetzung	1 : 8,15
Triebzahnraddurchmesser	732 mm

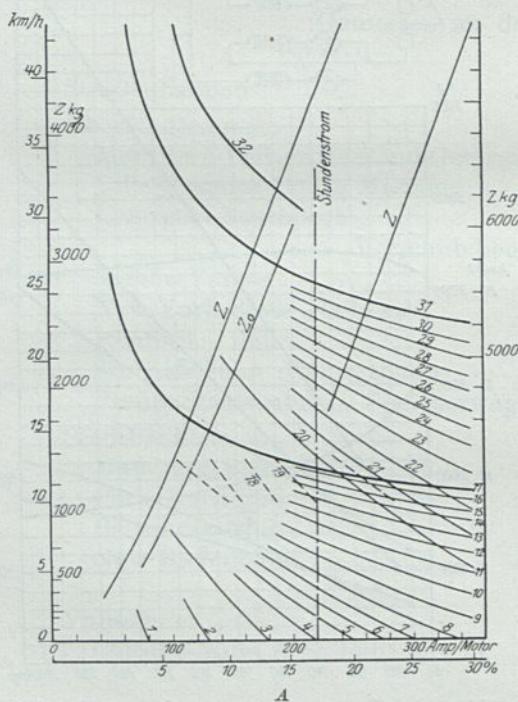
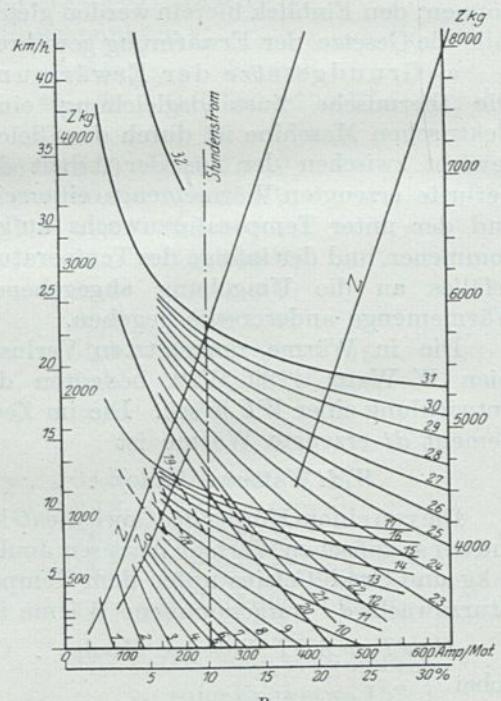


Abb. 194. Kennlinien eines 450 PS — 1500 V Gleichstrom-Untergestellmotors der Lokomotiven der ersten Reihe der Ch.M. & St.P.-Bahn (G.E.C.) $Z = f(J)$ und $(v = f(J))$. Die % - Skala gibt das Maß der Ausnutzung der Reibung.

A Kennlinien für die Zahnradübersetzung 1:4,56
Güterzuglokomotiven. Zugkraft je t Achsdruck bei
der Stundenleistung ~ 170 kg.



B Kennlinien für die Zahnradübersetzung 1:2,45
Personenzuglokomotiven. Zugkraft je t Achsdruck
bei der Stundenleistung je 100 kg.

Die spezifische Wärme c beträgt:

für Kupfer	0,094	WE/kg	${}^{\circ}\text{C}$, d. i. 390	Watt-sec/kg	${}^{\circ}\text{C}$
" Aluminium	0,215	"	" 900	"	"
" Eisen	0,115	"	" 480	"	"
" Isoliermaterialien . . .	0,3 bis 0,6	"	" 1250 bis 2500	"	"
" Öl	0,4	"	d. i. 1700	"	"

Bezogen auf das Volumen, liegen die Werte für alle Baustoffe elektrischer Maschinen nicht weit auseinander:

für Kupfer	3500	Watt-sec/dm ³	${}^{\circ}\text{C}$
" Aluminium	2400	"	"
" Eisen	3700	"	"
" Isoliermaterialien	2500	"	"
" Öl	1500	"	"

(für Kupfer und Eisen angenähert: 1 Watt-h/dm³, ${}^{\circ}\text{C}$).

Die von der Oberfläche 0 dm² an das umgebende Medium (deren Relativgeschwindigkeit gegeneinander sei v m/sec) durch Strahlung und Leitung in der Zeiteinheit abgegebene Wärmemenge ist bei einer Übertemperatur T des Körpers gegen seine Umgebung $\lambda 0(1 + \beta \sqrt{v}) T$ Watt; somit im Zeitelement dt :

$$\lambda 0(1 + \beta \sqrt{v}) T dt = A T dt \text{ Watt-sec (Joule)}, \quad (3)$$

wobei

$$A = \lambda 0(1 + \beta \sqrt{v})$$

den spezifischen Wärmeverlust der Maschine (Watt je ${}^{\circ}\text{C}$) bedeutet.

Die Koeffizienten λ und β sind von nachstehender Größenordnung (Fischer-Hinnen):

Trockentransformatoren (O = äußere Oberfläche)	$\lambda = 0,1$	Watt/dm ²	${}^{\circ}\text{C}$	$\beta = 0$
Öltransformatoren (O = vom Öl bespülte Mantelfläche des Ölkastens)	$\lambda = 0,1$	"	"	$\beta = 0$
Kapselmotoren (O = äußere Oberfläche)	$\lambda = 0,1$	"	"	$\beta = 0$
Ruhende Magnetspulen (O = Mantel- und Stirnflächen)	$\lambda = 0,2$	"	"	$\beta = 0$
Bewegte Magnetspulen (O = Mantel- und Stirnflächen)	$\lambda = 0,2$	"	"	$\beta = 0,5$
Rotoren (O = äußere Mantelfläche von Eisen und Wicklung)	$\lambda = 0,25$	"	"	$\beta = 0,8$
Statoren von Synchron- und Asynchronmaschinen (O = äußere Mantelfläche)	$\lambda = 0,4$	"	"	$\beta = 0$
Kollektoren (O = Mantelfläche)	$\lambda = 0,6$ bis 0,8	"	"	$\beta = 0,8$
Blankes Kupfer gegen Öl	$\lambda = 2,8$	"	"	$\beta = 3$
Isoliertes Kupfer gegen Öl	$\lambda = 1,2$	"	"	$\beta = 3$
Blankes Kupfer gegen Wasser	$\lambda = 4$	"	"	$\beta = 3$
Blankes Eisen gegen Wasser	$\lambda = 1$	"	"	$\beta = 3$
Blankes Eisen gegen Öl	$\lambda = 0,7$	"	"	$\beta = 3$
Widerstände gegen Öl	$\lambda = 2$	"	"	$\beta = 0$
Widerstände gegen Luft	$\lambda = 0,1$	"	"	$\beta = 0$

Unter Einführung vorstehender Begriffe lautet die an erster Stelle aufgestellte thermische Zustandsgleichung formelmäßig:

$$W dt = A dt T + A T dt \dots \quad (4a)$$

Mit anderen Worten: der Wärmeinhalt der Maschine ist jederzeit gleich der zugeführten oder durch die Umformungsverluste erzeugten abzüglich der an die Umgebung verlorenen Wärmemenge.

Die vorstehende Gleichung ist bezüglich t als unabhängiger und T als abhängiger Variablen eine lineare Differentialgleichung erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{A}{A} T = \frac{W}{A} \dots \quad (4b)$$

Die Lösung ist das Gesetz der allmählichen Aufzehrung des Wärmegefälles (Newton).

Die allgemeine Lösung ist:

$$T = T_a e^{-\frac{t}{\tau}} + T_e (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

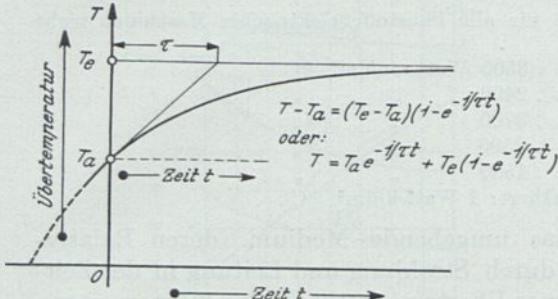


Abb. 195. Logarithmische Erwärmungslinie, Anfangstemperatur allgemein T_a .

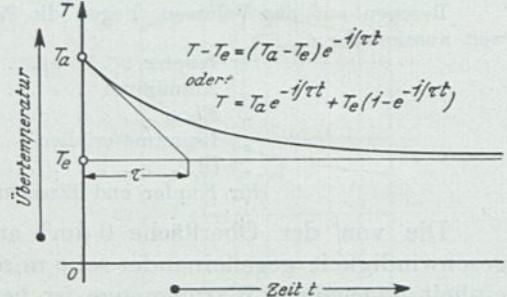


Abb. 196. Logarithmische Abkühlungslinie, Endtemperatur $T_e > 0$.

Ihre Kurve nimmt je nachdem $T_a < T_e$ oder $T_a > T_e$ den in Abb. 195 und 196 dargestellten Verlauf an und kann dementsprechend in der Form

$$T - T_a = (T_e - T_a)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \dots \dots \dots \quad (5a)$$

oder

$$T - T_e = (T_a - T_e)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots \dots \dots \quad (5b)$$

geschrieben werden. Für alle Temperaturkurven kennzeichnend ist die von Ausgangszustand und jedem beliebigen Zwischenzustand unendlich (asymptomatisch) fortschreitende Annäherung an den Endzustand nach dem Gesetz der konstanten Subtangente.

Zwei besondere Lösungen sind (Abb. 197):

1. die von der Ausgangstemperatur (Übertemperatur) $T_a = 0$ ausgehende, zur Endtemperatur (Übertemperatur) des Beharrungszustandes T_e führende Erwärmungskurve

$$T = T_e \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

2. die von der Ausgangstemperatur T_a ausgehende, zur Endtemperatur $T_e = 0$ führende Abkühlungskurve für verlustlosen Leerlauf:

$$T = T_a e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

Hierbei bezeichnet:

T Übertemperatur Grad C zur Zeit t ,

T_a Ausgangstemperatur (Übertemperatur) zur Zeit $t = 0$,

$T_e = \frac{W}{A}$ Endtemperatur (Übertemperatur) zur Zeit $t = \infty$,

W die für die Erwärmung maßgebenden Verluste (Watt),

$A = Gc$ Wärmekapazität der Maschine (Watt-sec je Grad C),

$\lambda = \lambda O (1 + \beta Vv)$ spezifischer Wärmeverlust der Maschine (Watt je Grad C),

$\tau = \frac{A}{\lambda}$ die thermische Zeitkonstante der Maschine,

$e = 2,718$ Basis der natürlichen Logarithmen.

b) Eigenschaften der Temperaturkurven. Folgt man dem Verlauf einer Erwärmungskurve $T = T_e(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ (Abb. 197), so kann man an ihr folgende Eigenarten feststellen.

Zu Beginn der Erwärmung ist für den Temperaturanstieg die Wärmekapazität A der Maschine maßgebend, die Wärmeabgabe tritt hiergegen zurück ($A \cdot T dt = 0$ für $T \approx 0$); als Maß dient der Temperaturanstieg in der Zeiteinheit (Neigung der Ursprungstangente der Erwärmungskurve), dessen Wert sich zu

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{A} = \tan \alpha \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

der Neigungswinkel der Ursprungstangente für $t = 0$ ergibt.

Der stationäre Wärmezustand entsprechend der Endtemperatur (T_e) ist erreicht, wenn das Temperaturgefälle (T) gegenüber der Umgebung so groß ist, daß die Wärmeabgabe gleich der Wärmezufuhr wird.

Der Wärmegehalt ändert sich somit nicht; in Gl. 4a wird

$$G c dT = 0$$

und

$$W = \lambda O(1 + \beta V v) T_e,$$

somit

$$T_e = \frac{W}{\lambda O(1 + \beta V v)} = \frac{W}{A} \quad \dots \quad (9)$$

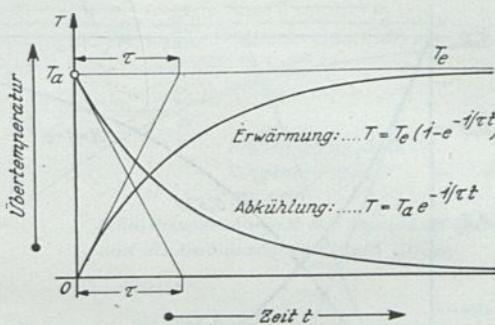


Abb. 197. Logarithmische Linie der Erwärmung für $T_a = 0$ und der Abkühlung für $T_e = 0$.

Diese Gleichung dient zur Ausrechnung des spezifischen Wärmeverlustes, wenn für eine bestimmte Belastung, die durch Drehmoment und Drehzahl gekennzeichnet ist, die maßgebenden Verluste (W) und die Endtemperatur durch Versuche ermittelt sind.

Diese Gleichungen geben einen Einblick in den inneren Zusammenhang der Maschineneigenschaften und der Betriebsgrößen.

Für eine bestimmte Belastung, d. h. eine gegebene Drehzahl und dementsprechend unveränderliche Abkühlungsverhältnisse wird A ein kennzeichnender Festwert, dann ist die Endtemperatur

$$T_e = \text{Const. } W$$

eine Maßgröße der Belastung der Maschine.

Unter derselben Voraussetzung ist die thermische Zeitkonstante, unabhängig von der Belastung, demnach eine Eigentümlichkeit der Maschine.

Eine besondere physikalische Bedeutung hat der Zeitabschnitt τ , die thermische Zeitkonstante; sie bedeutet die Zeit, welche ohne Wärmeverluste bei W Watt Wärmeerzeugung benötigt wird, um die Endtemperatur T_e zu erreichen. In diesem Grenzfall übergeht die Gl. 4, da annahmegemäß

$$\lambda O(1 + \beta V v) T dt = 0$$

ist, in die Form

$$G c dT = W dt, \quad \text{da} \quad dT = T_e \quad \text{und} \quad dt = \tau,$$

daher

$$\tau = \frac{G c T_e}{W} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

oder T_e aus Gl. 10 eingesetzt

$$\tau = \frac{G c}{\lambda O(1 + \beta V v)} \quad \dots \dots \dots \quad (10a)$$

τ bedeutet somit die Zeit, die unter Einfluß des für die Maschine unter gegebenen Verhältnissen kennzeichnenden Wattverlustes unter reiner Wärmeaufnahme ohne Wärmeverlust erforderlich ist, um die Endtemperatur T_e zu erreichen.

τ wird bei einem gegebenen Wert des spezifischen Wärmeverlustes um so größer, je größer die Wärmekapazität ist, d. h. eine große Maschine wird bei einer gegebenen Wärmeabfuhr eine größere Zeitkonstante aufweisen. Da weiters eine größere Zeitkonstante im allgemeinen auf ungünstigere Abkühlungsverhältnisse hinweist, wird sich eine größere Maschine bei einem gegebenen τ ungünstiger verhalten als eine kleinere Type.

Umgekehrt wird eine bestimmte, durch ihre Wärmekapazität $A = Gc$ gekennzeichnete Maschine in ihrem thermischen Verhalten um so günstiger abschneiden,

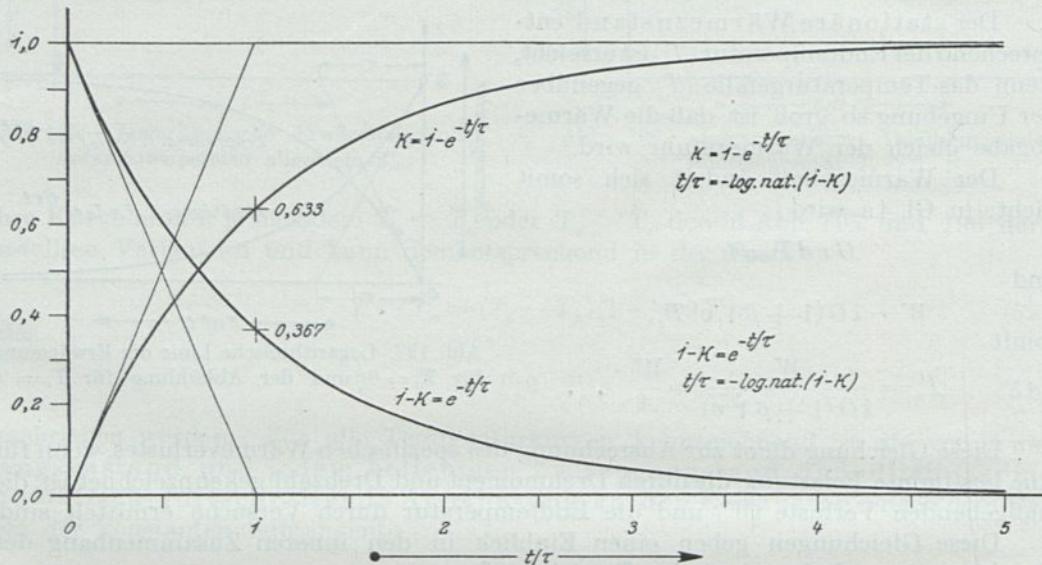


Abb. 198. Zahlenwerte der logarithmischen Linien der Erwärmung und Abkühlung für $T = 0$ bzw. $T = 0$.

je größer ihre Fähigkeit ist, Wärme an ihre Umgebung abzugeben, d. h. je größer A und je kleiner τ wird. Der Zahlenwert des spez. Wärmeverlustes A kann aus Gl. 9 für eine Dauerbelastung berechnet werden, wenn die maßgebenden Verluste erhoben wurden.

Als Dauerleistung ist diejenige Leistung einer Maschine definiert, bei der eine bestimmte zulässige Übertemperatur T_n als stationäre Endtemperatur eintritt.

Die Erwärmungskurven für Leistungen unter der Dauerleistung streben einem Wert unter der zulässigen Übertemperatur zu.

Die Erwärmungskurve der Dauerleistung nähert sich diesem Wert asymptotisch.

Die Erwärmungskurven für Leistungen über der Dauerleistung erreichen die zulässige Übertemperatur innerhalb einer endlichen Zeit t_n und streben selbst einer Endtemperatur T_e zu, die sich aus der Beziehung

$$T_n = T_e \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\tau}} \right)$$

zu

$$T_e = \frac{T_n}{1 - e^{-\frac{t_n}{\tau}}}$$

ergibt.

c) Zeichnerische Rechenbehelfe. Die Temperaturkurve folgt dem Gesetz der konstanten Subtangente (logarithmische Linie). Als einfachster Rechenbehelf zu ihrer Auswertung dient die Kurventafel Abb. 198 für die Zahlenwerte der Funktion

$$k = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots \dots \dots \quad (11a)$$

und

$$1 - k = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots \dots \dots \quad (11b)$$

Die Erwärmungskurve erreicht zur Zeit $t = \tau$ die Endtemperatur von 63,3 % ihres vollen Wertes, während auf der Abkühlungskurve in der gleichen Zeit ein Abfall auf 36,7 % der Ausgangstemperatur stattfindet. Nach einer Zeit $t = 3\tau$ ist der Endzustand zu 95 %, nach einer Zeit $t = 4\tau$ zu 98 % seines Wertes erreicht. Ein Versuch an einer Maschine über den Zeitraum von 3 bis 4 τ kann mit der genannten Annäherung (95 bis 98 %) als Dauerbelastung gelten; Probeläufe werden daher im allgemeinen über diesen Zeitraum vorzunehmen sein.

Eine geometrische Eigenschaft der logarithmischen Linie veranschaulichen Abb. 199 u. 200. Aus dem Anfangsstück OP oder einem beliebigen Zwischenstück und aus den beiden Tangenten OA und PB kann die Lage der Asymptote (Endzustand des Temperaturverlaufs) und die Größe der Zeitkonstanten ermittelt werden.

Für die bildliche Darstellung aller Erwärmungs-(Abkühlungs-)Vorgänge ist die Benützung eines halblogarithmischen Bezugssystems zu empfehlen, weil in diesem die Exponentialkurven in gerade Linien übergehen (Abb. 201).

Gl. 6 lautet logarithmisch

$$\lg T_e - \lg (T_e - T) = \frac{t}{\tau} \lg e.$$

Setzt man

$$\lg T_e = a, \quad \lg (T_e - T) = y, \quad t = x \quad \text{und} \quad \frac{\lg e}{\tau} = b,$$

dann ist nach Durchführung der Substitution

$$y = a - bx,$$

d. h. der \lg von $(T_e - T)$ ist die lineare Funktion der Zeit. Im halblogarithmischen System, Ordinaten logarithmisch geteilt, wird die Erwärmungs-(Abkühlungs-)kurve durch eine Gerade dargestellt.

Die obige Gleichungsform ist unter einem zur nomographischen Darstellung der Erwärmungs-(Abkühlungs-)Vorgänge durch eine Verhältnistafel geeignet.

Im allgemeinen sind die thermischen Festwerte einer Maschine nicht gegeben, dieselben können auch nicht genau voraus berechnet werden, weil Maschinen keine homogenen Körper sind. Zur Verfügung stehen nur die mittels Prüfung gefundenen Erwärmungs- und Abkühlungslinien, aus denen unter der Annahme, daß das logarithmische Gesetz zutrifft, die Kennzahlen errechnet werden können. Ob

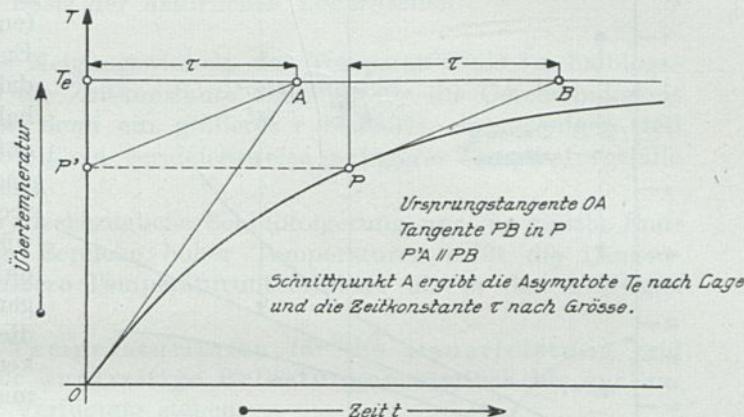


Abb. 199. Geometrische Eigenschaften der logarithmischen Erwärmungslinie.

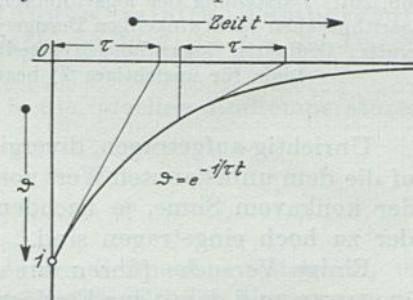


Abb. 200. Geometrische Eigenschaften der logarithmischen Erwärmungslinie. Ermittlung von T_e und τ aus einem gegebenen Teilstück.

das logarithmische Gesetz zutrifft, läßt sich dadurch erkennen, daß man die Kurven auf halblogarithmischem (Ordinate logarithmisch, Abszisse regulär) geteiltem Papier aufträgt, wodurch diese in gerade Linien übergehen.

Die Beobachtungswerte einer Abkühlungskurve können in das halblogarithmische Bezugssystem unmittelbar aufgetragen werden, weil in diesem Falle die Endtemperatur gleich Null ist, daher der absolute Temperaturwert der Skala bekannt ist.

Die Beobachtungswerte einer Erwärmungskurve enthalten die absoluten Zahlenwerte der beobachteten Temperaturen in $^{\circ}\text{C}$, wogegen die thermische Zustandsgleichung für die Erwärmung nur die Differenzwerte in bezug auf die hier

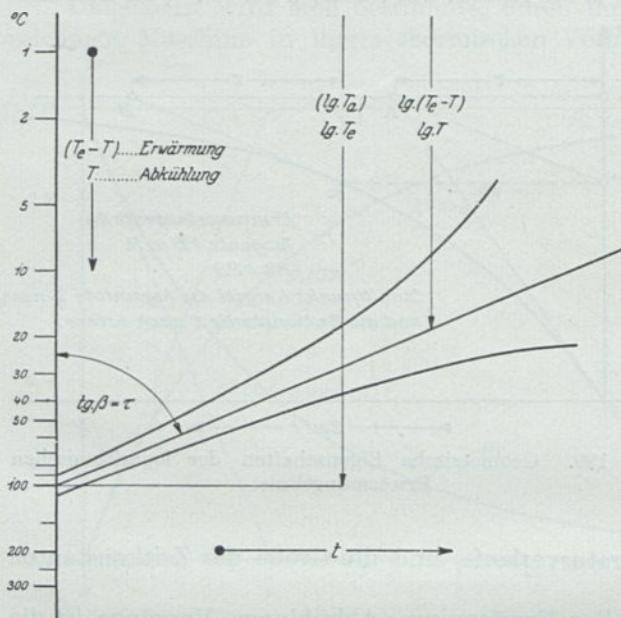


Abb. 201. Darstellung der logarithmischen Linie im halblogarithmischen rechtwinkeligen Bezugssystem. Abszissen regulär, Ordinaten logarithmisch geteilt. Divergenz der Linie für unrichtiges T_e bzw. T_a .

Unrichtig aufgetragen, divergieren die eingetragenen Beobachtungswerte in bezug auf die dem unbekannten Wert von T_e entsprechenden Geraden, und zwar in konvexem oder konkavem Sinne, je nachdem die Beobachtungswerte in der Skala zu niedrig oder zu hoch eingetragen sind.

Einige Versuche führen zur Auffindung der richtigen Relativlage der Beobachtungswerte und damit zur Festlegung von T_e , vorausgesetzt, daß der betreffende Prüfbericht sich über eine ausreichende Zeitdauer erstreckt und eine genügende Anzahl Beobachtungswerte aufweist. Damit ist auch der Zahlenwert von τ gefunden, weil die Tangente des Neigungswinkels der Temperaturgeraden b gegen die Senkrechten im halblogarithmischen System — $\operatorname{tg} \beta$ — ein Maß für die Zeitkonstante bildet.

Aus Gl. 6, der Abkühlungslinie, folgt, daß

$$\tau = \frac{t \operatorname{lg} e}{\operatorname{lg} T_a - \operatorname{lg} T}.$$

Der bildlichen Darstellung im halblogarithmischen Bezugssystem ist zu entnehmen, daß

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{tb}{(\operatorname{lg} T_a - \operatorname{lg} T)a}.$$

noch unbekannte, für die betreffende Belastung kennzeichnende Endtemperatur T_e enthält. Um daher die Beobachtungswerte in ein halblogarithmisches System richtig auftragen zu können, müßte zunächst T_e auf anderem Wege berechnet werden. Diese Rechnung würde der Feststellung vorgreifen, ob die Erwärmungskurve dem logarithmischen Gesetz folgt. Über diese Schwierigkeit hilft die Erkenntnis hinweg, daß die logarithmische Linie sich in einem halblogarithmischen Bezugssystem zu einer geraden Linie streckt. Die einzelnen Beobachtungspunkte liegen nur dann in einer Geraden, wenn die Werte relativ zur zugehörigen Endtemperatur richtig aufgetragen sind, weil der Längeneinheit in verschiedenen Bereichen der Ordinaten andere Temperaturwerte entsprechen, indem die logarithmische Skalenteilung nicht gleichmäßig ist (Abb. 201).

Ebenso für die Erwärmungsgerade

$$\tau = \frac{t \cdot \lg e}{\lg T_e - \lg (T_e - T)} \quad \text{und} \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{tb}{[\lg T_e - \lg (T_e - T)]a}.$$

Hieraus

$$\tau = \frac{a \lg e}{b} \operatorname{tg} \beta = \text{Const. } \operatorname{tg} \beta,$$

wo

a den Temperaturmaßstab,

b den Zeitmaßstab und

e die Basis der natürlichen Logarithmen

bezeichnet.

Aus dieser Bedeutung des Neigungswinkels der Temperaturlinie im halblogarithmischen System folgt, daß die Zeitkonstante ein Maß für die Geschwindigkeit der Temperaturänderung bildet; denn ein größeres τ bedeutet eine weniger steil ansteigende Temperaturlinie, somit ein vergleichsweise geringeres Temperaturgefälle in einem gegebenen Zeitabschnitt.

Zu beachten ist, daß eine diesbezügliche Schlußfolgerung nur für gleiche Endtemperaturen zulässig ist. Im Bereich hoher Temperaturen mißt die Längeneinheit vergleichsweise viel größere Temperaturunterschiede als in den niedrigen Temperaturen.

In der Praxis werden Temperaturlinien für die Dauerleistung und einige Erwärmungslinien für kurzzeitige Belastungen sämtlich bis zur zulässigen Temperaturgrenze zur Verfügung stehen.

Aus beobachteten Temperaturlinien, die sich über eine vergleichsweise größere Dauer erstrecken, wird τ durch Eintragung der Beobachtungswerte in ein halblogarithmisches Bezugssystem und der zugehörigen T_e -Werte mit großer Schärfe feststellbar sein.

Für die kurzzeitigen Überlastungen ist dies nicht mehr der Fall. Da jedoch der Charakter der Erwärmungslinien mit hohen Endtemperaturen im Gebrauchsbereich von etwa $0-80^\circ$ von der zutreffenden Bestimmung von τ kaum beeinflußt wird, wenn die durch die kurzzeitigen Belastungen erzielten Temperaturwerte festgehalten werden, ist es zulässig anzunehmen, daß die für die Dauerleistung ausgewertete τ -Zahl Gültigkeit behält.

Auf Grund dieser Annahme können aus Gl. 5 die ideellen Endtemperaturen berechnet werden

$$T_e = \frac{T}{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}}.$$

Für genauere Rechnungen wird man für mehrere Zeitpunkte feststellen, ob die beobachtete Erwärmungslinie mit der berechneten zur Genüge übereinstimmt; sollte dies nicht der Fall sein, führt man in die Rechnung ein entsprechend verändertes τ ein, auf Grund dessen man ein neues T_e findet.

Besteht im Hinblick auf die jeweilige Aufgabe kein Bedürfnis für die Auswertung der thermischen Charakteristik, handelt es sich vielmehr nur um die rasche Feststellung einiger Punkte, kann man sich einer zur allgemeinen Lösung der Temperaturgleichungen geeigneten Verhältnis-Rechentafel bedienen.

Mit Hilfe dieser Rechentafel kann man unter anderen τ ohne Kenntnis von T_e bestimmen, wenn die Temperaturen in drei Zeitpunkten, die gleichgroßen Zeitabschnitten (t) entsprechen, bekannt sind.

Dies wird z. B. für die kurzzeitigen Belastungen ($1/\frac{1}{2}^{\text{h}}$, 1^{h} -Leistung) meistens der Fall sein.

Die Verhältnistafel löst Gleichungen der Form

$$f(x) - f(y) = \frac{f(v)}{f(w)},$$

deren Übereinstimmung mit der logarithmischen Form der Temperaturgleichungen 5a und 5b ersichtlich ist.

Zwischen drei je um den Zeitabschnitt Δt entfernten Temperaturwerten T_1 , T_2 , T_3 einer durch Prüfung gefundenen Temperaturkurve bestehen die Beziehungen:

$$T_1 = T_e \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right) \dots T_e - T_1 = T_e e^{-\frac{t_1}{\tau}}$$

$$T_2 = T_e \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}\right) \dots T_e - T_2 = T_e e^{-\frac{t_2}{\tau}}$$

$$T_3 = T_e \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau}}\right) \dots T_e - T_3 = T_e e^{-\frac{t_3}{\tau}}$$

hieraus

$$\frac{T_e - T_2}{T_e - T_1} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

andererseits

$$T_2 - T_1 = (T_e - T_1)(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})$$

$$T_3 - T_2 = (T_e - T_2)(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})$$

hieraus

$$\frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_1} = \frac{T_e - T_2}{T_e - T_1},$$

so daß

$$e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = \frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_1}$$

oder

$$\frac{\Delta t}{\tau} \lg e = \lg \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_2} = \lg \frac{T_e - T_1}{T_e - T_2},$$

schließlich

$$\lg(T_2 - T_1) - \lg(T_3 - T_2) = \frac{t \lg e}{\tau}$$

$(T_e - T_1)$, $(T_3 - T_2)$ und Δt sind gemäß der Annahme bekannt, daher findet man mit Hilfe der Rechentafel die eine der gesuchten thermischen Kennzahlen der untersuchten Maschine: die Zeitkonstante.

Für die Erwärmungslinie der Stundenleistung angewendet, werden bekannt sein

$$\text{für } t_1 = 0 \quad T_1 = 0, \quad \text{für } t_2 = 1/2^{\text{h}}, \quad T_2 \quad \text{und}$$

$$\text{für } t_3 = 1^{\text{h}} \quad T_3 = 75^{\circ}$$

woraus τ gefunden werden kann.

Die andere mit der Belastung veränderliche Kennzahl der Maschine: die Endtemperatur T_e berechnet sich

$$\lg T_e - \lg(T_e - T_1) = \frac{t_1 \lg e}{\tau}$$

oder

$$\lg T_e - \lg(T_e - T_2) = \frac{t_2 \lg e}{\tau}$$

$$\text{und} \quad T_e = \frac{T_2^2 - T_1 T_2}{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_2)}.$$

Zur Auswertung einer Abkühlungskurve für verlustlosen Leerlauf genügen — da eine Bestimmungsgröße in der Endtemperatur Null festliegt — zwei

um den Zeitabschnitt Δt entfernte Temperaturwerte T_1 , T_2 , aus deren Kenntnis sich ergibt:

$$e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = \frac{T_2}{T_1}$$

oder

$$\lg e^{\frac{\Delta t}{\tau}} = \lg \frac{T_1}{T_2}$$

und

$$\lg T_1 - \log T_2 = \lg e \cdot \frac{\Delta t}{\tau}.$$

d) Vereinigung der thermischen und elektromechanischen Charakteristik. Mit Hilfe der hier geschilderten Verfahren und Behelfe wird es möglich sein, auf Grund der Beobachtung von verhältnismäßig wenigen Belastungen der in Frage stehenden Maschine durch Zwischenschätzung eine stetige Kurve für den Zusammenhang von T_e mit den veränderlichen Betriebsgrößen Stromstärke (Zugkraft, Drehmoment), Drehzahl (Geschwindigkeit), Leistung und Wirkungsgrad zu zeichnen.

Dasselbe gilt bezüglich der Zeitkonstante, bzw. man wird feststellen können, ob diese mit einem auch für verschiedene Belastungen unveränderlichen Zahlenwert in die weiteren Rechnungen eingeführt werden kann.

Wählt man zu der Darstellung der Stromstärke (J) bzw. der Zugkraft (Z) oder der Drehzahl (n) in Abhängigkeit von T_e ebenso von $\tau = f(T_e)$ dasselbe halblogarithmische Bezugssystem, das für die Temperaturkurven verwendet wurde, mit gemeinsamer logarithmischer Teilung der Ordinate für die Temperaturen, erhält man zwar im Vergleich zu der üblichen elektromechanischen Charakteristik verzerrte Linien, dafür aber den Vorteil, daß jeder Belastung gleich die durch sie verursachte Erwärmung gegenübersteht. Die Abbildungen 202 bis 205 stellen einige Beispiele

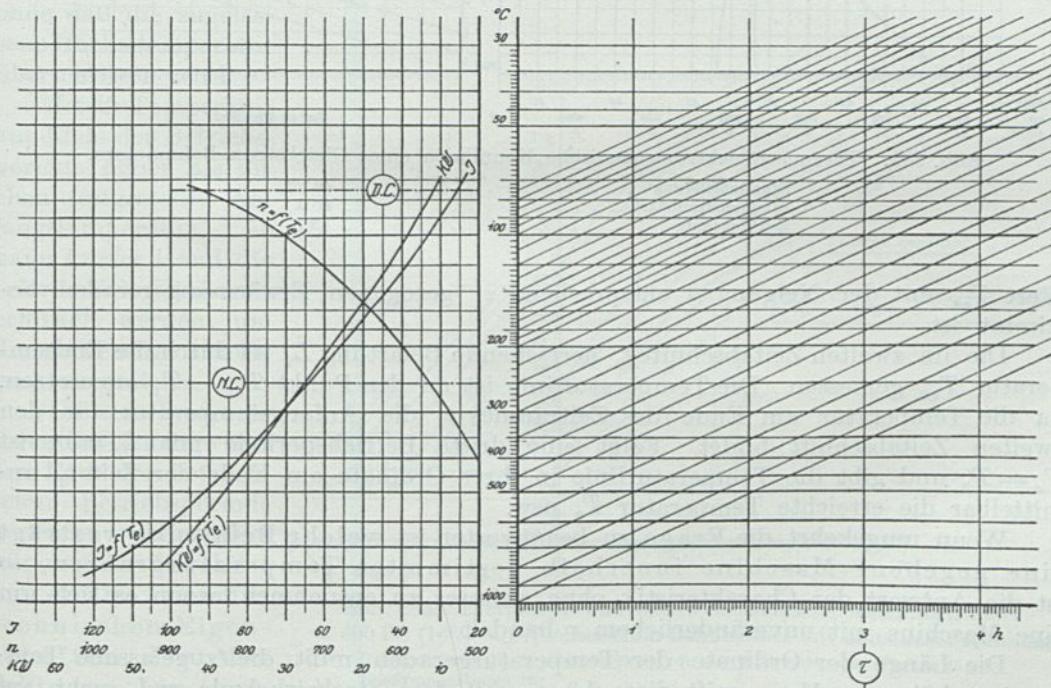


Abb. 202. Thermische und elektromechanische Kennlinien eines Gleichstrom-Bahnmotors.

Bauart: geschlossen, Gehäuse einteilig. Leistung: normal (NL) 26,5 kW, dauernd (DL) 11,0 kW. Leistung: normal 560 i.d. Min., dauernd 250 i. d. Min. Spannung: 500 V. Zeitkonstante: ≈ 3 h.

für diese erstmalig vom Verfasser angegebene vereinigte Darstellungsart der thermischen und elektromechanischen Charakteristiken dar.

Zur Auslegung einer Temperaturlinie für wechselnde Belastung, wie sie im Bahnbetrieb die Regel ist, verfährt man wie folgt, wenn man über die in obiger Weise dargestellten Charakteristiken verfügt.

Von $t=0$, $T=0$ beginnend (Abb. 204), wird durch die unveränderliche Belastung L_1 (Mittelwert), zugeordnet der Endtemperatur T_{e1} am Ende des Zeitabschnittes t_1 , die Erwärmung T_1 bewirkt, die durch die Ordinate der vom

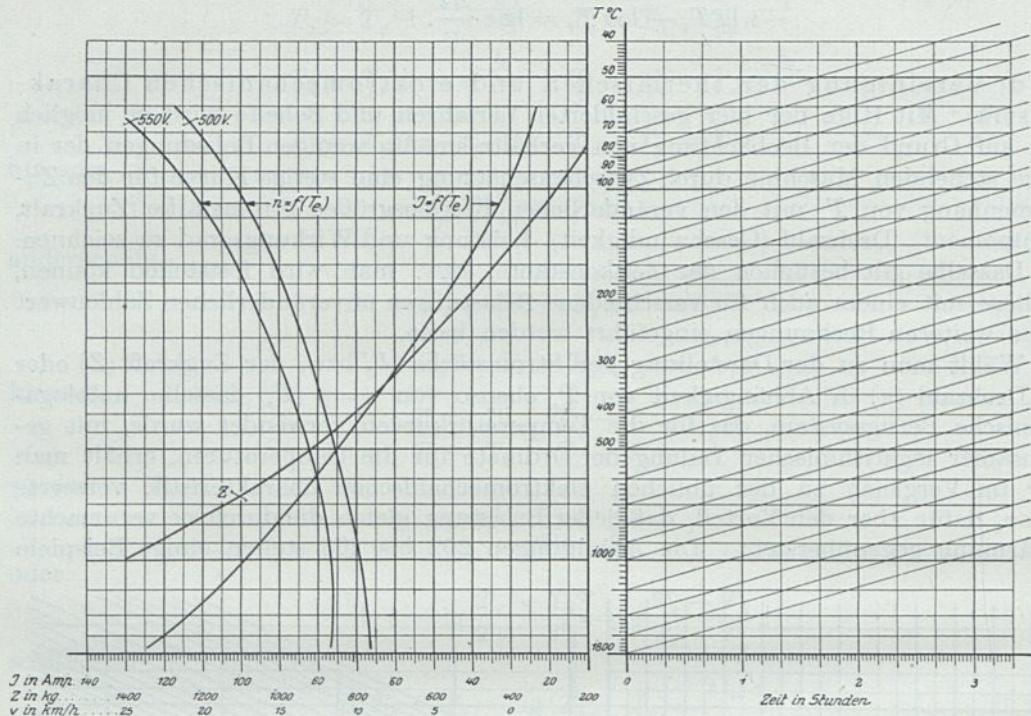


Abb. 203. Thermisch-elektromechanische Kennlinien eines Gleichstrom-Bahnmotors.

Stundenleistung	40 PS
Stundenstromstärke	65 A
Zeitkonstante	4,8 h

Wert T_{e1} mit der Neigung β entsprechend t_1 gezogenen Erwärmungsgeraden bestimmt ist.

Die im zweiten Zeitabschnitt t_2 herrschende Belastung L_2 sei durch die Endtemperatur T_{e2} gemessen. Die Temperaturlinie ist an den Punkt $T_{e2} - T_1$ anzusetzen, da die Temperatur am Ende des Zeitraumes t_1 die Anfangstemperatur für den zweiten Zeitabschnitt bildet. Folgt eine dritte Betriebsperiode mit $L_3 = 0$, ist $T_a = T_2$ und gibt die Temperaturlinie in ihrer Ordinate am Ende der Zeit t_3 unmittelbar die erreichte Temperatur T_3 usw.

Wenn umgekehrt die Frage zu beantworten ist, welche Belastung verträgt eine gegebene Maschine innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen, so ist die Antwort der Charakteristik ohne weiteres zu entnehmen, wenn es sich um eine Maschine mit unveränderlichem τ handelt.

Die Länge der Ordinate der Temperaturgeraden mißt die zugelassene Temperaturerhöhung. Man greift diese Länge mit dem Stechzirkel ab und sucht auf der Ordinatenskala denjenigen Bereich, in welchem dieser Länge der gegebene Zahlenwert von T_n entspricht.

Für den Fall, daß τ veränderlich ist, sind zwei Unbekannte zu suchen; man muß daher vorläufig in die Rechnung mit einem angenommenen τ gehen und durch Wiederholung die zusammengehörigen Werte feststellen.

Es bedarf keines Beweises, daß es bei diesem Verfahren gleichgültig ist, bei welchem Temperaturwert die Bestimmung der Kurve begonnen wird.

Diese Feststellung ist für den Fall der periodischen Wiederholung gleicher Bewegungsbilder von Wichtigkeit. In diesen wird es meist vorweg zu erkennen sein, an welcher Stelle bzw. in welchem Zeitpunkt der Eintritt der höchsten Temperatur zu gewärtigen ist. Diesen Punkt mißt man vorweg die zugelassene Höchsttemperatur T_m zu und rechnet von hier zurück und vor. Man findet auf diese Weise die höchste Anfangstemperatur, mit welcher die Fahrt begonnen werden kann, ohne daß die zugelassene Höchsttemperatur überschritten wird.

Ist die Temperatur am Ende der Betriebsperiode höher als die eben festgestellte Anfangstemperatur, so kann kurzer Hand die erforderliche Ruhezeit ermittelt werden, um die notwendige Abkühlung zu erzielen.

Gleiche Temperaturen am Anfange und am Ende der betrachteten Betriebsperiode bedeuten volle Ausnützung der Maschine.

e) Die wärmetechnischen Eigenarten der Maschinen. Die thermische Zeitkonstante ist eine Eigen-

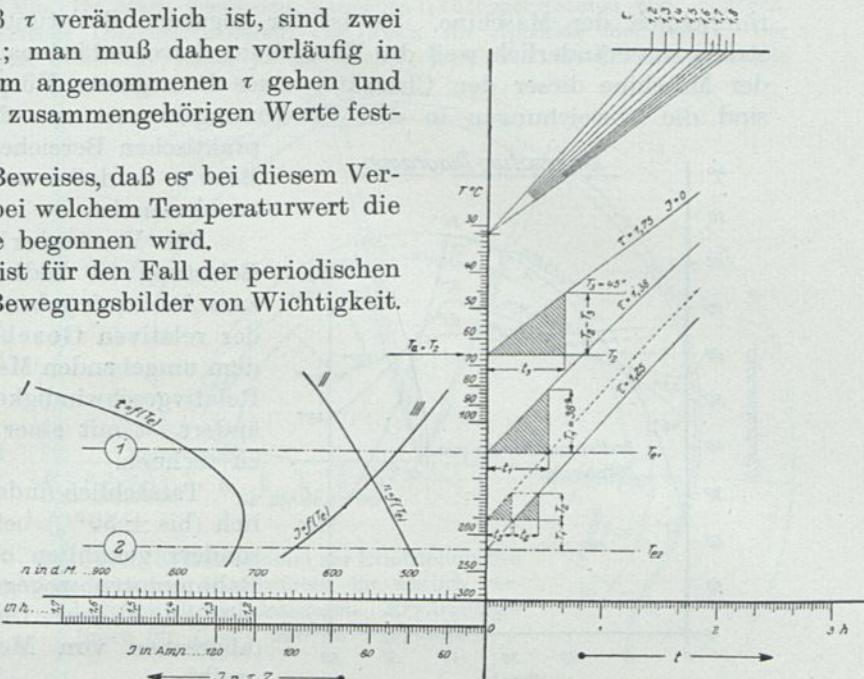


Abb. 204. Darstellung des Verfahrens zur Ermittlung einer Erwärmungskurve für wechselnde Belastung und mit veränderlicher Zeitkonstante.

Beispiel:

$$\begin{array}{llll} J_1 = 73,5 \text{ A} & t_1 = 32' & \tau = 1,88 \text{ h} & T_{e1} = 120^\circ \text{ C} \\ J_2 = 100,0 \text{ "} & t_2 = 13' & \tau = 1,25 \text{ "} & T_{e2} = 220^\circ \text{ "} & T_1 + T_2 = 66^\circ \text{ "} \\ J_3 = 0,0 \text{ "} & t_3 = 40' & \tau = 1,75 \text{ "} & T_a = 66^\circ \text{ "} & T_3 = 45^\circ \text{ "} \\ & & & \text{usw.} & \end{array}$$

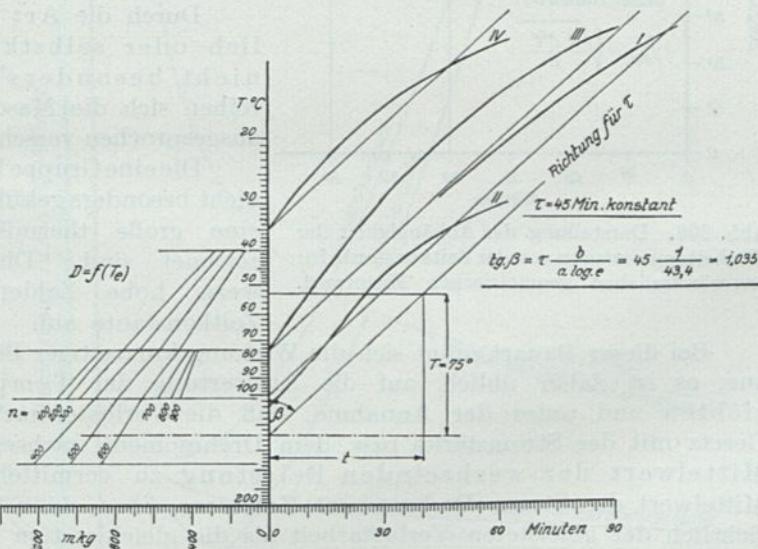


Abb. 205. Thermische und elektromechanische Kennlinien eines ~ 600 PS ($16^2/3 \sim$) Wechselstrom-Bahnmotors mit künstlicher Kühlung.
Drehmomente (D) in Abhängigkeit von der Endtemperatur T_e . $\tau = 45$ min.

Erwärmungslinien für

- I. 600 m/kg Belastung bei 550 Umdr/min.
- II. 780 " " " 550 " "
- III. 0 " " " 550 " "
- IV. 407 " " " 550 " "

tümlichkeit der Maschine. Sie ist für gegebene Belastungsfälle zeitlich oft nicht streng unveränderlich, weil die Einwirkung der verschiedenartig beanspruchten Teile der Maschine dieser den Charakter eines homogenen Körpers nimmt. Immerhin sind die Abweichungen in den Erwärmungskurven von der Exponentiallinie im

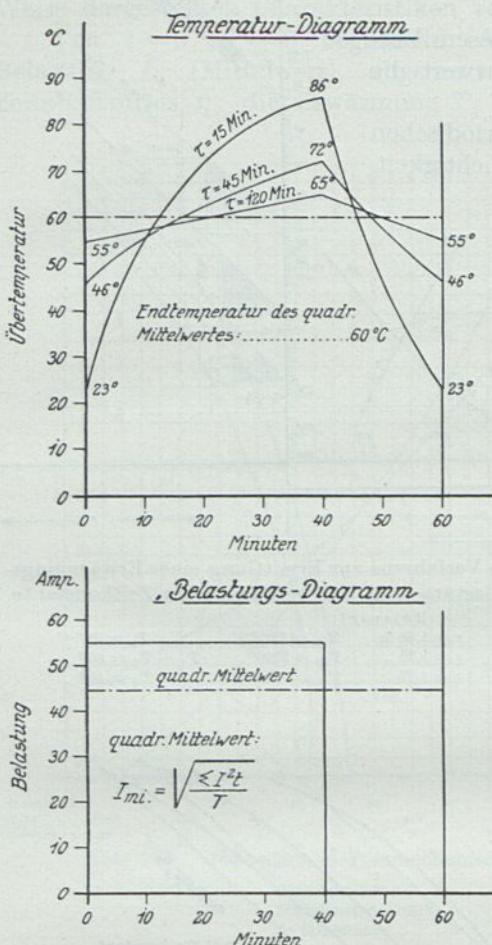


Abb. 206. Darstellung der Abhängigkeit der Höchsttemperaturen von der Zeitkonstante für unveränderlichen geometrischen Mittelwert.

Bei dieser Bauart prägt sich die Wirkung kurzzeitiger Belastungsvorgänge wenig aus; es ist daher üblich, auf die Auswertung der Temperaturlinie zu verzichten und unter der Annahme, daß die Verluste nach einem geometrischen Gesetz mit der Stromstärke bzw. dem Drehmoment wachsen, den quadratischen Mittelwert der wechselnden Belastung zu vermitteln. Dieser quadratische Mittelwert der Strom-(Drehmoment)-Zeitkurve über einen Zeitabschnitt wird hinsichtlich der geleisteten Verlustarbeit als die gleichwertige Belastung angesehen.

Von diesem Verfahren können nur bedingt brauchbare Resultate erwartet werden, da es einerseits das quadratische Verhältnis zwischen Verlusten und Belastung voraussetzt, andererseits den zeitlichen Verlauf der Temperatur und den tatsächlich erreichten Höchststand nicht berücksichtigt.

Abb. 206 stellt für einen einfachen Fall aussetzenden Betriebes den Temperaturverlauf einer im quadratischen Mittelwert für eine Endtemperatur von 60°C berechneten Maschinen (Apparate) bei verschiedenen Werten der Zeitkonstanten dar; der Wert $\tau = 120$ Min. gibt für geschlossene Bahn-

praktischen Bereiche der Temperaturen ohne Belang, so daß τ zeitlich als Festwert anzunehmen ist.

Die Veränderlichkeit von τ mit der Belastung ist bedingt durch die in Gl. 3 zum Ausdruck gebrachte Veränderlichkeit der relativen Geschwindigkeit gegenüber dem umgebenden Medium. Soweit sich diese Relativgeschwindigkeit mit der Belastung ändert, ist mit einer Veränderlichkeit von A zu rechnen.

Tatsächlich findet man τ stark veränderlich (bis $\pm 50\%$) bei gekapselten, nicht besonders gekühlten oder selbstventilierenden Bahnmotoren, wogegen sich τ bei Maschinen mit künstlicher Durchlüftung von außen (abgesehen von Meßfehlern) als Festwert ergibt.

Die Sonderheit der Anordnung der Motorkühlung kommt auch in der Größenordnung der Zeitkonstante und damit auch der Verschiedenheit im Verhalten der Maschine gegenüber thermischen Beanspruchungen zum Ausdruck.

Durch die Art der Kühlung, künstlich oder selbstkühlend einerseits und nicht besonders gekühlt andererseits, reihen sich die Maschinen in zwei, ziemlich ausgesprochen verschiedene Gruppen.

Die eine Gruppe bilden die gekapselten, nicht besonders gekühlten Motoren, die durch eine große thermische Trägheit gekennzeichnet sind. Diese weisen vergleichsweise hohe Zahlenwerte 3—6^h für die Zeitkonstante auf.

oder Kranmotoren, $\tau = 45$ Min. für stark ventilierende Maschinen (Turbogeneratoren und -motoren, stark ventilierende, schnell laufende Lokomotivmotoren), $\tau = 15$ Min. für Apparate und Kabel. Der Temperaturverlauf folgt dem Belastungswechsel um so rascher, je kleiner die Zeitkonstante (die Wärmekapazität) und ist um so trüger, je größer die letztere ist.

Das Verfahren des quadratischen Mittelwertes erscheint hier nach für geschlossene

Gleichstrom-Bahn- und Kranmotoren mit großer Zeitkonstante und in kurzen Zeiträumen wiederkehrenden Belastungs-

Leerlaufzuständen wohl geeignet, die Anstrengung des Motors zu beurteilen.

Die Ausrechnung und Auftragung der quadratischen Belastungslinie ist eine zeitraubende Arbeit, die wesentlich gekürzt und vereinfacht werden kann, wenn man die Belastungslinien als Radien in einem Kreisdiagramm aufträgt. (Abb. 207.) Die Winkelteilung ist ein Maß für die Zeit. Durch Planimetrieren der von der so gewonnenen Belastungslinie umschlossenen Fläche erhält man auf gleiche Zeitabschnitte (Zentriwinkel) bezogen den Halbmesser des gleichflächigen Kreises, der das gesuchte geometrische Mittel darstellt.

Im Hinblick auf die ohne Umständlichkeit erreichbare größere Genauigkeit des hier beschriebenen Verfahrens wird man vorziehen, die Temperaturerhöhung zu ermitteln, statt eine ideale, der Wirklichkeit doch nicht entsprechende Belastung umständlich auszurechnen.

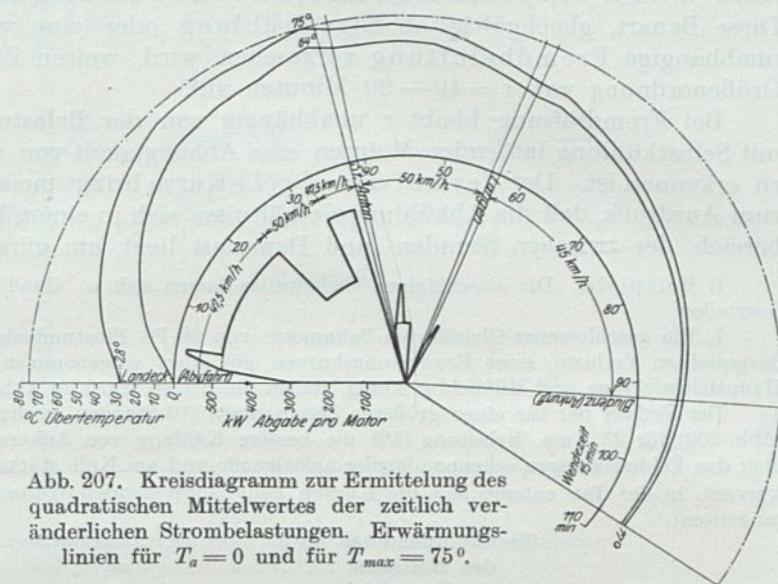


Abb. 207. Kreisdiagramm zur Ermittlung des quadratischen Mittelwertes der zeitlich veränderlichen Strombelastungen. Erwärmungslinien für $T_a = 0$ und für $T_{max} = 75^\circ$.

In die zweite Gruppe sind Maschinen zu zählen, die dank der angewandten wirksamen Kühlung eine vergleichsweise kleine Zeitkonstante aufweisen, daher in ihrer Temperaturänderung rasch dem kurzzeitigen Belastungswechsel folgen. Diese Bauart, gleichgültig ob Eigenkühlung oder eine von der Motordrehzahl unabhängige Fremdbelüftung vorgesehen wird, weisen Zeitkonstanten von der Größenordnung von $\tau = 40 - 90$ Minuten auf.

Bei Fremdlüftung bleibt τ unabhängig von der Belastung, wogegen bei den mit Selbstkühlung laufenden Motoren eine Abhängigkeit von der Belastung (Umlauf) zu erkennen ist. Der Verlauf der $\tau = f(L)$ -Kurve bringt meistens auch die Tatsache zum Ausdruck, daß die Abkühlungsverhältnisse sich in einem bestimmten Belastungsbereich, der zwischen Stunden- und Dauerlast liegt, am günstigsten gestalten.

f) Beispiele. Die einschlägigen Verhältnisse lassen sich an Hand von Beispielen am besten beurteilen.

I. Ein geschlossener Gleichstrom-Bahnmotor von 36 PS Einstundenleistung hat die in Abb. 208 dargestellten Verluste; seine Erwärmungskurven, gesondert aufgenommen für Ankereisen, Kollektor, Hauptfeldwicklung und Hilfsfeldwicklung, stellen die Belastbarkeit in Abhängigkeit von der Zeit dar.

Der Verlauf der für einen größeren Zeitabschnitt (10 Stunden) vorliegenden Erwärmungskurven (Abb. 209) für 25 Amp. Belastung lässt die bessere Kühlung von Ankereisen und Kollektor gegenüber den Feldwicklungen erkennen (steiler ansteigende und am Knie stärker abgebogene Erwärmungskurven); in der Tat entsprechen die Kurven den nachstehenden Werten der Zeitkonstanten (Subtangentialen):

für das Ankereisen	= etwa 3 Std.
„ den Kollektor	= „ 3 „
„ die Hauptfeldwicklung	= „ 4½ „
„ die Hilfsfeldwicklung	= „ 5 „

Die Kurven der Abb. 209 kennzeichnen den Anker als den für alle Belastungsfälle hinsichtlich Erwärmung maßgebenden Teil der Maschine.

Die zehnstündige (dauernde) Belastbarkeit des Motors mit 23 Amp. für eine Übertemperatur des Ankereisens von 70°C ergibt den spezifischen Wärmeverlust des Ankers:

aus den Kernenverlusten 440 Watt
und den $I^2 r$ -Verlusten im Ankerkupfer 220 „
 $W = 660$ Watt

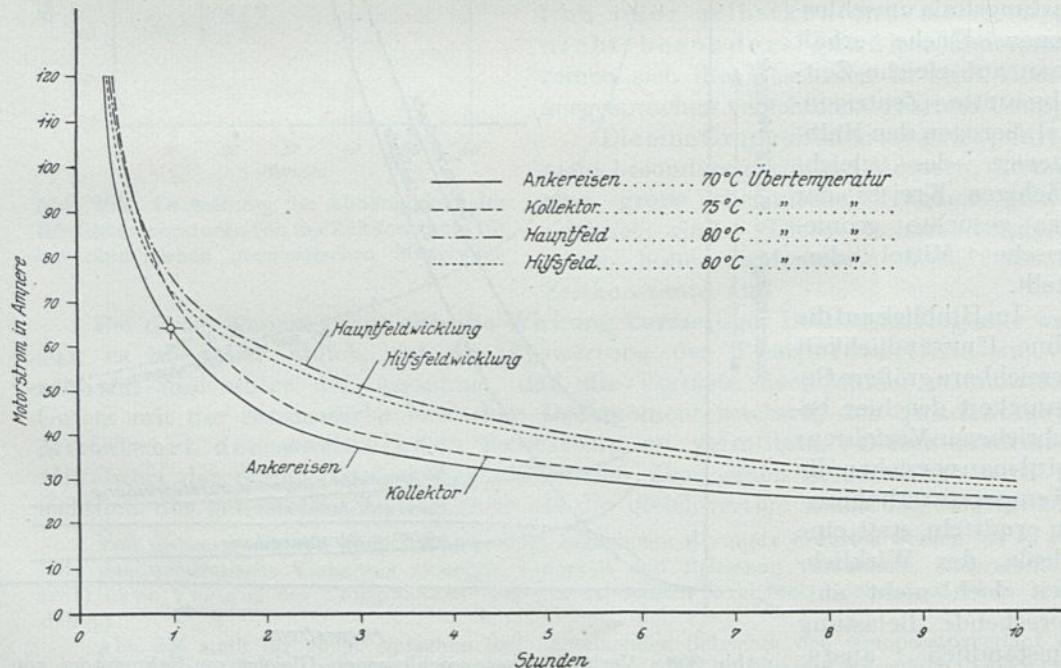


Abb. 209. Thermische Charakteristik eines geschlossenen 36 PS/h-Gleichstrom-Bahnmotors.

zu $A = \frac{W}{T_e} = 9,4 \text{ Watt}/^\circ\text{C}$ bei 890 Ankerumläufen p. m. Setzt man für die Abhängigkeit von der Umlaufzahl das Gesetz nach Gleichung 3 an, so folgt:

für $I =$	25	40	64	120	Ampere
entsprechend	860	680	560	410	U.p.m.
ist $A =$	9,3	8,6	8,0	7,1	Watt/ $^\circ\text{C}$.

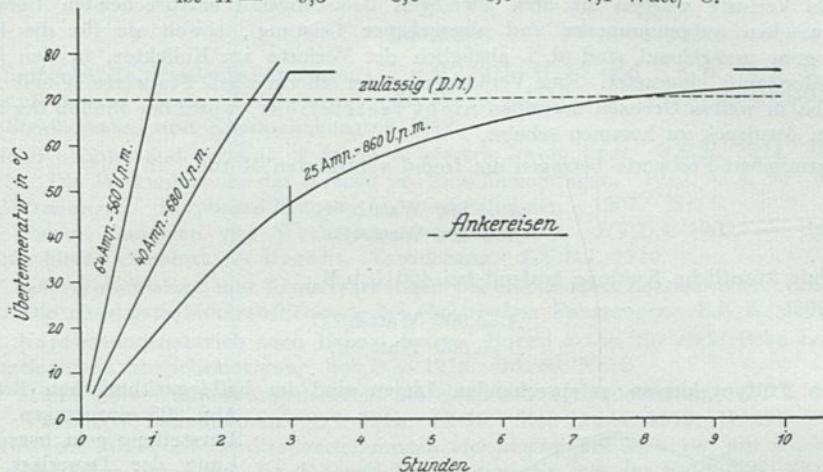


Abb. 210a. Erwärmungskurven eines 36 PS Bahnmotors (Ankereisen).

Der Anstieg der Temperaturkurven zu Beginn der Erwärmung (nach der Ursprungstangente) ergibt die Wärmekapazität des Ankers:

$$\begin{aligned} &\text{für } I = 25 \quad 40 \quad 64 \quad 120 \quad \text{Amp.} \\ &\text{ist } \frac{dT}{dt} \text{ für } t = 0 \quad 0,42 \quad 0,7 \quad 1,3 \quad 4 \quad ^\circ\text{C/Min.} \\ &\text{Kernverluste} \quad 440 \quad 500 \quad 500 \quad 440 \quad \text{Watt} \\ &I^2 r \text{ im Ankercupfer} \quad 270 \quad 680 \quad 1750 \quad 6140 \\ &W = 710 \quad 1180 \quad 2250 \quad 6580 \\ &A = \frac{W}{dT/dt} \quad 28,4 \quad 28,2 \quad 28,8 \quad 27,4 \quad \text{Watt-h}/^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

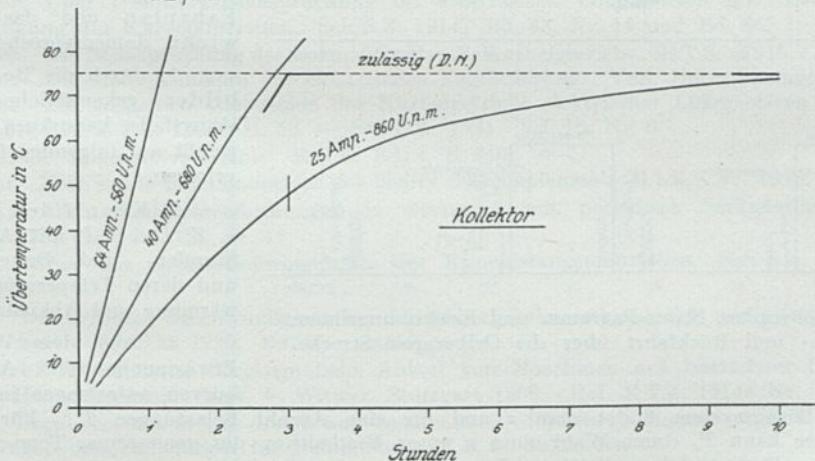


Abb. 210b. Berechnete Erwärmungskurven eines 36 PS Bahnmotors (Kollektor).

Entsprechend den vorstehenden Werten variiert die Zeitkonstante $\tau = \frac{A}{A}$ zwischen 3 und 4 h.

Für die Hauptfeldwicklung ergibt sich auf gleiche Weise wie vorhin für den Anker der spezifische Wärmeverlust $A = 2,7 \text{ Watt}/^\circ\text{C}$, die Wärmekapazität $A = 12,2 \text{ Watt-h}/^\circ\text{C}$, die Zeitkonstante $\tau = 4\frac{1}{2} \text{ Stunden}$; für die Hilfsfeldwicklung betragen die entsprechenden Werte $A = 1,5 \text{ Watt}/^\circ\text{C}$, $A = 7,5 \text{ Watt-h}/^\circ\text{C}$, $\tau = 5 \text{ Stunden}$; alle Werte sind praktische Festwerte.

Mit Hilfe dieser Festwerte sind die Erwärmungslinien Abb. 210 berechnet.

II. Die thermischen Festwerte A und A' eines fremd ventilierten Wechselstrom-Lokomotiv-motors von 400 PS Dauer- und 560 PS Einstundenleistung bei 600 U.p.M. wurden aus einer Reihe von Versuchen unter dauernder und einstündiger Belastung über den Bereich von 100 bis 900 Ankerumläufen/min. ermittelt (Abb. 205). Sie gelten für den Rotor als den in allen Fällen wärmsten Teil der Maschine unter den tatsächlichen Betriebsverhältnissen im belasteten Motor (Einwirkung des Stators). Als Verluste wurden die dem jeweiligen Belastungsfall entsprechenden Gesamtverluste (Differenz zwischen aufgenommener und abgegebener Leistung), soweit sie für die Erwärmung des Motorrumpfes maßgebend sind (d. i. abzüglich der Verluste am Kollektor, in den Lagen, im Wendefeldwiderstand) eingesetzt. Eine Veränderung der thermischen Festwerte A und A' mit der Umlaufzahl ist in weiten Grenzen derselben nicht feststellbar, worin der Einfluß der künstlichen Kühlung zum Ausdruck zu kommen scheint.

Die thermischen Festwerte betragen am fremd ventilierten Motor:

$$A = 360 \text{ Watt}\cdot\text{h}/^\circ\text{C}$$

am Motor ohne künstliche Kühlung laufend bei 400 U.p.M.:

$$A = 330 \text{ Watt}/^{\circ}\text{C}$$

Die den Prüfungskurven entsprechenden Linien sind im halblogarithmischen Bezugssystem

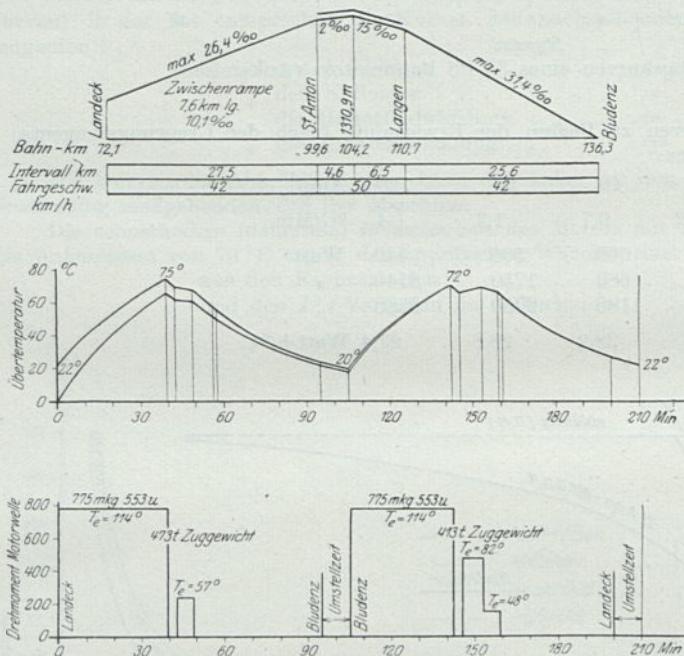


Abb. 211. Höhenplan, Stromdiagramm und Erwärmungslinien für eine Hin- und Rückfahrt über die Orlbergpaß-Strecke.

rithmischen Bezugssystem, findet man τ und für eine Anzahl liegende Werte kann T_e durch Wahl eines τ unter Festhaltung mit Hilfe einer Rechentafel ermittelt werden.

4. Die thermischen und elektromechanischen Kennlinien werden sämtlich auf T_e als gemeinsame Veränderliche in einem Diagramm mit rechtwinkligem halblogarithmischen Bezugssystem vereinigt, aus welchem für jede Belastung die in einem Zeitabschnitt auftretende Temperaturänderung abgelesen werden kann.

halb logarithmischen Bezugssystem Abb. 205 eingetragen. Aus dieser Darstellung geht hervor, daß die Linie der Dauerlast (I) innerhalb des in Betracht kommenden Temperaturbereichs mit der für $\tau = 45$ min. gezeichneten Temperaturlinie übereinstimmt und auch für andere Belastungen mit dieser Zeitkonstante gerechnet werden kann.

III. Die Auswertung der Temperaturlinie — Abb. 211 — der elektrischen Einrichtung bzw. der Triebmotore usw. eines Fahrzeuges für einen durch den Fahrplan und das Zugsge- wicht, dementsprechend

1. durch die Bewegungsbilder gekennzeichneten Belastungsfalles kann kurz zusammengefaßt auf folgenden Grundlagen erfolgen.

2. Kennlinien des Motors
 $n, Z, L = f(J)$ mit Angabe der Stunden- und Dauerleistungen und deren Temperaturlinien (Erwärmung und Abkühlung).

3. Aus dem Verlauf der Erwärmungs- und Abkühlungskurven, aufgetragen im halblogarithmischen System, ist die Belastung T_c zu ermitteln. Für zwischen den gemessenen Temperaturwerten

VI. Die Bauformen des Bahnmotors.

Das Getriebe.

Literatur:

- Adler. Luftgekühlte Straßenbahnmotoren. E.u.M. 1915. H. 49 und E.K.B. 1915. H. 32.
 Bacqueyrisse und Eisig. Erfahrungen mit Wendepolmotoren im Straßenbahnbetriebe. XVII. Int. Straßenbahn- und Kleinbahnkongreß 1912.
- Batchelder. Types and systems of drives of electric locomotives. G.E.R. 1914. Nr. 7.
- Bolstorff. Die Wirkungsweise der Kreisel im Einschienenwagen. 1910. G.A. Nr. 784.
- B.B.C. Mitteilungen. Einphasen-Motoren für Grubenbahnen. 1907. Nr. 6.
- Brecht. Neuere Bauarten von Wechselstrom-Lokomotiven. Z.V.D.I. 1909. — Sanzin. Bemerkungen hierzu ebendort. — Brecht. Erwiderung. Z.V.D.I. 1910.
- Brecht. Schwerpunktslage und Kreiselwirkungen bei elektrischen Lokomotiven. E.K.B. 1910. H. 7.
- Brecht. Die günstigste Motoraufhängung bei elektrischen Fahrzeugen. E.K.B. 1909. H. 10.
- Buchli. Kuppelstangenantrieb nach Bauart Brown, Boveri & Cie. für elektrische Lokomotiven mit hochgelagerten Antriebsmotoren. Sch.B.Z. 1912. Bd. 60. Nr. 2.
- Buchli. Studie über Kuppelstangenantrieb bei elektrischen Lokomotiven. E.T.Z. 1914. H. 22.
- Cooper. Ventilierte Bahnmotoren. L.I. 1918. H. 10. Ref. E.u.M. 1919. H. 18.
- Couwenhoven. Über die Schüttelerscheinungen elektrischer Lokomotiven mit Kurbelantrieb. Forschungsarbeiten des V.D.I. Nr. 218 und Dissertation Nr. 200 der Eidg. T.H. Zürich.
- Dodd. A review of some European electric locomotive designs. G.E.R. 1914. Nr. 1.
- Döry. Über Schüttelerscheinungen des Parallelkurbelantriebes elektrischer Lokomotiven. E.T.Z. 1920. H. 16.
- Döry. Über Schüttelerscheinungen des Parallelkurbelgetriebes elektrischer Lokomotiven. Sch.B.Z. 1921. Bd. 78. Nr. 6.
- Eaton. Chattering wheel in electric motive power. Proc. 1916. Nr. 2.
- Heyden. Beitrag zur Frage des Antriebes elektrischer Vollbahnlokomotiven. E.K.B. 1909. H. 16.
- Holzer. Die Berechnung von Drehschwingungen. Verl. Julius Springer. 1921.
- Kleinow. Das Parallelkurbelgetriebe als Antriebsmittel für elektrische Lokomotiven. E.K.B. 1910. H. 25.
- Kleinow. Der Kuppelrahmen und verwandte Getriebe als Antriebsmittel für elektrische Lokomotiven. E.K.B. 1913. H. 17.
- Kummer. Über Triebwerksbeanspruchung bei elektrischen Lokomotiven mit besonderer Berücksichtigung des Kurbelantriebes. Sch.B.Z. 1914. Bd. 63. Nr. 14 und Bd. 64.
- Kummer. Die Beanspruchung der Lokomotiv-Parallelkurbelgetriebe. E.T.Z. 1915. H. 25.
- Kummer. Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung. Verl. Julius Springer, Berlin 1915.
- Kummer. Die kritischen Drehzahlen der Kurbelgetriebe elektrischer Lokomotiven. B.S.E.V. 1920. Nr. 9. Ref. E.T.Z. 1920. H. 52. — Sch.B.Z. 1921. Bd. 78. Nr. 6.
- Leboucher. Lokomotivgetriebe. R.G.E. Bd. 4. S. 910.
- L'Hoest. Note sur le fonctionnement des bielles d'accouplement. B.I.E.K.V. 1912. Bd. 26. S. 889.
- Meißner. Über Schüttelerscheinungen in Systemen mit periodisch veränderlicher Elastizität. Sch.B.Z. 1918. Bd. 72. Nr. 11.
- Müller. Über die Schüttelschwingungen des Kuppelstangenantriebes. Sch.B.Z. 1919. Bd. 74. Nr. 12.
- Müller. Die kritische Geschwindigkeit der Lötschberg-Lokomotive 1-E-1, analytisch und graphisch berechnet. Sch.B.Z. 1920. Bd. 75. Nr. 10.
- Pfleiderer. Dynamische Vorgänge beim Anlauf von Maschinen mit besonderer Berücksichtigung von Hebemaschinen. Verl. V. Witwer. Stuttgart 1906. Ref. E.T.Z. 1914. Nr. 36/37.
- Priest. Improvements in the design and construction of Railway Motors. G.E.R. Apr. 1920.
- Rau. Kugel- und Rollenlager für Bahnmotore. E.K.B. 1912. Nr. 18.
- Reichel. Vorläufige Grenzen im Elektromaschinenbau. Z.V.D.I. 1920. S. 1105.
- Stengel. Große Wechselstromlokomotivmotoren. E.K.B. 1920. H. 27.
- Seefehlner. Entwicklungsmöglichkeiten der elektrischen Vollbahnlokomotive. Sch.B.Z. 1921. Bd. 78. Nr. 2. — E.u.M. 1921. H. 38.
- Seefehlner. Das mechanische Triebwerk elektrischer Vollbahnlokomotiven. Z.V.D.I. 1920. Nr. 38. — E.u.M. 1920. Nr. 29.
- Symanzyk. Die Belastung der Kugellager. Der Betrieb. 1921. H. 18.
- Tischendorfer. Der Eikemeyer Field Straßenbahnmotor. E.T.Z. 1892. Nr. 37.
- * * * Kugel- und Rollenlager für Bahnmotoren. E.K.B. 1912. H. 18.

- Wichert. Über den Einfluß des Lagerspieles bei Kurbelgetrieben elektrischer Lokomotiven. E.K.B. 1914. H. 17. Ref. E.T.Z. H. 32.
- Wichert. Über den Einfluß von Stichmaßfehlern bei Kurbelgetrieben elektrischer Lokomotiven. E.T.Z. 1915. H. 2.
- Wichert. Über Schüttelschwingungen bei elektrischen Lokomotiven mit Parallelkurbelgetriebe. Ref. E.T.Z. 1920. H. 49. E.T.Z. 1921. H. 6 u. 1921. H. 17. B.S.E.V. 1921. H. 2.
- Wiesinger. Untersuchungen über das betriebssichere Durchfahren der Kurven mit elektrischen Lokomotiven unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der drehenden Lokomotivmassen. E.K.B. 1910. H. 19.
- * * * Die Entwicklung des Bahnmotors. E.I. 1912. Bd. 9. H. 10. Ref. E.K.B. 1913. H. 5.
- * * * Les vitesses critiques des transmissions par bielles dans les locomotives électriques. G.C. 1920. S. 490.

1. Die Bauformen der Triebmaschine. In der etwa 40jährigen Vergangenheit des elektrischen Bahnbetriebes haben sich aus Zweckmäßigkeitsgründen zwei grundsätzlich verschiedene Bauformen entwickelt:

- a) der Untergestellmotor und
- b) der Obergestell- oder kurz Gestellmotor.

Für den ersteren ist kennzeichnend, daß das Motorgewicht zur Gänze oder zum Teil auf der Achse lastet, daher mit seinem ganzen Gewicht oder mit einem Teil desselben das ungefederte Gewicht vermehrt.

Der Gestellmotor ruht dagegen mit seinem ganzen Gewicht im gefederten Rahmen des Fahrzeuges. Da Achse und Gestell in gefederter Verbindung stehen, ist zur Kraftübertragung von Motoranker zur Treibachse eine kinematische Kette vorzusehen, deren Bewegungsgesetze durch das Federspiel nicht gestört werden.

Der Untergestellmotor bedarf derartiger Einrichtungen nicht, weil die starre Verbindung durch das Vorgelege zwischen der treibenden und getriebenen Achse gesichert ist.

2. Verwendungsgebiete. Der Baustoff- und der Raumwirtschaft kommen bei der Anlage eines Triebfahrzeuges höchste Bedeutung zu. Die günstige Baustoffwirtschaft verlangt für die Auslegung der Triebmaschine Umfangsgeschwindigkeiten des Ankers, die je nach Größe der Maschine zwischen 20 und 50 m/s, d. h. 72 und 180 km/h liegen.

Beim Untergestellmotor liegt zunächst in radialer Richtung eine räumliche Einschränkung durch den Raddurchmesser vor. Im allgemeinen wird sich der Anker nur mit einem Durchmesser von 60 bis 65 % des Triebraddurchmessers bauen lassen. Hieraus folgt, daß der unmittelbare Antrieb nur für vergleichsweise hohe Fahrgeschwindigkeiten in Betracht gezogen werden kann, oder wenn Einschränkungen im Durchmesser nicht vorliegen. Letzteres ist beim Obergestellmotor der Fall.

Diese Gesichtspunkte grenzen die Anwendungsgebiete der beiden Bauformen ab.

Der Untergestellmotor, und zwar mit Vorgelege, kommt vornehmlich für Triebwagen in Betracht, weil bei diesen der oberhalb des Wagengestelles verfügbare Raum für die Unterbringung der Nutzlast benötigt wird. Für den Motor steht nur der Raum zwischen den Radsätzen zur Verfügung. Die Geschwindigkeit wird sich im allgemeinen zwischen 15 bis 60 km/h bewegen, weswegen eine Übersetzung — in den Grenzen von 1 : 2 bis 1 : 7, in besonderen Fällen bis 1 : 9 einfach und darüber doppelt bis 1 : 17, — am Platze sein wird. Wagenbautechnisch wird man die Gestelle für Untergestellmotore stets mit Außenlagerung versehen, um die volle achsiale Breite der Spur ausnützen zu können.

Bei Lokomotiven liegen diese Einschränkungen überhaupt nicht oder nicht in diesem Maße vor, sie bilden daher das Anwendungsgebiet für den Gestellmotor.

Aus der Art der Verbindung zwischen Anker und Treibachse folgt, daß der Untergestellmotor, zumindest wenn mehrere Motoren vorhanden sind, jede Achse

einzelnen antreibt. Die Kupplung der Triebachsen wird im allgemeinen zwecklos sein, sie kommt nur in ganz besonderen Fällen in Frage. So z. B. wenn die Leistung eines Motors ausreicht, jedoch die Reibung zweier Achsen benötigt wird, oder wenn bei Reihenschaltung die Störung der gleichmäßigen Aufteilung der Spannung auf alle Motoren vermieden werden soll, schließlich wenn durch die Zugkraft am Haken eine unzulässige Entlastung einer oder mehrerer Achsen zu befürchten ist.

Die Vorteile des Gestellmotors weisen auf den Mehrachsenantrieb hin. Nur durch diesen wird eine unerwünschte Umständlichkeit des Getriebes zufolge mehrfacher Wiederholung derselben Anordnungen des Getriebes vermieden und eine Steigerung der Baustoffwirtschaft durch Vereinigung der Leistung mehrerer Triebachsen in einem Motor zu erreichen sein.

Daß die Frage der Baustoffwirtschaft nicht ohne große Tragweite in geldlicher und stromwirtschaftlicher Hinsicht ist, geht daraus hervor, daß sofern die Vergrößerung der Lokomotiven nicht durch einfaches Zusammenfügen kleiner Einheiten herbeigeführt wird, sich eine Verminderung des spezifischen Gewichtes auf etwa die Hälfte (von rund 105 auf 49 kg/PS) nachweisen läßt, wenn die Leistung von etwa 500 PS auf 2000 PS steigt. Dieser Vorteil läßt sich nur durch den Mehrachsenantrieb mit Gestellmotoren erzielen, und für diesen kommt nur das Kurbelgetriebe als Kraftübertragungsbehelf in Betracht.

Einen Beweis für die Richtigkeit dieser Anschauung liefern die neuesten großen amerikanischen Lokomotiven. Diejenigen Typen, die als Summe mehrerer kleiner Maschinen anzusehen sind, sind verhältnismäßig sehr schwer. Andererseits sind selbst von den Amerikanern Maschinen, die nach einem System gebaut sind, das an sich hohe Gewichte bedingt, mit dem Parallelkurbelgetriebe und mit nur vier der vollen Lokomotivleistung entsprechenden Motoren ausgeführt worden, um hierdurch an Gewicht so viel zu sparen, daß die schwere Umformungseinrichtung untergebracht werden kann.

Das Kurbelgetriebe ist daher ein erwünschter Behelf zur Kraftverteilung und -übertragung auf der Lokomotive, wenn geringe Achsdrücke zugelassen sind und große Leistungen verlangt werden. Es ist mit demselben möglich, mit wenigen

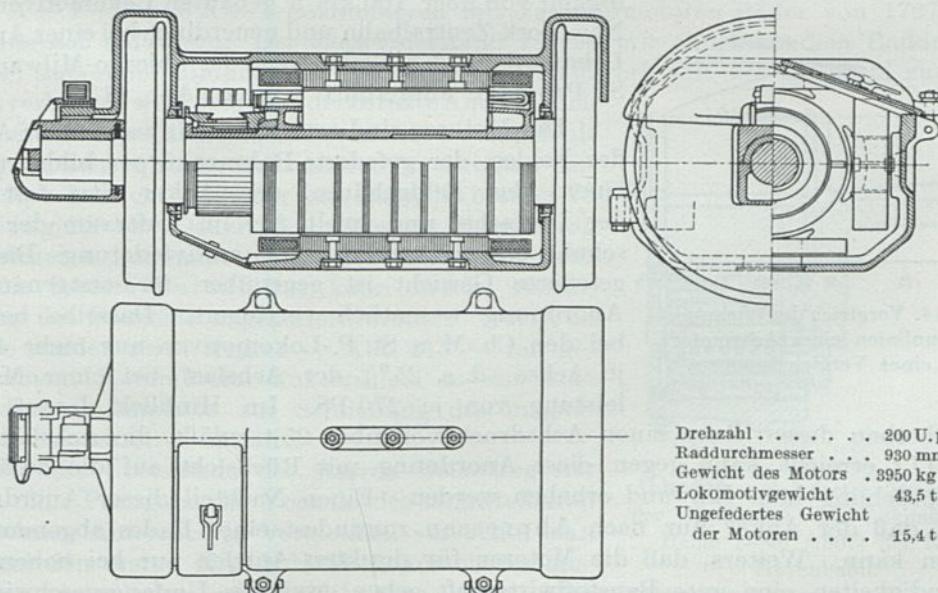


Abb. 212. 85 PS-Achsmotor der Lokomotive 2 A + 2 A der ersten Reihe der Londoner Untergrundbahn.

großen Motoren, die in Gänze gefedert im Rahmen ruhen, eine hohe Baustoffwirtschaft und einfache Schaltung zu erzielen.

Welche Bedeutung im übrigen der Getriebemechanik zukommt, dafür spricht die historische Tatsache, daß die Entwicklung des elektrischen Straßenbahnwesens mit dem Zeitpunkte einsetzt, in dem von Sprague eine zweckmäßige Verbindung zwischen Anker und Triebachse angegeben wurde.

3. Der Achsmotor. Die scheinbar einfachste Form der Triebmaschine ist der Achsmotor.

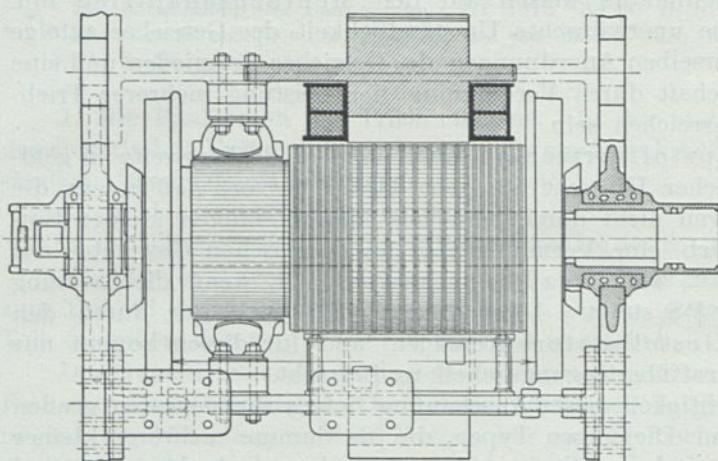


Abb. 213. Ungefederter Achsmotor der Lokomotiven Reihe 6000 der New York-Zentralbahn (G.E.C.).

Die ersten Lokomotiven der Londoner Untergrundbahn (die umgebaut werden mußten und 48% ungefedertes Gewicht hatten) und die Siemens-Schnellbahn-Versuchslokomotive sind die wenigen Vertreter dieser Bauart geblieben.

Eine wesentlich verbesserte Ausführungsform des unmittelbaren — starren — Achsantriebes ist nach Vorschlägen von Batchelder bei den für eine Geschwindigkeit von über 100 km/h gebauten Lokomotiven der New York-Zentralbahn und neuerdings bei einer Anzahl Lokomotiven der Reihe 1920 der Chicago-Milwaukee-St. Paulbahn ausgeführt worden (Abb. 213).

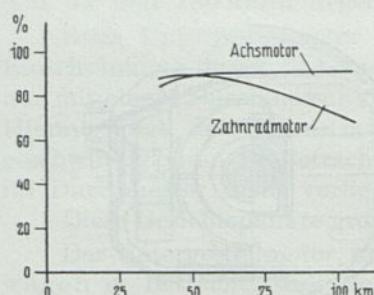


Abb. 214. Vergleich der Wirkungsgradkennlinien eines Achsmotors und eines Vergleichsmotors.

Die Motoren sind zweipolig, mit wagrechter Achse des Feldes; der gefederte Rahmenkörper bildet unter einem das Feldgehäuse, der Anker sitzt fest auf der Laufachse und spielt frei im Luftraum der Polschuhe entsprechend der Lokomotivfederung. Das ungefederte Gewicht ist gegenüber der erstgenannten Anordnung wesentlich verringert. Dasselbe beträgt bei den Ch.-M. u. St. P.-Lokomotiven nur mehr 4,35 t je Achse, d. s. 25% der Achslast bei einer Motorleistung von je 270 PS. Im Hinblick darauf, daß

der Oberbau dieser Bahn einen Achsdruck von über 25 t zuläßt, die Achslast nur etwa 17 t erreicht, kann gegen diese Anordnung mit Rücksicht auf die zulässige Beanspruchung kein Einwand erhoben werden. Einen Nachteil dieser Anordnung bildet, daß der Anker nur nach Abpressen zum mindesten eines Rades abgenommen werden kann. Weiters, daß die Motoren für direkten Antrieb nur bei hohen Geschwindigkeiten eine gute Baustoffwirtschaft geben, weil die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers nur einen Bruchteil der Fahrgeschwindigkeit erreichen kann.

Achsmotor. Dieser Typ wird zufolge der starren Verbindung mit der Triebachse sehr ungünstig beansprucht; ebenso die Achse selbst und der Oberbau.

Bei der ungünstigsten Ausführungsform dieser Bauart sitzt der ganze Motor (Abb. 212) unmittelbar auf der Achse. Die dynamischen Wirkungen werden durch die verhältnismäßige Größe der in ihrer Gesamtheit ungefederten Masse des Motors sehr beträchtlich.

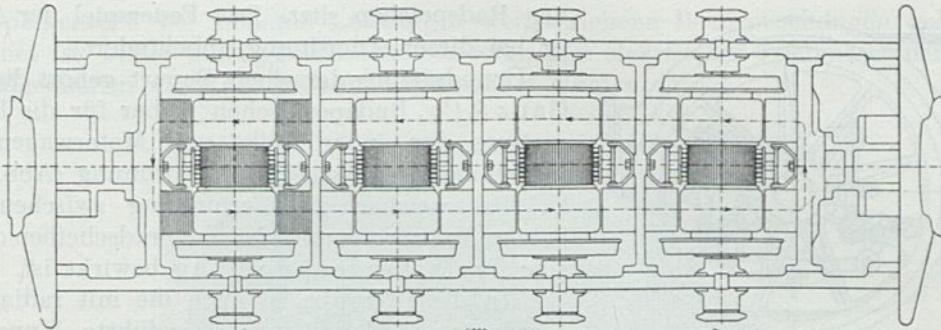


Abb. 215. Untergestell mit Achsmotoren mit doppelter Ankerwicklung und je einem Kollektor (Kummer).

Der unmittelbare Antrieb ist auch aus diesem Grunde so gut wie ganz verdrängt worden, wenn auch der Wirkungsgrad infolge Fehlens jeglicher Übersetzung den denkbar günstigsten Wert erreicht.

Dieser hohe Wirkungsgrad wird allerdings auch nur in einem vergleichsweise kleinen Bereich hoher Geschwindigkeiten erreicht. Die Gegenüberstellung zu der Wirkungsgradkurve (Abb. 214) eines Zahnradmotors für die gleiche Betriebsaufgabe erläutert die diesbezügliche Sachlage.

Dem steht jedoch gegenüber, daß die Fahrzeuge mit direkt treibenden Motoren, eben weil die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers angenähert an die Fahrgeschwindigkeit gebunden ist, verhältnismäßig kleine Raddurchmesser erhalten müssen. Die neuen $1 + 2 A + 4 A + 4 A + 2 A - 1$ -Lokomotiven der Ch.-M.u.St.P.-Bahn mit direktem Antrieb haben Räder von 1118 mm Durchmesser erhalten, wogegen die für dieselben Geschwindigkeitsverhältnisse (100 km) gebauten $2 - 3 A - 1 + 1 - 3 A - 1$ -Lokomotiven mit Zahnradmotoren Räder von 1727 mm Durchmesser aufweisen. Der Zugwiderstand wächst mit abnehmendem Raddurchmesser; außerdem nimmt die Verlustarbeit im Laufwerk mit der Drehzahl zu. Im Stromverbrauch wird demnach der direkte Antrieb auch kaum einen Vorteil bringen, und zwar um so weniger, als das spez. Gewicht der Lokomotive für direkten Antrieb auch beträchtlich höher ist. Dasselbe beträgt 73 bzw. 86 kg/PS^h bzw. Dauer-PS; bei der mit Übersetzung ausgerüsteten Lokomotive nur 60,2 bzw. 75,4 kg/PS.

Die Bauart Batchelder kann zwecks Herabsetzung des Gewichts abgeändert werden. Auf jede Achse werden zwei Anker — Abb. 215 — mit gemeinsamem Kommutator angeordnet, so daß eine besondere Bodenplatte zur Schließung des magnetischen Stromkreises entfällt.

Um die Übelstände der starren Belastung der Achse ohne Preisgabe der Vorteile des unmittelbaren verlustlosen Antriebes zu vermeiden, versuchte man eine bei den ersten N.Y.-N.H.-H.-Lokomotiven ausgeführte Anordnung mit Hohlachse (Abb. 216), die mit gefederten Greifern (Abb. 217) zwischen

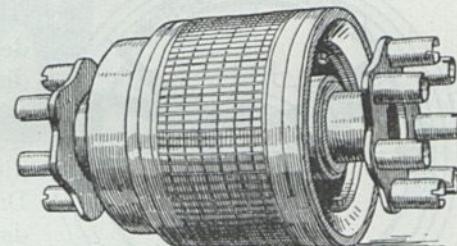


Abb. 216. Anker mit Hohlwelle und Mitnehmer der Lokomotiven der Reihe 1—40 der New Havenbahn (West.).

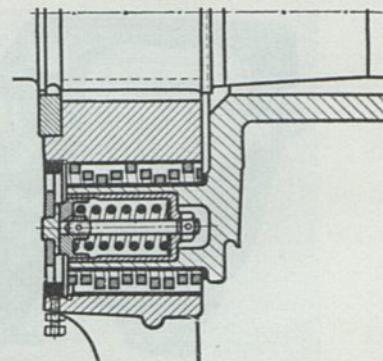


Abb. 217. Gefederter Mitnehmer der Hohlachse der Lokomotiven Reihe 1—40 (1907) der New Havenbahn.

Leistung eines Motors	350 PS
Triebbraddurchmesser	1575 mm
Regeldrehzahl	296 U.p.M.

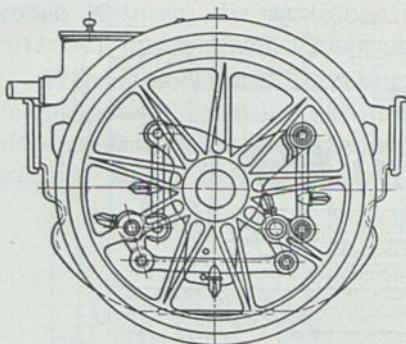


Abb. 218. Treibstangenkupplung des Achsmotors mit Hohlwelle der Lokomotiven, Reihe 34 (1902) der italienischen Staatsbahnen (Ganz.).

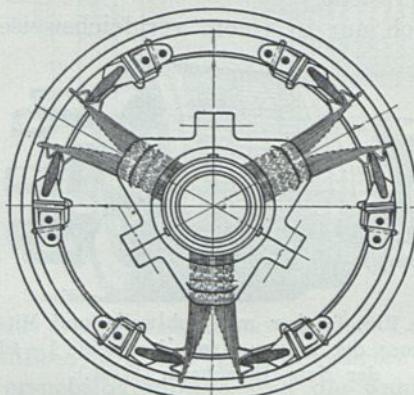


Abb. 219. Federkupplung des Achsmotors des A.E.G.-Schnellbahnwagens (Berlin-Zossen).

Diese Bauform, die durch ein aus dem Magnetjoch gebildetes, geschlossenes Stahlgußgehäuse, innigen Zusammenbau mit dem Vorgelege, gedrängte Anordnung

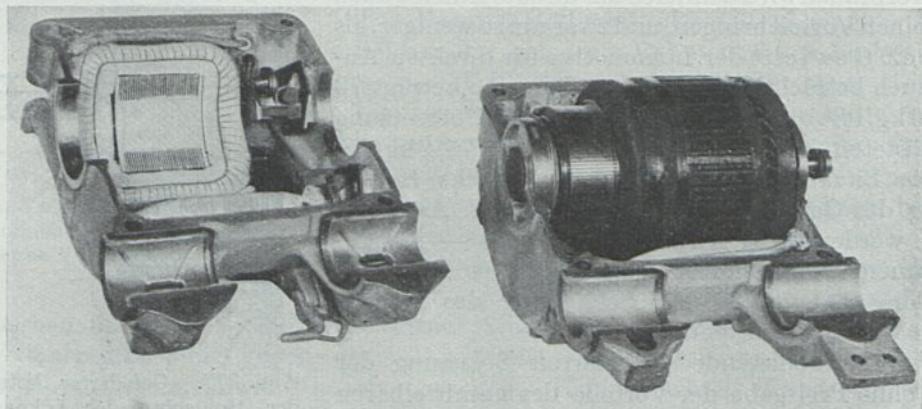


Abb. 220. Untergestellmotor für Industriebahn-Lokomotiven.

Regelleistung	10 PS	Spurweite	500 mm
Spannung	550 V	Kleinster Raddurchmesser	560 mm
Uml. l. Min.	720	Gewicht kompl.	305 kg

Gehäuse: geteilt, nach oben aufklappbar (A.E.G.).

und namentlich bei höheren Leistungen weitgetriebene Beanspruchungen gekennzeichnet ist, bildet die eigentümliche Sondergruppe elektrischer Triebmaschinen, die im allgemeinen als Bahnmotoren bezeichnet werden.

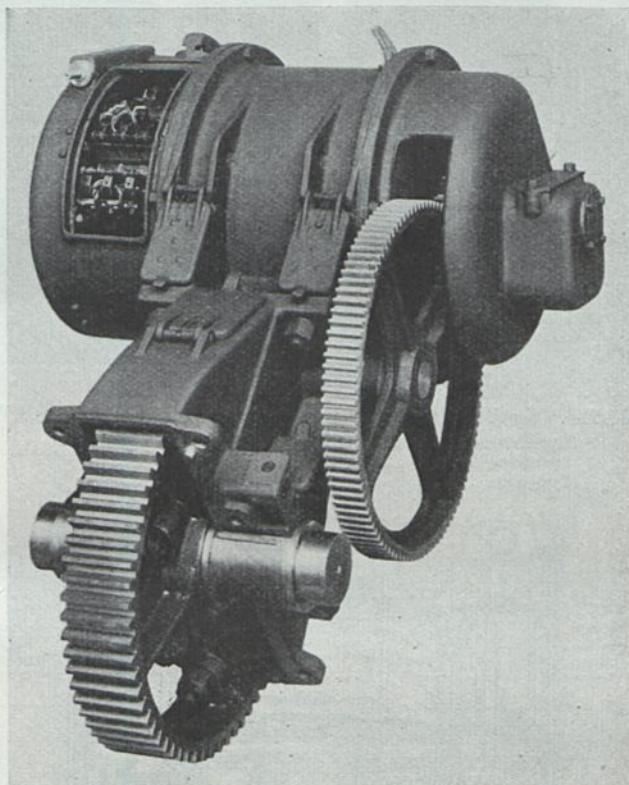


Abb. 221. Einphasen-Grubenlokomotivmotor mit doppelter Übersetzung. (B.B.C.)

Leistung	25	20 PS
Spurweite	600	550 mm
Übersetzung maximal		1 : 26,5
minimal		1 : 11,0
Umlaufzahl/min.		1500

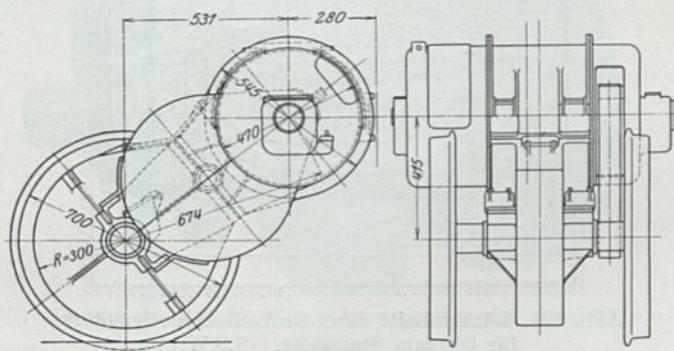


Abb. 222. Einbauzeichnung des Motors Abb. 221.

Die räumlichen Einschränkungen, die beim unmittelbar treibenden Achsmotor bestehen, sind auch hier insofern gegeben, als der Halbmesser des großen Zahnrades R stets durch den anwendbaren Triebradhalbmesser R_t und den frei zu

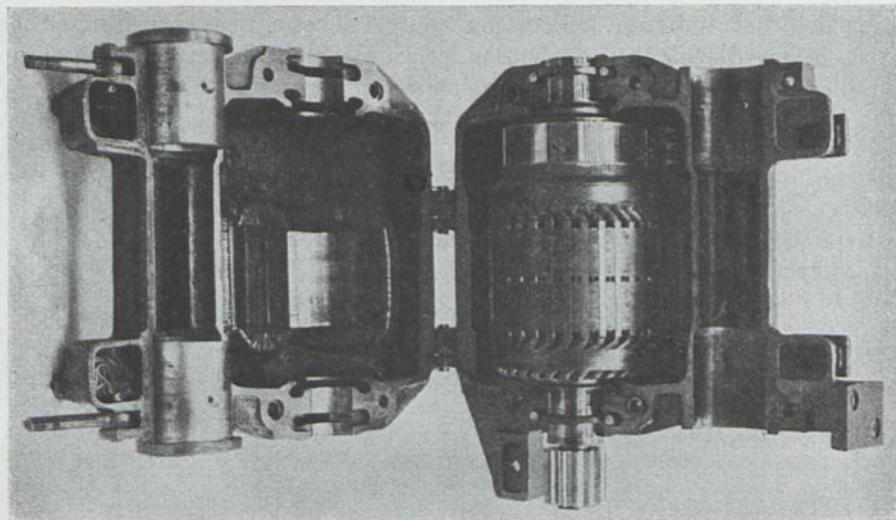
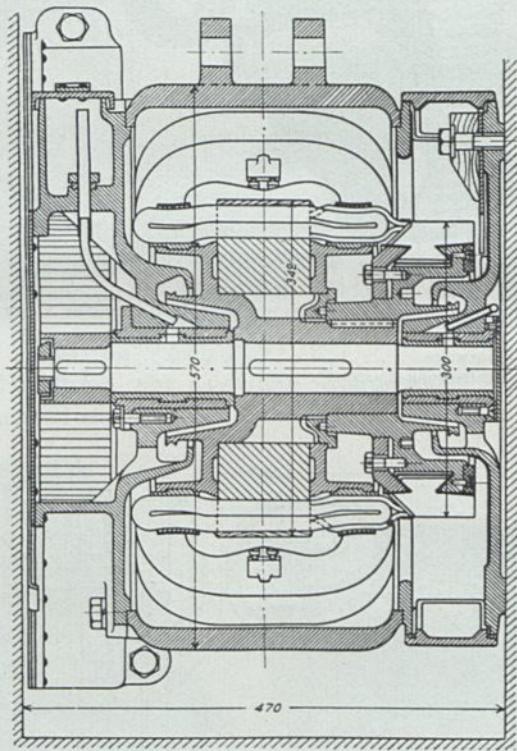


Abb. 223. Straßenbahnmotor nach unten aufklappbar. (S.S.W.)

Regelleistung	45 PS
Spannung	550 V
Uml./min.	530

Abb. 224. Längsschnitt eines Grubenlokomotivmotors
für 500 mm Spurweite. (S.S.W.)

haltenden Abstand von der Schienen-Oberkante a bestimmt ist. Es bestehen folgende geometrische Beziehungen (Abb. 228)

$$\frac{R}{r} = \ddot{u}$$

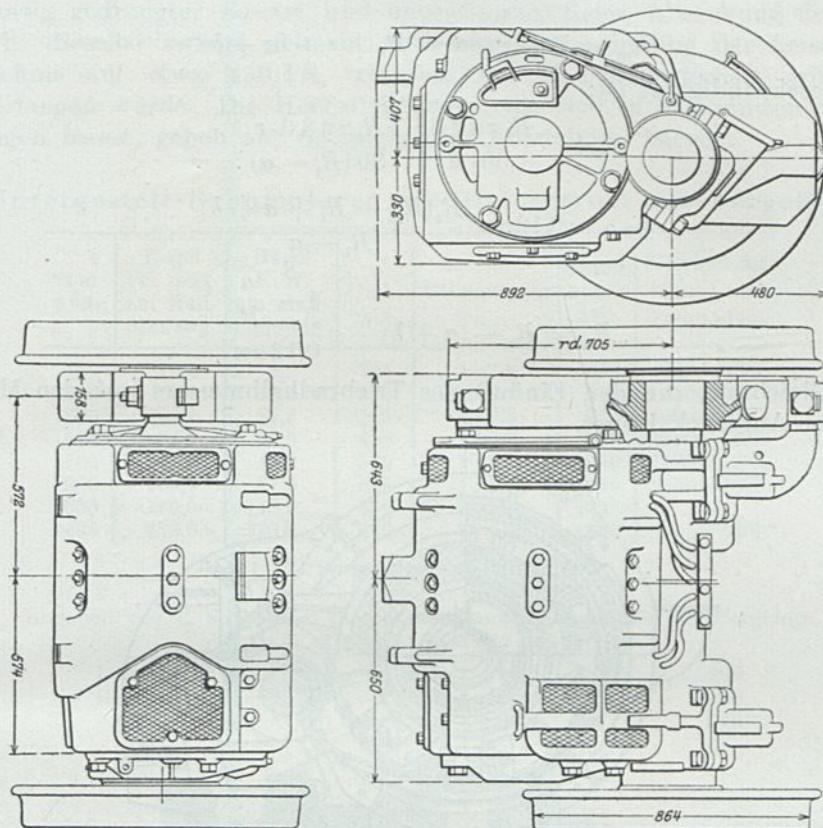


Abb. 225. Triebmaschine für die New Yorker Städtische Untergrundbahn.
Leistung 160 PS, 650 V, 400 Uml./min.

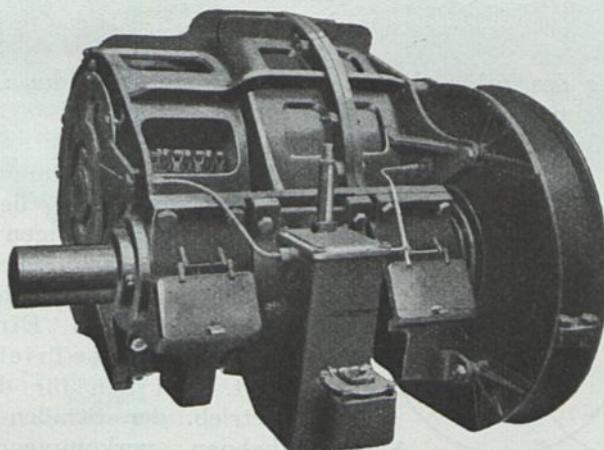


Abb. 226. Ansicht des 350 PS -Wechselstrommotors der Abb. 227 (A.E.G.).

ist die Übersetzung, wenn r der Halbmesser des Ritzels ist,

$$R_t = R + a \quad \text{und} \quad R_m + b = R + r$$

wo R_m den Motorhalbmesser und b den in der Verbindungsleitung der Zentralen zur Unterbringung der Vorgelegewelle (\varnothing 95 bis 125 mm) nötigen Abstand be-

zeichnet

$$R_m = R + r - b = R_t + r - (a + b).$$

Die Fahrgeschwindigkeit ist:

$$v_{\text{km/h}} = \frac{R_t \pi n 3,6}{30 \cdot \ddot{u}} = \frac{R_t \pi n 3,6 \cdot r}{30 (R_t - a)},$$

weiters

$$v_{\text{km/h}} = 0,12 \pi n \cdot \frac{R_t (R_m - R_t + a + b)}{R_t - a},$$

hieraus

$$R_m = R_t - (a + b) + v \frac{1 - \frac{a}{R_t}}{0,12 \pi n},$$

diejenige Gleichung, die den Einfluß des Triebadhalbmessers auf den Motorhalbmesser zum Ausdruck bringt.

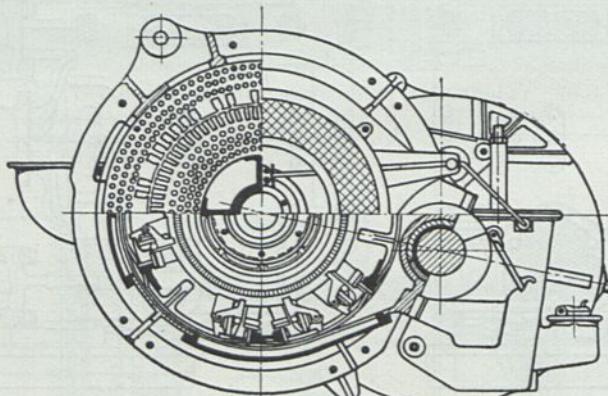


Abb. 227. 350 PS-25 ~ Einphasen-Vorlegemotor mit einseitigem Zahnradgetriebe, Versuchslokomotive der Preuß. Staatsbahnen 1908. (A.E.G.)

Triebadurchmesser	1400 mm
Umläufe des Motors	370 min
Übersetzung	1:3,5

Die Verwendung des Zahnradvorgeleges blieb nicht auf den Untergestellmotor beschränkt, wird vielmehr selbst für Leistungen von über 1000 PS einer Triebmaschine auch bei Gestellmotoren ausgeführt.

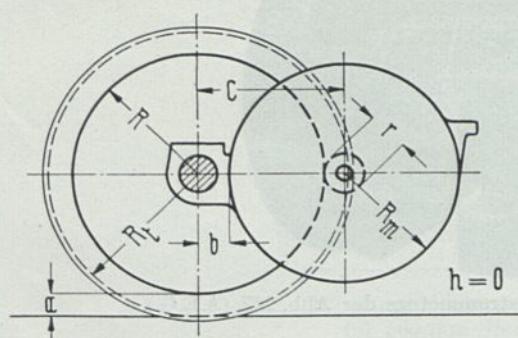


Abb. 228. Geometrie der Zahnradübersetzung des Untergestellmotors.

Sachlage bei den hohen Einzelleistungen der Triebachsen von Vollbahnlokomotiven geltend. Hier führt der Zwang der Geometrie der Zahnradübersetzung nicht nur

Aus der Geometrie der Zahnradübersetzung und den bahnmaßigen Raumbeschränkungen folgt, daß der aus fahrzeugtechnischen Gründen meist gegebene Raddurchmesser einen tiefgreifenden Einfluß auf die Auslegung der Triebmaschine ausübt. Bei den für den Motorwagenbetrieb der Straßen- und Überlandbahnen vorkommenden Leistungen zwingt dieser Zusammenhang zu keinen unerwünscht weitgehenden Beanspruchungen und zu keiner übertrieben begrenzten Formgebung der Triebmaschine. Um so ungünstiger macht sich diese

zu ungünstig gedrängter Bauart und unerwünscht tiefer Absenkung der Motoren im Gestell, dieselbe zwingt vielmehr auch zur Einschränkung der Leistung einer Triebmaschine auf etwa 450 PS, trotzdem die Baustoffwirtschaft größere Einheiten verlangen würde. Die Höchstleistungen, die sich in bestimmten Spurweiten unterbringen lassen, gehen aus nachstehender Aufstellung hervor:

Untergestell-Bahnmotoren für Gleichstrom mit Vorgelege.

Spurweite	Regel PS. max. am Radumfang	Regel K.W. am Radumfang	n Uml./min.	Übersetzung	Durchmesser mm	Gewicht kg ohne mit Zahnradern
450	12,6	9,2	725	1 : 7,3	680	340—390
500	18,7	13,8	590	1 : 6,66/12,24	730	485—550
600	29,4	21,6	565	1 : 7,3	750	690—830
600	36,0	26,5	450	1 : 8,2	900	1200—1335
700	60,0	44,2	565	1 : 6,5	850	1190—1380
900	110,0	81,0	555	1 : 6,5	950	1640—1820
1000	160,0	118,0	630	1 : 6,7	1250	—
1435	452,0	333,0	446	1 : 4,58	1320	—6550*)

*) zweiseitige Zahnräder.

Angaben von E. V. Pannel über Gleichstrom-Bahnmotoren mit Vorgelege Drehzahl $n = 600$

Leistung KW/h	40	80	100	160	200
Gewicht kg	1200	1700	2200	2600	3000
kg je KW	30	21,3	22,0	13,3	15,0

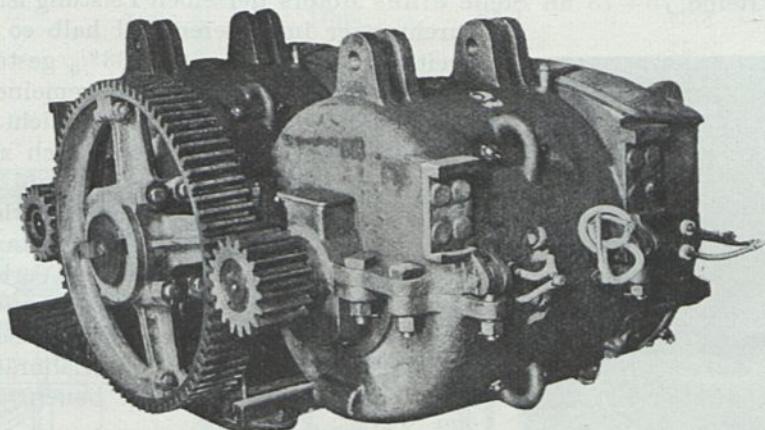


Abb. 229. Gleichstrom-Untergestell-Doppelmotor der B-Versuchslokomotive für die Wiener Stadtbahn, Bauart Krizik, Prag.

Regelleistung	2.130 PS
Spannung je	750 V
Uml./min.	545
Übersetzung	78:18

Die hier nachgewiesenen Einschränkungen in bezug auf die Größe der Leistung eines Motors aus Ursache der achsial zur Verfügung stehenden Konstruktionsbreite und der radialen Bemessung im Zusammenhang mit der Geometrie der Zahnradübersetzung lassen sich umgehen, bzw. die sonst mögliche Leistung einer Achse verdoppeln, wenn man auf das große Zahnrad zwei Motore arbeiten lässt. Auf diese Art sind die Doppelmotore von Krizik (Abb. 229) entstanden. Durch diese Anordnung wird unter einem die mechanische Kupplung zweier in Reihe ge-

schalteter Anker bewirkt, so daß auch die Aufteilung der Spannung auf die beiden gekuppelten Anker stabil wird.

Einige Lokomotiven der New-Havenbahn (Reihe 1919) und die 2—3 A+2+3 A—1 der Chic.-Milw. u. St. Paulbahn (3000 Volt Gleichstrom) sind mit Motoren dieser Bauart ausgerüstet worden. (Abb. 230.)

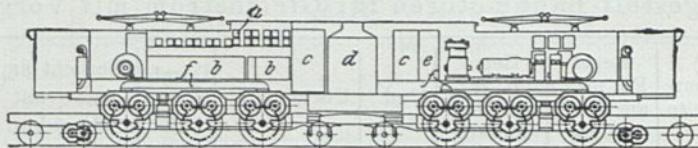


Abb. 230. Laufwerk und Getriebe der Lokomotiven, Reihe 1919, Achsanordnung, 2—3 A+2+3 A—2 der Chicago-Milwaukee- und St. Paul-Bahn.

Leistung	4200/3360 PS
Geschwindigkeit	38,3/41,8 km/h
Leistung eines Doppelmotors	700/560 PS
Triebad-Durchmesser	1725 mm
Drehzahl (max.)	1090/min

a) Hochspannungsabteil, Widerstände; b) Schalter; c) Heizwasserbehälter; d) Heizkessel; e) Heizöl;
f) Kühlluftverteiler für die Motoren.

Der Vorteil der Anordnung von Doppelmotoren geht auf Grund obiger Ableitung aus einem Beispiel hervor.

Nach Angaben der Westinghouse-Gesellschaft anlässlich der Begründung der Wahl von Doppelmotoren mit Zahnradvorgelege für die Lokomotiven der New-Havenbahn Reihe 73—75 an Stelle eines Motors derselben Leistung ist der Motor-durchmesser im ersten Fall halb so groß als im zweiten Fall bei um etwa 33% gesteigerter Leistung einer Achse. Die allgemeine Gültigkeit dieser Feststellung besteht zwar nicht genau, doch trifft dies der Größenordnung nach zu, insbesondere wenn unter einem die Drehzahl erhöht wird.

Mit Überschreitung der Motorleistung von etwa 200 PS macht sich der Umstand, daß die Zahnradübersetzung eine starre Verbindung zwischen Triebachse und Ankerkörper darstellt, in erhöhter Abnutzung bemerkbar; es hat sich daher als zweckmäßig erwiesen, die Zahnräder mit gefedertem Zahnkranz zu bauen. (Abb. 231, 232, 233).

Der Zahnkranz wird lose, mit Reibung auf dem Stern aufgesetzt und greifen Knaggen in die Radspeichen. Zwischen beiden befinden sich Spiralfedern.

Um diese Anordnung, die im übrigen in großer Zahl bei amerikanischen Lokomotiven

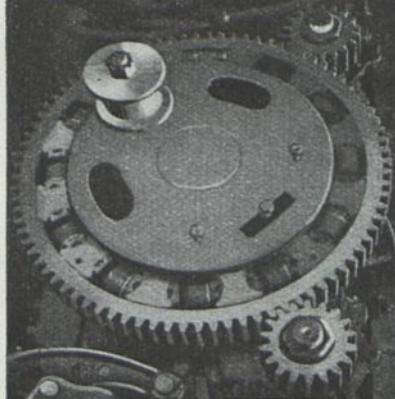


Abb. 231. Gefedertes Zahnräder für einen Doppelmotor der 1—B+B—1 Lokomotive der Norfolk- und Westernbahn. Leistung je Motor 420 PS.

angewendet wurde, verhältnismäßig viel der Abnutzung unterliegende Bestandteile aufweist, zu umgehen, zieht man die natürliche Elastizität der Achsen zu diesem Zwecke heran. Zu diesem Zwecke wird das große Zahnräder auf eine Hohlachse aufgezogen, die ihrerseits in der Mitte ihrer Länge gelenkig mit der Achse der Treibkurbel verbunden wird. Die Kraft hat demnach vom Zahnräder bis zur Kurbel bzw. bei konzentrischer Anordnung auf der Triebachse einen Weg gleich der doppelten halben Länge der Achse zurückzulegen. (Abb. 234.)

Es liegen Bestrebungen vor, auch bei den verhältnismäßig kleinen Straßenbahnmotoren die Starrheit des Getriebes zu mildern.

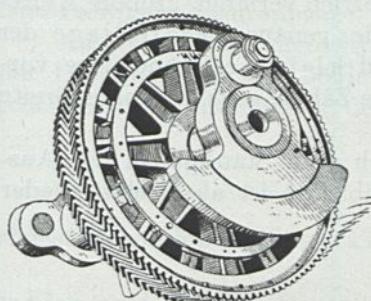


Abb. 232. Gefedertes Zahnräder des 1250 PS-Motors der Lötschberg-Lokomotiven, Reihe 1 — E — 1, Übersetzung 1 : 2,23.

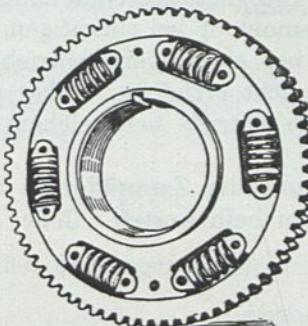


Abb. 233. Gefedertes Zahnräder für den 452 PS-Motor der Ch.-M.- u. St. P.-Lokomotive, Reihe 1914, Übersetzung 1 : 2,23.

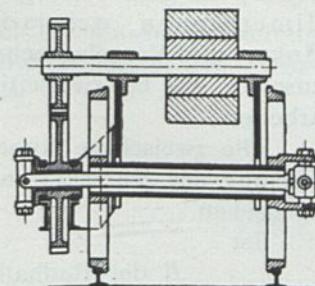


Abb. 234. Gestellmotor für den 452 PS-Motor der Ch.-M.- u. St. P.-Lokomotive, Reihe 1914, Übersetzung 1 : 4,56.

Diesem Zwecke dienen die Zahnräder System Duffing, deren Speichen aus elastischem Material hergestellt sind, so daß die Federung ohne umständliche Mechanik erzielt wird.

Bei ausgeführten Motoren finden sich folgende Zahndrücke angewendet:

Drehmoment/h mkg	Zahndruck kg/ cm Breite	Zahngeschwindigkeit V _{norm}	V _{max}
60	83	4,0	10,8
100	106	5,1	13,8
150	132	6,0	15,5
200	158	6,6	16,2
250	181	7,0	16,6

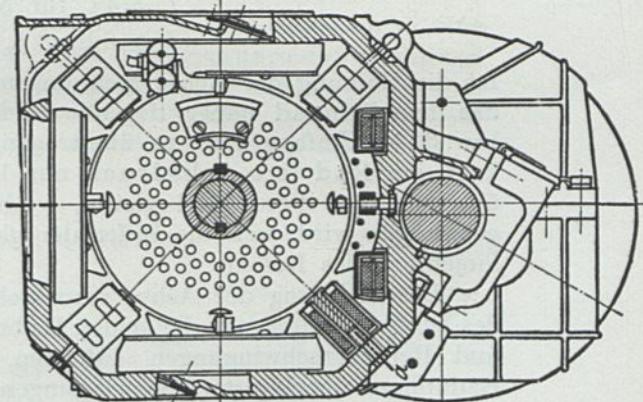
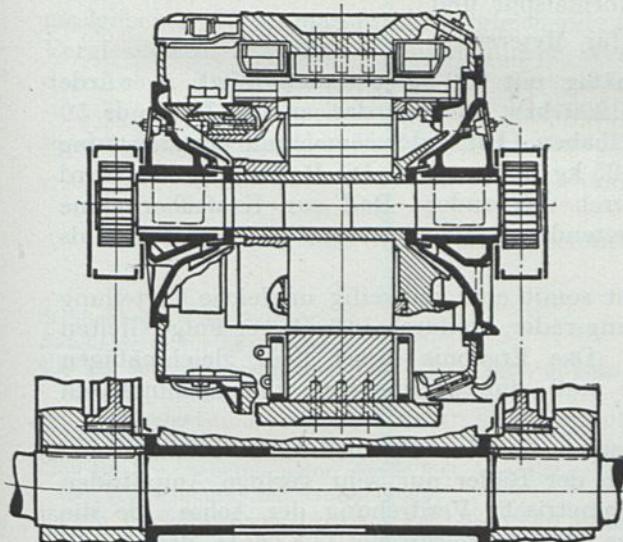


Abb. 235. 452 PS, 1500 V-Gleichstromvorlegemotor der Reihe 1914 der Ch.-M.- u. St. P.-Bahn. (G.E.C.)

Triebattivitàdurchmesser	1590 mm
Umläufe des Motors { (regel)	375/min
{ (höchst)	755/min
Übersetzung	1:4,56
Gewicht	6550 kg

Günstigere Konstruktionsverhältnisse und bessere achsiale Raumausnutzung ist durch zweiseitige Anordnung der Zahnräder zu erzielen (Abb. 235).

Der einseitig auf die Hälfte herabgesetzte Zahndruck gestattet kürzere Ankerlager, das größere Biegungsmoment bei einseitigem Antrieb verlangt größere Achsdimensionen, weiters ist bei einseitigem Antrieb die genaue Parallellage der Anker- und Vorgelegeachse nicht erzielbar. Daher sind kleinere Zahndrücke vorzusehen, wie bei zweiseitigem Antrieb, bei welchem die Zähne stets in voller Breite arbeiten.

Die zweiseitige Anordnung der Zahnräder ist auch vom Standpunkt der Ausnutzung der Radreibung zu befürworten. Jede Treibachse ist als Drehungsfeder auzusehen.

Ist

R der Radhalbmesser,

d der Achsdurchmesser,

l die Länge der Achse zwischen Treibrad und Zahnrad,

P die Umfangskraft,

$G = \frac{2}{5} E$ der Elastizitätsmodul der Drehung

und f die am Radumfang gemessene Verdrehung, so ist

$$f = \frac{32}{\pi} (P R) \frac{R l}{G d^4}$$

Die Verdrehung ist proportional dem zu übertragenden Drehmoment und der Federlänge, im vorliegenden Fall dem Abstand zwischen Treibrad und Zahnrad.

Insolange die Radreibung nicht überschritten ist, muß die Verdrehung der beiderseits des das Drehmoment ausübenden Zahnrades vorhandenen Achslängen gleich groß sein. Dieser Zustand sei vorläufig vorausgesetzt, dann ist $f_1 = f_2$.

Hieraus folgt, daß die den beiden Treibrädern zugeführten Momente sich umgekehrt verhalten wie die Entfernungen.

Bei gewöhnlichen Straßenbahnmotoren findet sich

$$l_1 = 4 l_2 \text{ für Normalspur und}$$

$$l_1 \approx 6 \text{ bis } 8 l_2 \text{ für Meterspur.}$$

Ist die Reibung der Achse rechnungsmäßig mit 250 kg je t ausgenutzt, so würde das dem Zahnrad näher liegende Rad 200 bzw. 214 kg, das andere Rad nur 50 bzw. 36 kg Umfangskraft zu übertragen haben. Unter der gemachten Voraussetzung kann ein Rad je t Achsdruck nur 125 kg übertragen. Die Reibungsgrenze wird überschritten, dieses Rad gleitet, wodurch das andere Rad zur Kraftübernahme gezwungen wird, weil die Ziffer der gleitenden Reibung wesentlich kleiner ist, als diejenigen des Rollens.

Die Federung der Achse verursacht somit eine zeitweilig ungleiche Verteilung des Drehmomentes auf die beiden Reibräder, wodurch in weiterer Folge Gleiten und Reibungsschwingungen auftreten. Das Ergebnis dieser dem gleichmäßigen Radlauf überlagerten Schwingungen muß eine Verringerung der ausnutzbaren Reibungsziffer des Fahrzeuges sein.

Die Achsen von Straßenbahnfahrzeugen sind im allgemeinen so reichlich bemessen, daß diese Reibungsschwingungen der Räder nur sehr geringe Amplituden erreichen. Immerhin besteht die unsymmetrische Verdrehung der Achse, die die beschriebene Störung der Stetigkeit des Rollens verursacht. Könnte das Triebzahnrad in der Achsmitte angebracht werden, würde die Federung die gleichmäßige Aufteilung des Drehmomentes auf beide Räder nicht stören und demgemäß die Radreibung nicht gefährden. Dasselbe ist der Fall bei symmetrischer Anordnung von zwei Triebzahnräder auf einer Achse, also beiderseits der Trieb-

maschine zwischen dieser und den Rädern. Die Starrheit der Übertragung muß bei dieser Anordnung durch Federung der Zahnkränze gemildert werden. Die Federung bewirkt auch die vorweg gleichmäßige Aufteilung der Belastung auf die beiderseitigen Zahnradpaare.

Aus dem oben angeschriebenen Federgesetz folgt, daß für gleiche Verteilung der Drehmomente auf beide Räder und gleicher Verdrehung der beiden Achsschenkel die Durchmesser der letzteren nach der Gleichung

$$d_1 = \sqrt[4]{\frac{l_1}{l_2}} d_2$$

abgestuft werden müßten. Für das oben gegebene Beispiel $\frac{l_1}{l_2} = 4$, muß $d_1 = 1,41 d_2$ werden und für $\frac{l_1}{l_2} = 6$, muß $d_1 = 1,565 d_2$. Diese Querschnittsänderungen lassen sich aus konstruktiven Gründen schwer durchführen.

Zur Verminderung des spez. Zahndruckes haben die 1250 PS-Motoren der Lötschbergbahn Pfeilräder erhalten (Abb. 232), deren Zahnkranz mit Federn versehen ist.

Diese Type hat den Nachteil, daß das achsiale Ankerspiel behindert ist; für einen guten Kollektorlauf ist dieses Spiel nötig.

Bei Verwendung von Zahnradmotoren ist besonders zu beachten, daß die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges meist durch die Ankerumfangsgeschwindigkeit begrenzt ist. Mit Rücksicht auf die Wicklungen darf die Geschwindigkeit von etwa 50 bis 55 m/sec nicht überschritten werden.

Für die mechanische Beanspruchung der Anker ist streng genommen nicht die Umfangsgeschwindigkeit, sondern die bei der zu gewärtigenden höchsten Geschwindigkeit auftretende Fliehkraft P_{kg}

$$P_{kg} = \frac{m v^2}{r}$$

maßgebend. Wenn man für zu vergleichende Bauarten $m = 1$ setzt, erhält man eine Vergleichszahl P_1 , die in anschaulicher Weise über den Beanspruchungsgrad der Anker Aufschluß gibt.

P_1 läßt sich auch durch die gebräuchlichen Betriebsgrößen, die Umlaufzahl in der Minute und der Umfangsgeschwindigkeit v m/sec ausdrücken, dann wird

$$P_1 = 0,1036 n v.$$

Man findet folgende Werte an ausgeführten Maschinen:

	P_{kg}	v m/sec	n Uml./min
Straßenbahn-Vorgelegemotoren	720	11,6	600
Batcheldermotor (Achsmotor)	990	19,0	500
600 PS Wechselstrommotor der A.E.G. (B + B-Lok. der Preuß. Staatsb.) (Gestellmotor mit Übersetzung)	4770	51,0	900
750 PS Wechselstrommotor der A.E.G.U. für die 1-B.1-Lokomotive der Wien-Preßburger Bahn (Gestellmotor, dir. Antrieb)	1250	34,0	360
1250 PS Wechselstrommotor der M.F.Ö. der Lötschberg-Lokomotive (Gestellmotor mit Übersetzung)	4070	57,0	690
350 PS Wechselstrommotor der A.E.G. der Rhät. Bahnlokomotive (Gestellmotor mit Übersetzung)	2720	39,0	660
450 PS Gleichstrommotor der G.E.C. der Chic.-Milw. u. St. Paul-bahn (Untergestell-Vorgelege-Motor)	3170	34,0	900
1250 PS Wechselstrommotor von Maffei-Schwarzk. (direkter Antrieb)	2430	54,0	430
2000 PS Gleichstrommotor von West. der 2-B.-Pennsylvania-Lokomotive (direkter Antrieb)	1130	29,0	375

Aus der besseren Ausnützung der aktiven Baustoffe bei der übersetzten Triebmaschine erzielt man bei diesen eine höhere Baustoffwirtschaft, d. h. kleinere spezifische Gewichte für die Einheit der Leistung.

Zur Orientierung seien hier die Gewichte ausgeführter Motoren angegeben:

Vorlegemotoren (Wechselstrom)

Drehmoment mkg/h	Gewicht kg/mkg Drehmoment
50	32,0
100	23,5
200	16,8
400	12,8
600	10,9
1000	10,0
1500	8,0

	Leistung mkg/h	Gewicht kg/mkg
Motor der Chic.-Milw. u. St. Paulbahn-Lokomotive	725	9,2
Motor der Lötschberg-Lokomotive	1870	7,5
Motor der B + B-Lokomotive der Preuß. Staatsbahnen	670	18,9

Die federnde Motoraufhängung der Bahnmotoren wird für Einheiten mit kleiner Leistung mit Spiralfedern, für größere mit Blattfedern ausgeführt; in allen

Fällen muß dafür vorgesorgt sein, daß im Falle eines Federnbruches der Motor nicht auf die Fahrbahn geraten kann. Zweckmäßig ist, den Angriffspunkt der Federung durch eine den Motor umfassende Tragkonstruktion in den Motorschwerpunkt zu verlegen.

Bei Lenkachsenwagen müssen die Federn möglichst lange Hängelaschen erhalten, um die Beweglichkeit der Achsen nicht zu stören.

Die Motoren werden für Industriebahn-Lokomotivmotoren mit geteiltem Gehäuse nach oben aufklappbar gebaut und nach unten aufklappbar für Motorwagen.

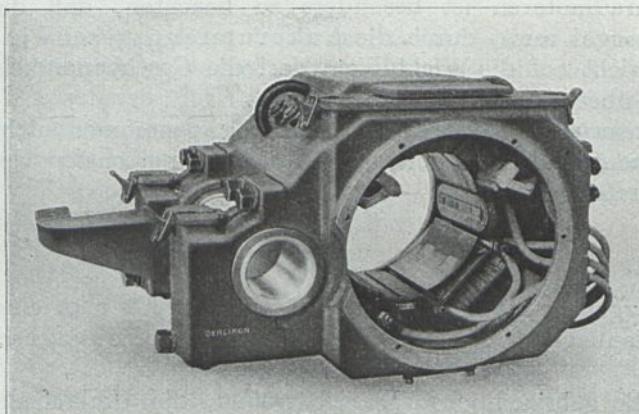
Neuerdings geht man von

Abb. 236. Gleichstrom-Untergestell-Motor, Kastengehäuse, Wendepole, Kugellager (M.F.O.).

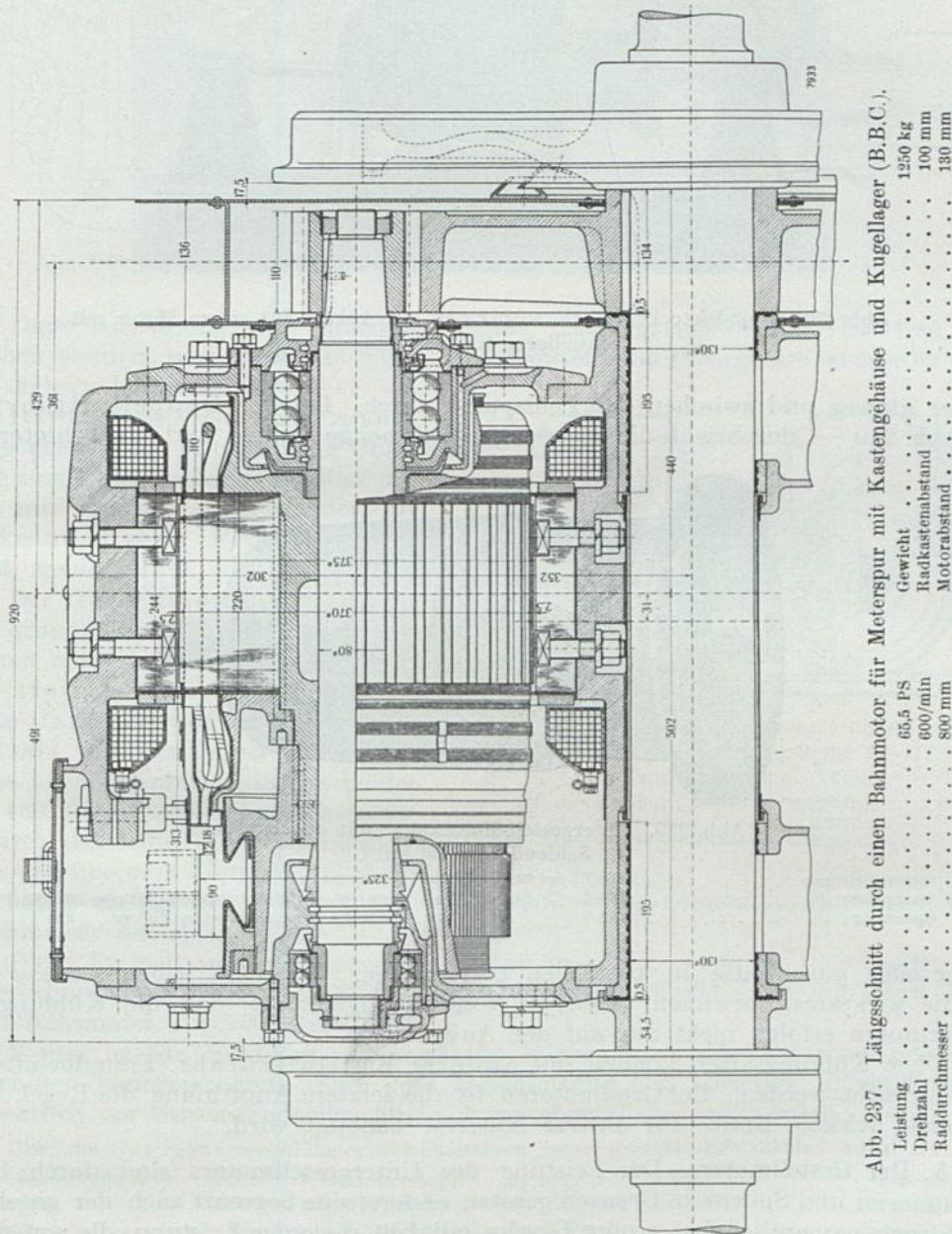
Regelleistung am Radumfang	100,0 PS
Dauerleistung	40,5 "
Spannung	1000 V
Uml./Min.	700 bzw. 1000
Übersetzung	1:4,26
Gewicht des Motors ohne Zahnräder	1450 kg

der Teilung der Gehäuse ab, weil die sichere Lagerführung bei geteiltem Gehäuse mit der Zeit eingebüßt wird. Die Motoren mit ungeteiltem sog. Kastengehäuse — Abb. 236, 237 — müssen samt der Triebachse ausgebunden werden. Der Anker kann nach Entfernung der Schilder in einen Spindelstock gespannt und dann axial herausgeschoben werden.

Die wachsende Bedeutung der hohen Dauerleistung, der Überlastungsfähigkeit und Schonung des Stromwendeapparates führten dazu, daß moderne Gleichstrom-Bahnmotoren mit Wendepolen (Abb. 235, 236) ausgeführt werden und Einrichtungen zur wirksamen Selbstkühlung (Abb. 239, 240) und mit äußerer Luftzufuhr angewendet werden.



Durch die Wendepole ist es möglich geworden, einen bestimmten, für etwa 500 Volt ausgelegten Gleichstrom-Bahnmotor mit entsprechend höherer Drehzahl und etwas verminderter Stromstärke selbst mit der doppelten Spannung zu betreiben, sofern für genügende Isolation gesorgt ist.



Die wirksame Kühlung mit Kreiselgebläse nähert die Dauerleistung, die ohne diese kaum $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ der Normalleistung erreicht und oft überhaupt fehlt, bis auf etwa 80% der Stundenleistung.

Bei Untergestellmotoren mäßiger Leistung wird die Kühlung dadurch erzielt, daß an die Zahnradseite des Ankers ein Schleuderrad angebaut wird, das durch

entsprechend angeordnete achsiale Kanäle die Warmluft aus dem Ankerkörper absaugt. Da die Kühlung auch der Feldwicklung von Bedeutung ist, wird hierauf auch Rücksicht genommen. Bei der Einfachführung streicht die Luft über den

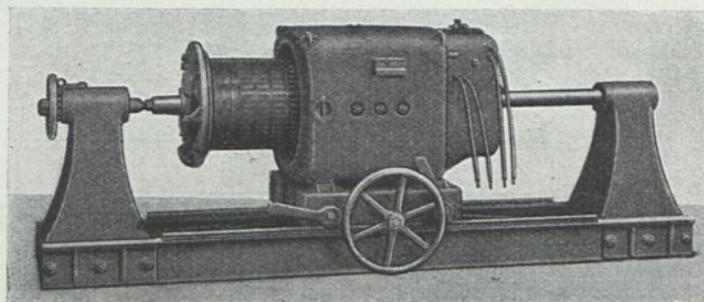


Abb. 238. Spindelstock zum Herausnehmen des Ankers aus einem Motor mit einteiligem Kastengehäuse.

Anker hinweg und zwischen den Feldspulen durch. Bei der Doppelluftführung — Abb. 240 — durchzieht die abgesaugte Luftmenge Anker und Feld hinterein-

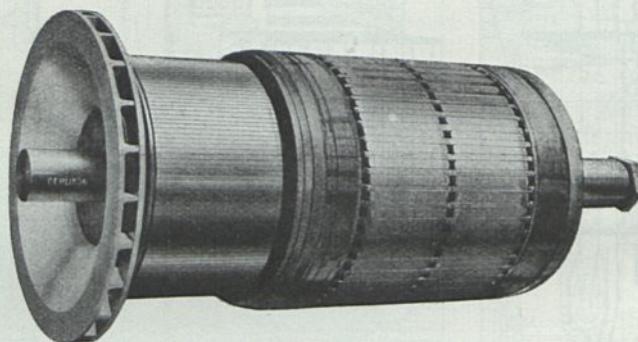


Abb. 239. Untergestell-Motoranker mit angebautem Schleuderrad (M.F.O.).

Stundenleistung	250 PS bei 620 Uml./Min.	Übersetzung	1 : 33
Dauerleistung	120 " 840 "	Gewicht des Motors ohne Vorgelege	3015 kg
Spannung	575 V	Gewicht des Ankers ohne Kolben .	850 "

ander oder gleichzeitig in parallelen Luftströmen. Versuche haben letztere Art als die wirksamste erwiesen, wobei es von Wichtigkeit ist, daß die Kühlung im Ankerinnen erfolgt, nicht nur auf der Außenfläche.

Diese Kühlungsarten können mit äußerer Kaltluftzufuhr (Fremdbelüftung) auch erreicht werden. Bei Großmotoren ist die letztere Anordnung die Regel, weil die volle achsiale Breite für aktives Material benötigt wird.

5. Der Gestellmotor. Der Leistung des Untergestellmotors sind durch Rad durchmesser und Spurweite Grenzen gesetzt, andererseits begrenzt auch der gegebene Achsdruck namentlich bei großer Geschwindigkeit diejenige Leistung, die von einer Achse entwickelt werden kann. Der letztere Umstand zwingt dazu, das Triebfahrzeug mit verhältnismäßig kleinen Motoren auszurüsten, wodurch die Baustoffwirtschaft ungünstig beeinflußt wird, ebenso die Kosten der Erhaltung im Betriebe (tiefe Schwerpunktslage).

Die Untergestellmotore führen im allgemeinen auch zu vergleichsweise langen Fahrzeugen, weil die Unterbringung der Motoren große Radstände bedingt.

Der letztere Übelstand kann vermieden werden, wenn man die Motoren senkrecht über den Achsen anordnet (Abb. 241).

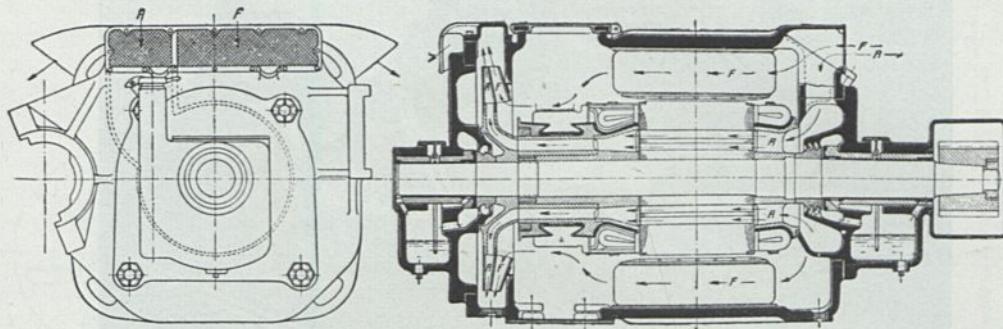


Abb. 240. Lüftungsplan eines Straßenbahnmotors mit Parallel-Luftführung. (A.E.G.)

Diese Anordnung setzt unbedingt voraus, daß Hohlachsen mit Federung vorgesehen werden, weil sonst das ganze Motorgewicht samt Vorgelege ungefedert auf den Achsen lasten würde.

Durch diese räumliche Anordnung des Motors ist bereits der Übergang zum Gestellmotor geschaffen, der sich nur insofern unterscheidet, als er keine eigene Federung aufweist, sondern fest im Gestell ruht.

Der Gestellmotor hat sich in zwei grundsätzlich verschiedenen Bauformen entwickelt. Der unmittelbar treibende Motor — in dem Sinne langsamlaufend, als seine Drehzahl mit derjenigen der Treibachse übereinstimmt — unterscheidet sich vom direkt treibenden Achsmotor dadurch, daß seine Außenmaße, innerhalb des in einem Eisenbahnfahrzeug überhaupt verfügbaren Raumes, keiner Einschränkung, namentlich durch den Rad durchmesser unterliegen (Abb. 242, 243, 244).

Diese Freiheit in der Bemessung kommt in einer etwas weitergehenden Beanspruchung zum Ausdruck; die Fliehkraft-Kennzahl findet man von etwa 1000 beim Achsmotor auf 2500 gesteigert.

Weiter ist für diese Bauart eine starke Näherung an die Bauformen ortsfester Maschinen kennzeichnend. Eine gute Durchlüftung und allseitige Zugänglichkeit, namentlich der Stromwendeeinrichtung, kann ebenfalls erzielt werden.

Über die Gewichte ausgeführter Gestellmotoren geben nachstehende Zahlen Aufschluß:

Motortype	PS/h	Drehm. mkg/h	kg/mkg/h	kg/PS/h	Stromart
Bergmann	3000	8860	2,50	7,0	15 ~ W.-Str.
Simplon	660	3780	3,60	13,6	15 ~ D.-Str.
Mittenwald	800	3100	4,35	10,9	15 ~ W.-Str.
Pennsylvania	2000	10000	2,00	10,6	620 V G.-Str.

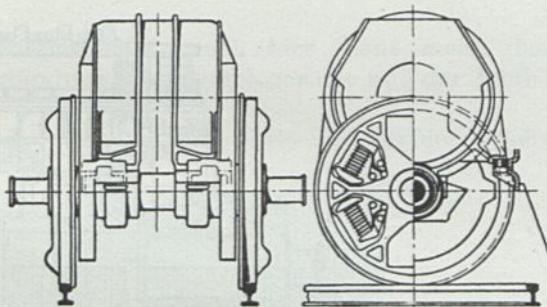


Abb. 241. Vorgelegemotor, senkrecht über der Treibachse mit gefederter Hohlwelle, Reihe 71—72 (1910) der New-Havenbahn. (West.)

Leistung 315 PS/h

Übersetzung 1 : 2,33

Triebaddurchmesser 1600 mm

Zur Kraftübertragung von der Ankerwelle zur Treibachse wird eine Mechanik erforderlich, deren Bewegungsgesetze durch das Federspiel nicht gestört werden; zu diesem Zweck wurde in mannigfaltigen Formen das Parallelkurbelgetriebe herangezogen (Abb. 244);

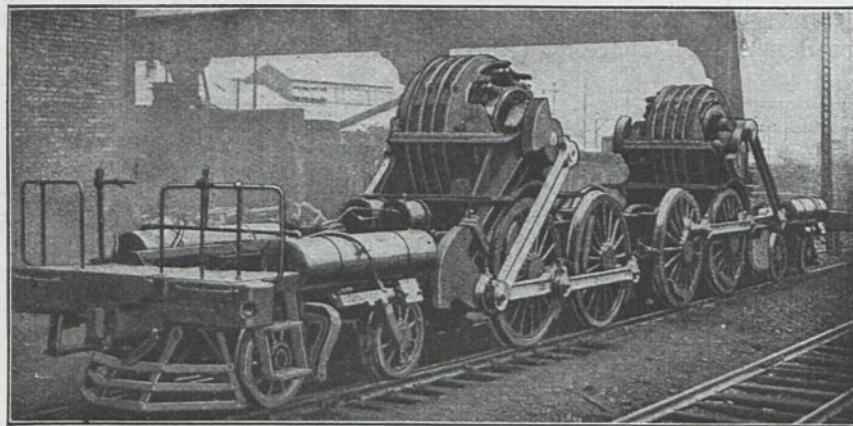


Abb. 242. Gestelle der 2500 PS-Pennsylvanialokomotiven 2-B+B-2.

Höchstleistung 4000 PS, Höchstgeschwindigkeit 128,5 km.

Dienstgewicht 150 t Triebraddurchmesser 1830 mm

Reibgewicht 94,5 t Drehzahl (max) 220 Uml./min

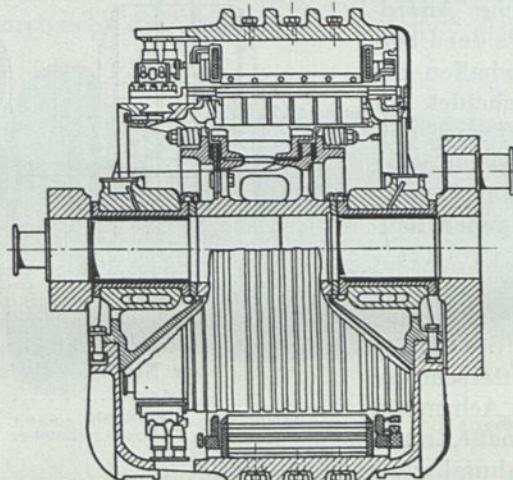


Abb. 243. Längsschnitt durch den Motor der Lokomotive Abb. 242 (Rutschkupplung).

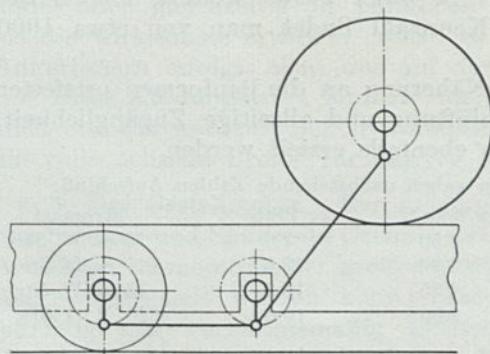


Abb. 244. Schema der Kraftübertragung mit Kurbelgetriebe vom Gestellmotor über eine Blindwelle zur Treibachse.

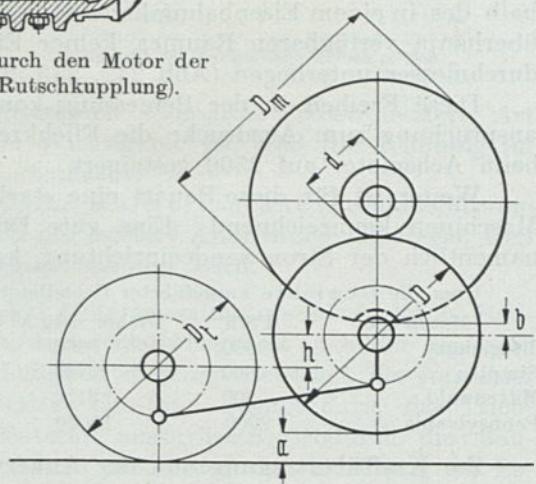


Abb. 245. Geometrie der Kraftübertragung mit Zahnradübersetzung und Kurbelgetriebe vom Gestellmotor zur Treibachse.

Die zweite Gruppe der Gestellmotoren bilden Typen, die sich in der Hauptsache zum Zwecke der bei Eisenbahnfahrzeugen wichtigen Baustoffwirtschaft einer

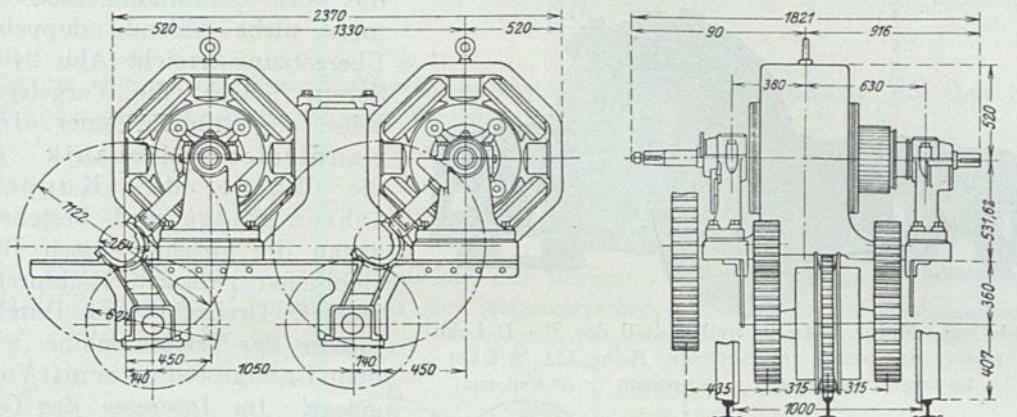


Abb. 246. 150 PS-Gestellmotoren mit doppelter Übersetzung einer Zahnradlokomotive
(A.E.G.U. Rittnerbahn).

Zahnradübersetzung bedienen (Abb. 245 bis 250). Auch hier dient meist das Parallelkurbelgetriebe als Behelf zur Verbindung der Vorgelegewelle mit der Treibachse.

In beiden Fällen ist es die Regel, daß die Leistung eines oder zweier Trieb-

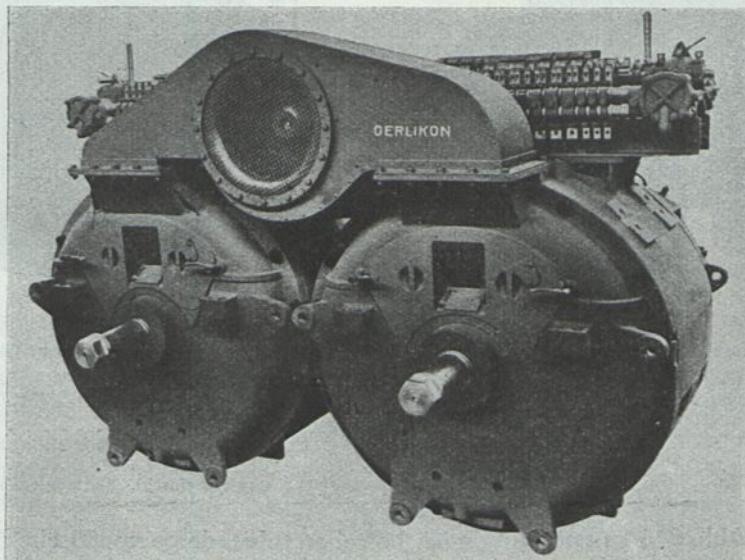


Abb. 247. Wechselstrom-Gestell-Doppelmotor mit Zahnradübersetzung
für 1—C+C—1 Lokomotiven Reihe 12251 der S. B. B. (M.F.O.).

Leistung 1½ h . . . je 550 PS	Umlauf in Min.	560
Dauerleistung 425 "	Periodenzahl	16²/₃
Spannung		400/380 V

maschinen auf mehrere Treibachsen bzw. Kuppelachsen übertragen wird. Die Zahl der Triebmaschinen braucht daher nicht mehr mit der Zahl der angetriebenen Achsen übereinzustimmen.

Je nach Art des angewendeten Getriebes kann auch bei den über-

setzten Motoren in gewissem Maße eine Unabhängigkeit der Bemessung der Triebmaschine vom Raddurchmesser erzielt werden. Letzteres wird auch durch die bei Zahnradlokomotiven meist nicht fehlende doppelte Übersetzung erreicht (Abb. 246). Sofern jedoch die Vorgelegetriebachse aus Gründen einer einwandfreien Mechanik in die Ebene der Kuppelachsen gelegt wird, bestehen genau die gleichen festen Beziehungen zwischen Raddurchmesser, Drehzahl und Durchmesser der Triebmaschine, wie beim Untergestellmotor mit Vorgelege. Im Interesse des Getriebes werden bei der Anordnung mit Vorgelege wesentliche Vorteile des Gestellmotors: freie Dimensionierung, niedrige Beanspruchungen, nicht gedrängte Bauart, allseitige Zugänglichkeit und Hochlage des Schwerpunktes preisgegeben.

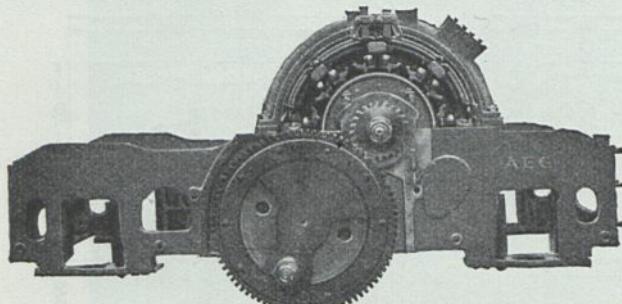


Abb. 249. Motor, Getriebe und Gestell der *B+B*-Lokomotive der preuß. Staatsbahnen, Reihe 511 (A.E.G.)
Leistung . . 600/500 PS Drehzahl . . 600 Uml./min

triebes werden bei der Anordnung mit Vorgelege wesentliche Vorteile des Gestellmotors: freie Dimensionierung, niedrige Beanspruchungen, nicht gedrängte Bauart, allseitige Zugänglichkeit und Hochlage des Schwerpunktes preisgegeben.

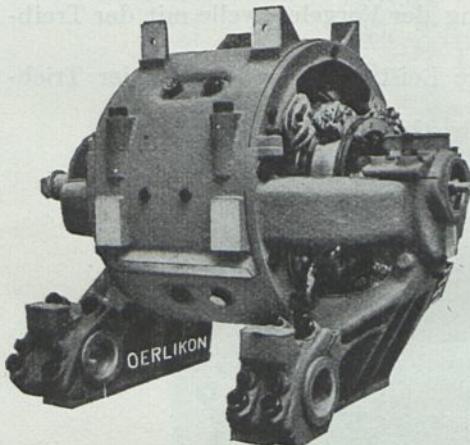


Abb. 248. Gestellmotor mit Vorgelege. (M.F.O.)

Stundenleistung . . 400 PS, 570 Uml./min
Dauerleistung . . 250 PS, 650 Uml./min
Spannung 1500 V
Übersetzung 1 : 4,77

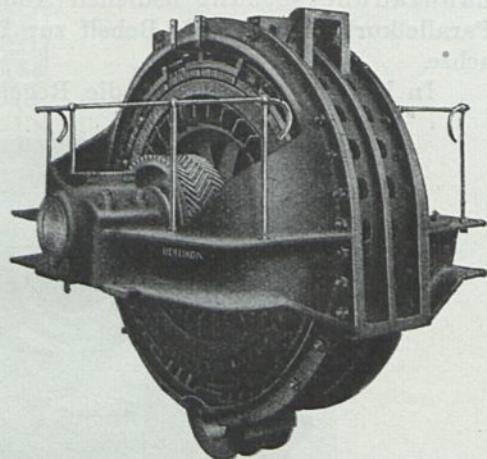


Abb. 250. Gestellmotor der 1-E-1 Loks der Lötschbergbahn mit einseitigem Zahnradantrieb. (M.F.O.)

Leistung (1½ h) 1250 PS
Spannung 500 V
Übersetzung 1 : 2,23
Gewicht einschl. Zahnradgetriebe 14 T

Wie aus Abb. 245 zu entnehmen ist, bestehen folgende geometrische Beziehungen, wenn für den allgemeinen Fall eine Überhöhung h für die Vorgelegewelle angenommen wird.

$$D_t + 2h = D + 2a; \quad ii = \frac{D}{d}; \\ D + d = D_m + 2b,$$

somit

$$D_m = D_t + 2[h - (a + b)] + d.$$

Für die Fahrgeschwindigkeit v km/h gilt

$$v = \frac{D_t n \pi 3,6}{ii \cdot 60} = \frac{D_t \pi n 0,06 d}{D}.$$

Die obigen Werte substituiert findet man

$$v = 0,06 \pi n \frac{D_m - D_t + 2(a + b - h)}{1 + \frac{2(h - a)}{D_t}},$$

hieraus der anwendbare Motordurchmesser im Zusammenhang mit den Betriebs- und Konstruktionsgrößen des Fahrzeugs:

$$D_m = D_t - 2(a + b - h) + v \frac{1 + \frac{2(h - a)}{D_t}}{0,06 \pi n}.$$

Man sieht, daß unter Beibehaltung der übrigen Größen in der Hauptsache durch Vergrößerung der Überhöhung h den geometrischen Wirkungen der Herabsetzung

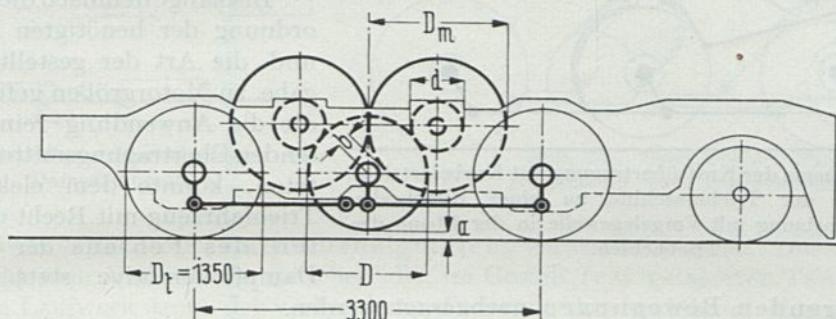


Abb. 251. Maßstabrichtiges Schema der tiefliegenden Triebmaschine der 1-B+B-1-Lokomotiven der S.B.B. mit Zahnradübersetzung, Blindwelle ohne Überhöhung (B.B.C.).

der Drehzahl — die ihrerseits eine Vergrößerung des Motordurchmessers verlangt — entgegengewirkt werden kann.

Die einwandfreie Kinematik des Getriebes und die gute Lauffähigkeit des Fahrzeuges verlangen die Vermeidung jeglicher Überhöhung der Vorgelegewelle.

In den Abb. 251 und 252 sind die Triebmaschinen, das Getriebe und die Laufwerke zweier Lokomotiven schematisch, jedoch maßstabrichtig dargestellt. Bei der Anordnung ohne Überhöhung der Vorgelegewelle sind Triebrad- und Motordurchmesser etwa gleich groß. Im zweiten Fall wurde durch die Überhöhung erreicht, daß der Durchmesser der Triebmaschinen um 53 % größer gewählt werden konnte, als derjenige der Triebräder.

Die als wünschenswert erkannte Befreiung der Bemessung des Motors von der beengenden Geometrie der Zahnradübersetzung ist auch dadurch zu erzielen, daß man das Getriebe der Zahnradübersetzung außerhalb des Motors anordnet, Abb. 253, wobei das Zahnradvorgelege in die Ebene der Kuppelachsen gebracht werden kann.

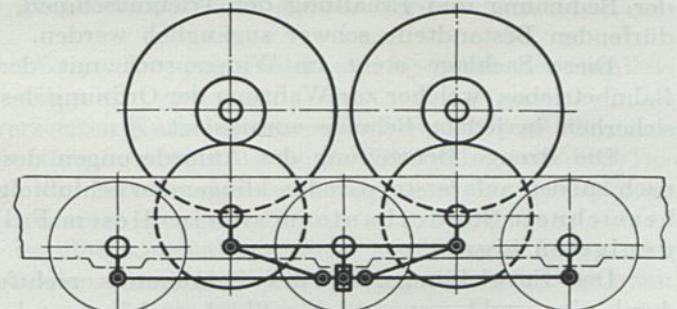


Abb. 252. Maßstabrichtiges Schema der hochgestellten Triebmaschinen der 1-E-1-Lötschberglokomotive mit Zahnradübersetzung 1:2,23, Kandorahmen; Triebrad-Durchmesser 1350 mm (M.F.O.).

6. Das Parallelkurbelgetriebe. Geometrie und Kräfteplan auf statischer Grundlage. Die primitiven Ausführungen der Triebmaschinen für Bahnfahrzeuge mit mäßigen etwa 80 PS kaum erreichenden Leistungen bedienten sich zur Übertragung des Ankerdrehmomentes auf die Treibachsen rein umlaufender Maschinenelemente, wenn zwar eine der ersten Anordnungen sich zu diesem Zweck schon des Kurbelgetriebes bediente (Abb. 256). Kinematisch folgt hieraus, daß die für die elektrische Triebmaschine kennzeichnende Stetigkeit der umlaufenden Bewegung ungestört an den Treibachsen erscheint. Auch in den durch das Getriebe verbundenen treibenden und getriebenen Massen können praktisch keine nennenswerten Störungsscheinungen auftreten.

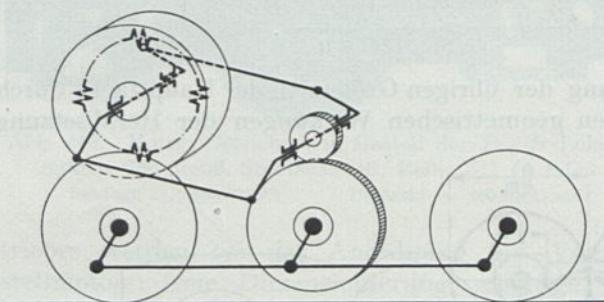


Abb. 253. Schema der Kraftübertragung mit Kurbelgetriebe vom Läufer der Triebmaschine zu einer Ritzelwelle, Zahnradübersetzung mit Vorgelegewelle in der Ebene der Treibachsen.

Insolange demnach die Größenordnung der benötigten Leistung und die Art der gestellten Aufgabe zu Motorgrößen geführt hat, die die Anwendung rein umlaufender Übertragungsmittel gestatteten, konnte dem elektrischen Triebfahrzeug mit Recht der Vorteil des Fehlens der bei der Dampflokomotive stets vorhandenen störenden Bewegungen nachgesagt werden.

Die unmittelbare Kupplung des Ankers mit einer Treibachse, ebenso wie die Zahnradübersetzung verlangen für gegebene Aufgaben im Hinblick auf die allgemeinen, für Bahnfahrzeuge bestehenden räumlichen Einschränkungen eine bestimmte Formgebung und räumliche Bemessung der Triebmaschinen, so daß Bahnmaschinen eine eigene Sondergruppe der maschinellen Konstruktionen der Elektrotechnik bilden.

Mit Steigerung der Leistung über etwa 200 PS/h zwingt diese Raumbeschränkung und die Getriebeanordnung bei dieser Bauform zu erhöhten Beanspruchungen in mechanischer und elektrischer Beziehung. Hieraus ergibt sich eine Erschwerung der Bedienung und Erhaltung der Triebmaschinen, indem die einer Wartung bedürfenden Bestandteile schwer zugänglich werden.

Diese Sachlage steht im Widerspruch mit den strengen Anforderungen des Bahnbetriebes, welcher zur Wahrung der Ordnung des Betriebes die höchste Betriebssicherheit in jedem Belange voraussetzt.

Die strenge Beurteilung der Anforderungen des Vollbahnbetriebes führt demnach zu der aufs erste paradox klingenden Schlußfolgerung, daß die als Bahnmotor bezeichnete Sonderbauform sich in diesem Falle eben für Eisenbahnen am wenigsten eignet.

Der Entwicklungsgang des Bahnmotors rechtfertigt diese Ansicht. Der durch ein geschlossenes Stahlgußkastengehäuse und gedrängte Bauart gekennzeichnete Bahnmotor verdankt sein Entstehen dem Straßenbahn-, richtiger dem Motorwagenbetrieb. Dieser zwingt zur Unterbringung der Triebmaschinen im Untergestell, weil der Oberbau für die Nutzlast — die Fahrgäste — vorzubehalten ist.

Diese Lösung konnte mit Erfolg angenommen werden, weil die in Betracht kommenden Leistungen sich in dem verfügbaren Raum im Untergestell bequem unterbringen lassen und auch das Getriebe zu keiner ungünstigen Bemessung führt.

Bei der elektrischen Vollbahnlokomotive ist die Sachlage in jedem Belange eine andere. Es liegt kein Umstand vor, der für die Anordnung der Triebmaschinen im Untergestell spricht, im Gegenteil: die Anforderungen einer guten Lauffähigkeit

und einer einwandfreien Federung der Massen sprechen für die Hochlage und Anordnung auf dem Gestell. Andererseits beschränkt der Raum zwischen den Rädern die Leistung der Triebmaschine und müssen, um die Achsgewichte überhaupt ausnützen zu können, hohe mechanische und elektrische Beanspruchungen gewählt werden, die auch wegen der räumlichen Anforderungen des Zahnradgetriebes nötig sind.

Den Anforderungen des Bahnbetriebes werden demnach Triebmaschinen, deren Bauformen frei gewählt werden können und die sich denjenigen der ortsfesten Maschinen nähern und in bezug auf ihr Eigengewicht immerhin sparsam ausgelegt sind, am besten entsprechen. Derartige Maschinen erhalten jedoch Ausmaße, denen zufolge zur Verbindung der Ankerwelle mit dem Laufwerk eigene Getriebe besonderer Art notwendig werden. Für diesen Zweck ist vornehmlich das den Dampf-

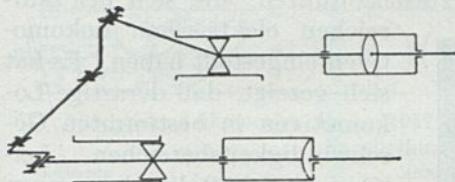


Abb. 254. Offenes Kurbelgetriebe einer Dampflokomotive.

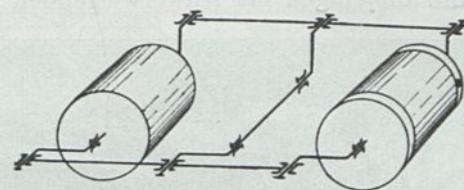


Abb. 255. Geschlossenes Parallelkurbelgetriebe für zwei Motoren mit Blindwelle.

lokomotiven entlehnte Parallelkurbelgetriebe verwendet worden. Dieses Getriebe ermöglicht eine Verbindung zwischen der im Gestell fest gelagerten Triebmaschine und dem Laufwerk trotz der vorhandenen Federung durchzuführen. Vor allem ist es möglich, die Störung der Kinematik des Betriebes durch die Federung in unbedenklichen Grenzen zu halten und dabei auch die Federung der Achsen nicht zu beeinträchtigen.

Das Parallelkurbelgetriebe mit zwei um 90° versetzten Kurbelpaaren ändert jedoch vollständig die bei rein umlaufenden Getrieben bestehende Sachlage. Der stetige Umlauf der treibenden und getriebenen Massen erfährt durch die Zerlegung der stetigen Triebkraft des Motors in periodisch wechselnde Kräfte Störungen, die zusätzliche Beanspruchungen im ganzen Getriebesystem, insbesondere in Verbindung mit den durch die Trägheitskräfte der Massen verursachten Resonanzerscheinungen herbeiführen.

Eine sorgfältige Analyse der Geometrie, Kinematik und Dynamik des Parallelkurbelgetriebes erscheint daher nötig.

Das aus zwei um je 90° versetzten Kurbelsystemen bestehende Parallelkurbelgetriebe ist bei der Dampflokomotive in zwei Formen in Gebrauch: zur Verbindung der Dampfmaschine mit der Treibachse (Abb. 254) und zur Kupplung der letzteren mit einer oder mehreren Kuppelachsen.

Das erstgenannte Getriebe ist eine kinematisch nicht geschlossene Kette, ein statisch bestimmtes System, in welchem das Kräftespiel einen eindeutig festliegenden Verlauf nimmt.

Das Getriebe von je zwei gekuppelten Achsen stellt dagegen eine starr geschlossene kinematische Kette, ein statisch unbestimmtes System, dar.

Die Kinematik des letzteren Systems arbeitet trotz gefederter Führung der Achsen im Gestell einwandfrei, weil die Lagerung aller gekuppelten Achsen gleichartig beschaffen ist. Beim Durchfedern des Gestelles bleibt die gegenseitige Lage der am Oberbau geführten Achsen unverändert.

Im offenen Getriebe ist der Höchstwert der auftretenden Kräfte durch den Dampfdruck im Zylinder begrenzt, in welchem sich zugleich alle durch Herstellungs- und Erhaltungsfehler verursachten Unregelmäßigkeiten ausgleichen können.

Im geschlossenen System ist dies nicht mehr der Fall: die Größe der auftretenden Kräfte ist von der Verformung abhängig. Es gibt unendlich viele Möglichkeiten für den Kräfteplan. Von diesen Möglichkeiten interessieren diejenigen, die gefährliche Beanspruchungen herbeiführen können, insbesondere auch deshalb, weil für elektrische Triebfahrzeuge auch die praktisch starr geschlossene Form des Parallelkurbelgetriebes zur Verbindung der Triebmaschinen untereinander und mit den Reibungsachsen gebräuchlich ist (Abb. 255).

Außer der hier festgelegten geometrischen Verschiedenheit der beiden Formen des Kurbelgetriebes bestehen in den beiden Anwendungsgebieten weitere tiefgreifende Unterschiede.

Auf diese wesentlichen Unterschiede, die man ursprünglich unbeachtet ließ, sind diejenigen oft schwerwiegenden Störungen zurückzuführen, die sich bei zahlreichen elektrischen Lokomotiven eingestellt haben. Es hat sich gezeigt, daß derartige Lokomotiven in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen heftigen Schüttlerscheinungen unterworfen sind, die in manchen Fällen sogar zu Brüchen des Getriebes geführt haben.

Die Ursachen dieser Erscheinungen können dem Wesen und ihrem Charakter nach physikalisch als erfaßt angesehen werden, wogegen die mathematische Bearbeitung noch zu keinem abgeschlossenen Ergebnis gelangt ist.

Der wesentlichste Unterschied zwischen dem offenen Kurbelgetriebe der Dampflokomotive und der geschlossenen Mechanik des elektrischen Triebfahrzeuges besteht darin, daß im ersten nennenswerte mit Trägheitskräften behaftete Massen überhaupt fehlen, wogegen schwingungsfähige vergleichsweise große Massen innerhalb des Getriebes für die elektrische Lokomotive kennzeichnend sind. Demzufolge ist es naheliegend, daß, wenn im Getriebe an Stelle des gleichmäßigen Umlaufes periodisch wechselnde Kräfte auftreten, Schwingungen entstehen können.

In diesem Belange ist es von Wichtigkeit, daß im Parallelkurbelgetriebe der Dampflokomotive die Zylinder- und Kreuzkopfreibung dämpfend wirken, wogegen dieser Vorteil im Getriebe der elektrischen Lokomotive meist so gut wie ganz fehlt.

Der tatsächliche Verlauf der Stangenkräfte im geschlossenen Parallelkurbelgetriebe ist, weil das System statisch unbestimmt ist, unbekannt, doch kann der Kräfteplan unter bestimmten Voraussetzungen insbesondere für zwei Grenzfälle in stationärem Zustand analytisch ermittelt werden.

a) Das elementare Parallelkurbelgetriebe der elektrischen Lokomotive besteht aus der mit zwei fliegend angeordneten, um 90° gegeneinander versetzten Kurbeln versehenen Ankerwelle, die durch zwei Stangen mit einer ebenfalls mit zwei Kurbeln versehenen Blindwelle verbunden wird.

Ein ebensolches Kurbel- und Stangensystem dient zur Kraftübertragung zu einer Treibachse. Es besteht zwischen beiden Arten insofern ein Unterschied, als im ersten Fall beide gekuppelte Wellen im Fahrzeuggestell in gleicher Weise fest gelagert sind, wogegen im zweiten Fall die Treibachse im Rahmen gefedert angeordnet ist.

Im Hinblick auf dieses Federspiel ist die Anordnung der Blindwelle bzw. der Ankerwelle in der Ebene der Kuppelachsen erwünscht (Abb. 242, 251, 256), denn

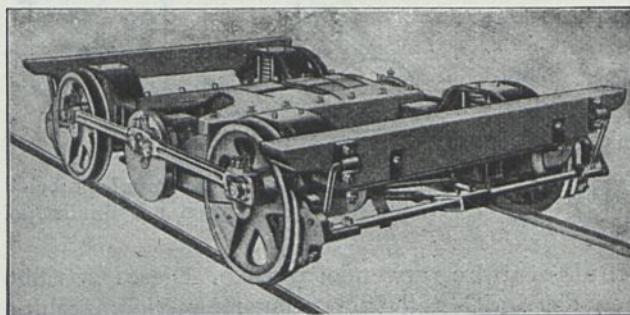


Abb. 256. Gestellmotor von Eikemeyer mit Parallelkurbelgetriebe (1890).

nur in diesem Fall entspricht dem Federspiel eine unbeträchtliche Streckung der Treibstange. Aus dem gleichen Grunde ist nur eine einseitige bzw. einmalige Kupplung der Blindwelle mit den Kuppelachsen ratsam.

Die $1-C+C-1$ -Umformerlokomotive der Pennsylvaniabahn ist ein Beispiel für ein derartiges einwandfreies Getriebe (Abb. 257).

Bei zweiachsigen Fahrzeugen mit einer Treibwelle lässt sich manchmal beides — Überhöhung und zweiseitige Verbindung mit den Kuppelachsen — nicht um-

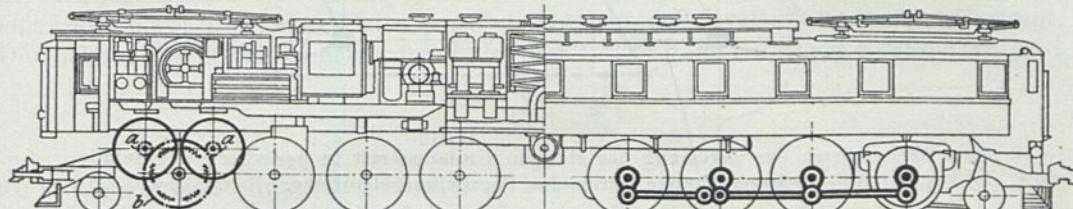


Abb. 257. Lokomotive Reihe 1917 der Pennsylvaniabahn, gefederte Zahnradübersetzung, Parallelkurbelgetriebe ohne Überhöhung.

Leistung	4800 PS	Triebgewicht	201 t
Achslage	$1-C+C-1$	Raddurchmesser	1830 mm
Gesamtgewicht	244 t	Zahnradübersetzung	1:5

gehen; man ordnet dann die Schergabeln der Achsen nicht senkrecht, sondern schief im rechten Winkel zur schießen Stangenrichtung an. (Lokomotiven der I. Reihe der Burgdorf-Thunbahn), wodurch die Geometrie der geradlinig gegliederten Kuppelstangen erzielt wird (Abb. 258).

Die gegenüber den Kuppelachsen überhöhte Anordnung der Treib- oder Blindwelle verursacht während des Umlaufes ein periodisch wechselndes die Federung des Fahrzeuges be- und entlastendes Moment, welches ein Nicken des Fahrzeuges herbeiführen kann.

Beim Gestellmotor mit Vorgelege übernimmt die Vorgelegewelle alle Aufgaben der Blindwelle.

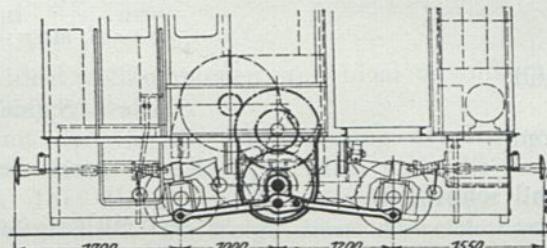


Abb. 258. Zweiachsige Schmalspurlokomotive mit doppelt übersetztem Gestellmotor, überhöhter Treibwelle, schießen Schergabeln. (A.E.G.U.)

Kräftespiel im Parallelkurbelgetriebe. Die als unveränderlich gedachte Umfangskraft P der Triebmaschine mit der auf den Kurbelkreis bezogenen Masse m , zerlegt sich, wie aus dem Schema (Abb. 259) zu entnehmen ist, in zwei Stangenkräfte S_1 und S_2 , wobei die jeweilige Winkelstellung durch die Winkelgeschwindigkeit ω , den Zeitpunkt t und die gegenüber der Stangenrichtung eingenommene Winkelstellung

$$\alpha = \omega t$$

gekennzeichnet ist.

$$P = S_1 \sin(\alpha t) + S_2 \cos(\alpha t) = S \quad \dots \quad (1)$$

Hier sind S_1 und S_2 vorläufig noch unbestimmte Größen; die Gleichung hat für ein ideell starres Getriebes als statisch unbestimmtes System unendlich viele Lösungen.

Die ausgeführten Parallelkurbelgetriebe sind im physikalischen Sinne keine starren Gebilde. Man kann vielmehr annehmen, daß in denselben den Stangenkräften proportionale Längenänderungen vor sich gehen, indem bei reichlich bemessenen Bestandteilen nur elastische Formänderungen auftreten.

Diese Formveränderung möge im wesentlichen in einer Kürzung oder einer Verlängerung der Stangen zum Ausdruck kommen. Diese Längenänderung kann mit genügender Annäherung als Projektion einer am Kurbelkreis in der Tangenten-

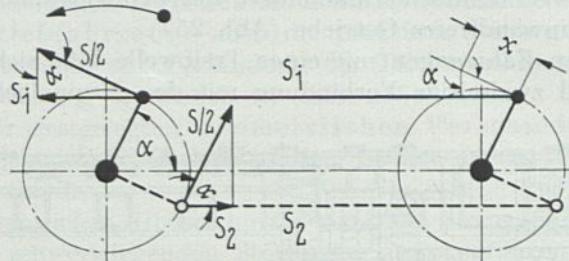


Abb. 259. Schema der Zerlegung der stetigen Umfangskraft in periodisch wechselnde Stangenkräfte durch das Parallelkurbelgetriebe.

richtung gemessenen Strecke dx auf die Stangenrichtung angesehen werden (Abb. 259). Die Längenänderung der Stange entspricht den Stangenkräften, so daß

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{dx \sin \alpha}{dx \cos \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (2)$$

Substituiert man den sich hieraus für S_2 ergebenden Wert

$$S_2 = S_1 \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}$$

in die Gl. 1, wird

$$S = S_1 \sin \alpha + S_1 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha}$$

und

$$S \sin \alpha = S_1 (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)$$

somit

$$S_1 = S \sin \alpha \quad \text{und ebenso} \quad S_2 = S \cos \alpha$$

und schließlich

$$P = S \sin^2 \alpha + S \cos^2 \alpha = S,$$

d. h. das Parallelkurbelgetriebe mit federnden Stangen zerlegt die konstante Treibkraft P des Motors in zwei periodisch schwingende Stangenkräfte, die sich wieder zu einer konstanten Gesamtstangenkraft S vereinigen.

Der Höchstwert der Stangenkraft ist gleich der Umfangskraft. Der Kurbelwellen-Lagerdruck schwankt in der Stangenrichtung zwischen den Grenzwerten $\pm 0,707 S$.

Die beiden Stangenkräfte treten, wenn sich beide Kurbeln in demselben Halbkreis ober- oder unterhalb der Stangenrichtung befinden, gleichgerichtet als Druck- oder Zugkräfte auf; es entsprechen ihnen in diesen Lagen elastische Formveränderungen gleicher Art, wogegen Kurbelstellungen in Quadranten beiderseits der Stangenrichtung entgegengesetzte gerichteten Formveränderungen entsprechen.

Die der Formveränderung der Stangen entsprechende Voreilung der treibenden Kurbel gegenüber der getriebenen bleibt demnach unveränderlich und kann durch die Bogenlänge $r\varphi$ gemessen werden.

Die vorstehende Ableitung gilt für ein aus zwei Kurbelwellen und zwei Stangen mit um 90° versetzten Kurbeln bestehendes System, somit vor allem für das mit den Kuppelachsen einebnige Kurbelgetriebe, wobei die Wirkung des Feder-spiels außer acht bleiben kann.

Aus obigem Ergebnis folgt, daß selbst das ideale Parallelkurbelgetriebe, bei welchem beide Stangensysteme in gleicher Weise an der Kraftübertragung teil-

nehmen und welches aus zwei um 90° gegeneinander versetzten Systemen besteht, insoferne unvollkommen ist, als bei halbem mittleren Drehmoment einer Seite jede Seite für die volle Umfangskraft bemessen werden muß.

Kennzeichnend für dieses Getriebe ist das dem Kräftespiel in den Stangen entsprechende Pendeln der Leistung durch die Kurbelwelle während jeder Umdrehung zweimal von der einen zur anderen Getriebeseite.

Gegenüber dem in beiden Getriebeseiten übereinstimmenden Kräftespiel tritt der entgegengesetzte Grenzfall dann ein, wenn infolge irgendeiner Unregelmäßigkeit überhaupt nur eine Seite des Getriebes an der Kraftübertragung teilnimmt. Die beiden in die Stangenrichtung fallenden Teilkräfte der stetigen Kurbelkraft sind

$$S_1 = \frac{K}{\sin \alpha} \quad \text{und} \quad S_2 = \frac{K}{\cos \alpha}$$

wo α die Winkelstellung der Kurbel in bezug auf die Stangenrichtung mißt. Für $\alpha = 0$ müßte $P_1 = \infty$ werden, d. h. es ist eine Kraftübertragung unmöglich.

In diesem Ergebnis wird der Unterschied zwischen der Aufgabe des Kurbelgetriebes der Dampflokomotive und derjenigen der elektrischen Lokomotive augenfällig. Bei der ersteren kann die Stangenkraft keinen unerwünscht großen Wert annehmen, denn für $\alpha = 0$ ist auch die Umfangskraft Null (abgesehen von der sonstigen Begrenzung der Stangenkräfte durch den Dampfdruck in den Zylindern), wogegen sie beim elektrischen Betrieb ihren festen endlichen Wert in jeder Kurbelstellung beibehält.

In den Stellungen

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad \text{und} \quad \frac{3\pi}{2} \quad \text{usw.}$$

übereinstimmen die Stangenkräfte des ideal vollkommenen und ideal unvollkommenen Getriebes und sind gleich der Umfangskraft.

Die Getriebe können tatsächlich mit der für die Ausmittelung des Kräftekplanes angenommenen idealen Geometrie nicht hergestellt werden, vielmehr sind Stichmaßfehler, Abweichungen in der Winkelstellung und Länge der Kurbeln, schließlich Lagerspiele unvermeidlich. Die Folge dieser Abweichungen von der für die geschlossene kinematische Kette vorausgesetzten Geometrie ist eine wesentliche Änderung im Verlauf des Kräftekspiels in den Stangen innerhalb der Grenzen der beiden betrachteten Sonderfälle, auch ohne Berücksichtigung der Massenwirkungen und Störungsscheinungen, die tiefgreifende Wirkungen ausüben können.

Das Kräftekspiel der beiden behandelten Grenzfälle betrachtet, ist ersichtlich, daß die Kurbelstellungen

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \quad \text{und} \quad \frac{\pi}{2}$$

und ihr Mehrfaches in gewissem Sinne bevorzugte Stellungen sind.

Die $\frac{\pi}{4}$ -Stellungen sind dadurch gekennzeichnet, daß in beiden Grenzfällen in diesen Stellungen die beiden Getriebeseiten an der Kraftübertragung sich am ehesten gleichzeitig beteiligen.

Setzt man eine elastische Verformung des Getriebes voraus, wird diese — abgesehen von der geringfügigen eben der Verformung entsprechenden Abweichung der beiden Kurbelseiten von $\frac{\pi}{4}$ — in beiden Seiten des Getriebes dieselbe Höhe erreichen. Andererseits verhindert eben die Verformung das einseitige Anwachsen der Stangenkraft, denn bei einigermaßen sorgfältiger Herstellung muß die andere

Getriebeseite sich an der Kraftübertragung beteiligen, wenn die Verformung der einen Stange eine gewisse Grenze überschreitet.

Von besonderem Einfluß auf den Verlauf der Kraftübertragung hat sich das meist unvermeidliche Lagerspiel des Getriebes erwiesen.

Der in der Hauptsache in Betracht kommenden Verformung der Stangen Rechnung tragend, kann diese in Abhängigkeit von der Kurbelstellung durch den Ausdruck

$$r\varphi \sin \alpha \quad \text{und} \quad r\varphi \cos \alpha$$

gemessen werden, wenn $r\varphi$ die am Kurbelkreis gemessene Voreilung des antreibenden Kurbelsystems gegenüber dem getriebenen System ist.

Diese Annahme enthält dann einen Widerspruch, wenn das Sinusgesetz für die Stangenkräfte vorausgesetzt wird, trotzdem eben in Zusammenhang mit dem Lagerspiel wenigstens teilweise ein veränderter Verlauf desselben eintritt. Die Annahme eines harmonischen Kräftespieles darf nur für den Bereich gleichzeitigen Eingriffes beider Getriebeseiten festgehalten werden.

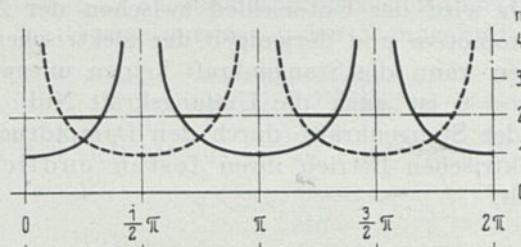


Abb. 260. Verlauf des Stangeneingriffes in Abhängigkeit von der Winkelstellung der Kurbeln; Voreilwinkel im Kurbelkreis gemessen (Ordinaten).

Bei Lagerspiel (*a*) vermindert sich die obige Verformung.

Für die Stangenkräfte gelten, wenn der Nachgiebigkeitsgrad des Systems γ ist, die Gleichungen

$$\begin{aligned} S_1 &= \gamma(r\varphi \sin \alpha - a); \\ S_2 &= \gamma(r\varphi \cos \alpha - a), \end{aligned}$$

vorausgesetzt, daß das Lagerspiel beider Seiten gleich groß ist.

Das zu übertragende Drehmoment kann ausgedrückt werden:

$$M = S_1 r \sin \alpha + S_2 r \cos \alpha,$$

somit

$$M = \gamma r \{ [r\varphi \sin^2 \alpha - a \sin \alpha] + [r\varphi \cos^2 \alpha - a \cos \alpha] \}.$$

Eine Kraftübertragung kann nur stattfinden, wenn

$$r\varphi \sin \alpha > a,$$

ebenso

$$r\varphi \cos \alpha > a,$$

denn nur in diesem Falle gelangt der Kurbelzapfen mit dem Stangenlager in Eingriff (Abb. 260).

Ist

$$r\varphi < \frac{a}{\sin \alpha} \quad \text{und} \quad r\varphi < \frac{a}{\cos \alpha},$$

ist ein Eingriff überhaupt, also auch für den Fall, daß $\sin \alpha$ und $\cos \alpha$ ihre Höchstwerte = 1 erreichen, nicht möglich.

Für die Werte $a < r\varphi < 1,41 a$ setzt die Kraftübertragung zeitweilig aus, die Triebmaschine wird in den eingeschlossenen Zeitabschnitten bestrebt sein, durchzugehen.

Erst für

$$r\varphi \geq 1,41 a,$$

d. h.

$$r\varphi > \frac{a}{\sin 45^\circ}$$

ist der dauernde, wenn auch jeweils nur einseitige Eingriff gesichert. Aus Abb. 261 ist erkenntlich, daß im Getriebe die ideale Kraftverteilung um so mehr angenähert wird, je größer die elastische Verformung im Vergleich zum Lagerspiel wird.

Je größer die Verformung des Getriebes wird, um so mehr überdecken sich gegenseitig die Arbeitsgebiete beider Stangenseiten und um so eher wird der harmonische Verlauf der Stangenkräfte angenähert.

Aus der Darstellung des Stangeneingriffes bei Lagerspiel ist zu ersehen, daß im Bereich von etwa 15° vor und nach der Totlage die betreffende Stange selbst bei sehr geringem Spiel bzw. vergleichsweise sehr großer Elastizität nicht in Eingriff kommen kann.

Die Bedeutung der Elastizität des Getriebes tritt durch diese Betrachtung in Erscheinung.

Der Verlauf des der Eingriffslinie $r\varphi = na$, wo z. B. $n = 2$ sei, entsprechenden Kräftekspiele (Abb. 261) kann nur als die bei einem massenfreien Getriebe auftretende Grundform angesehen werden, die durch die unvermeidliche Entladung von Massen- und Elastizitätskräften einerseits eine Verflachung der unvermittelten Änderungen, andererseits wenn bei geeigneter Frequenz der Impulse Schwebungen oder Resonanzen eintreten, eine wesentliche Steigerung der Beanspruchungen verursachende Veränderung erfahren kann. Getriebeanordnungen, die in diesem Be- lange einwandfrei ausgelegt sind, sollen daher angestrebt werden.

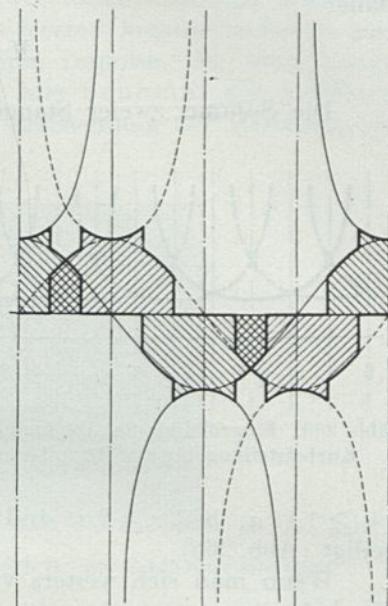


Abb. 261. Verlauf der Stangenkräfte im aus zwei gegeneinander um 90° versetzten Systemen bestehenden Kurbelgetriebe für $r\varphi = 2a$ in Abhängigkeit von der Kurbelstellung.

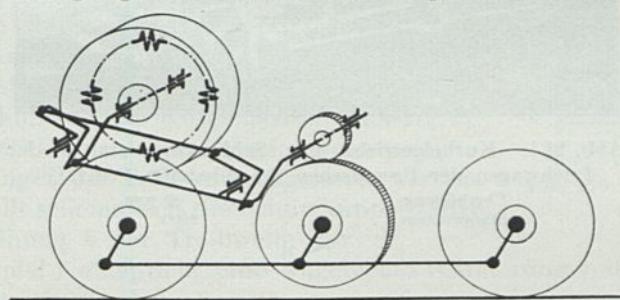


Abb. 262. Dreiphasiges Kurbelgetriebe.

Den späteren Betrachtungen vorgreifend, ist in diesem Zusammenhange ein aus drei gegeneinander um je 120° versetzten Kurbeln und drei Stangen bestehendes Dreiphasengetriebe (Abb. 262) zu betrachten.

Aus dem Kräfteplan dieses Systems geht hervor, daß unter Voraussetzung einer gleichmäßigen Elastizität der drei Kurbelsysteme und eines harmonischen Spiles der Stangenkräfte jede Stange mit $\frac{2}{3}$ der Umfangskraft beansprucht wird.

Daß das System, wenn man davon absieht, daß die drei Stangensysteme nicht in einer Ebene liegen, für sich schon ausgewuchtet ist, bedarf keines Beweises.

Bezüglich des zu übertragenden Drehmomentes gilt

$$M = S_1 r + \frac{S_2}{2} r \sin 30^\circ + \frac{S_3}{2} r \sin 30^\circ,$$

$$S_2 = S_3 \quad \text{und} \quad S_1 = S_2 + S_3,$$

daher

$$M = \frac{3}{2} K r \quad K = \frac{2}{3} \left(\frac{M}{r} \right).$$

Die Summe zweier Stangenkräfte ist

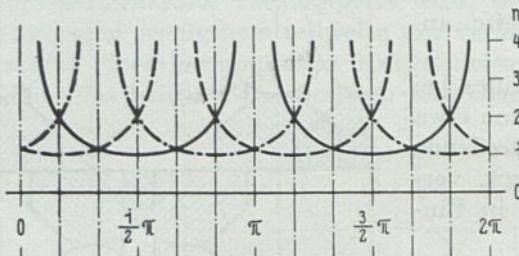


Abb. 263. Eingriffslinie in Abhängigkeit von der Kurbelstellung für das Dreiphasengetriebe.

$r\varphi \geq 1,41 a$; bei $r \geq 2 a$ sind stets zwei Stangen an der Kraftübertragung beteiligt (Abb. 263).

Wenn man sich weiters vor Augen hält, daß beim Zweikurbelsystem die 45° Kurbelstellungen insoferne ausgesprochen bevorzugte Stellungen sind, als in diesen

jeweils gleich groß und entgegengesetzt der dritten Stangenkraft; es tritt somit — von den durch die dreiebenige Anordnung verursachten Momenten abgesehen — eine vollständige Entlastung von der Lagerreaktion ein.

Dieses Getriebe gibt daher günstigere Wellenlagerbeanspruchungen als die rein umlaufenden Getriebe.

Lagerspiel vorausgesetzt, werden die Eingriffsverhältnisse augenfällig günstiger. Der Eingriff wird schon für $r\varphi \geq 1,07 a$ stetig gegen früher bei

Stangen an der Kraftübertragung be-

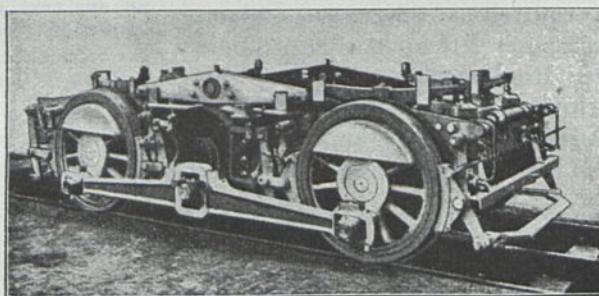


Abb. 264. Kurbelgetriebe mit Schlitzkuppelstange der Triebwagen der Preußischen Staatsbahnen. (A.E.G.)

Überhöhung 80 mm

Stangenlänge 2500 ,

$$\frac{l}{h} \approx 31$$

der gleichzeitige Eingriff beider Stangen am ehesten eintritt und diese Stellungen dadurch bemerkenswert sind, daß die beiden Stangenkräfte gleich groß sind, so können daraus für das Dreiphasengetriebe insoferne noch günstigere Eingriffsverhältnisse gefolgert werden, als bei diesem der Zustand der Gleichheit der Stangenkräfte dauernd besteht.

Die Untersuchung der Geometrie des Dreiphasengetriebes mit Lagerspiel zeigt jedoch, daß das mit diesem Fehler behaftete Getriebe nicht günstiger arbeitet als das Zweikurbelsystem.

Die theoretisch für $\frac{2}{3} K$ anzulegenden Stangen werden für den früher untersuchten Fall

$$n = \frac{r\varphi}{a} = 2$$

mit der Kraft K beansprucht und selbst für den Fall, daß $n=3$, wächst die Stangenkraft auf 0,775 K .

Man wird demnach die einzelnen Stangen nicht wesentlich schwächer bemessen dürfen, als diejenigen des Zweikurbelgetriebes. Als Vorteil kommt vielleicht zur Geltung, daß die durch das Stangenspiel verursachten Impulse, die beim Zweikurbelsystem viermal in einer Umdrehung auftreten, hier neunmal mit verschiedenen zeitlichen Zwischenräumen vorkommen. Die Erscheinung der Resonanz ist daher weniger wahrscheinlich.

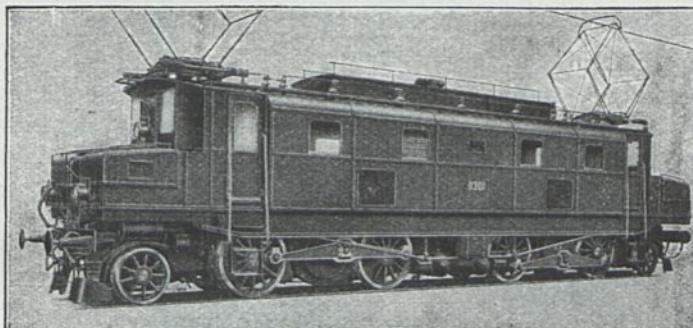


Abb. 265. 1—B+B—1 Lokomotive, Reihe 11301, der S.B.B. mit Schlitzkuppelstange.

(M.F.O.—S.L.F.W.)

Stangenlänge	2900 mm	Überhöhung	120 mm
	$\frac{l}{h} \approx 24$		

b) Die Schlitzkuppelstange. Das mit den Kuppelachsen einebenige Parallelkurbelgetriebe arbeitet nur bei einseitiger Verbindung mit den Achsen einwandfrei, andererseits schließen die Außenmaße der Triebmaschine oder des großen Zahnrades oft die einebenige Anordnung aus. Die Treibwelle muß in diesem Fall überhöht über den Kuppelachsen angeordnet werden (Abb. 264, 265). In beiden Fällen bietet die Schlitzkuppelstange einen Ausweg, indem diese vom Federspiel unbeeinflußt ist, daher auf die Treibkurbel bezogen ein zweiseitiger Anschluß an die Kuppelachsen zulässig erscheint, andererseits können — wie gezeigt werden soll — mäßige Überhöhungen der Treibwelle zugelassen werden.

Abb. 266 stellt schematisch die Schlitzkuppelstange mit einer Überhöhung h der Treibwelle dar.

Dem Federspiel f entspricht eine wagerechte Wanderung x des Scheitelpunktes, an dem die treibende Kurbel angreift.

Aus der Geometrie des Systems folgt:

$$x = b - c \cos(\alpha + \beta)$$

$$x = b - c [\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta] \quad \text{und} \quad b = \sqrt{c^2 - h^2}$$

$$\cos \alpha = \frac{l'}{l} = \frac{\sqrt{l^2 - f^2}}{l}, \quad \sin \alpha = \frac{f}{l}$$

$$\cos \beta = \frac{b}{c} = \frac{b}{\sqrt{h^2 + b^2}}, \quad \sin \beta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + b^2}}$$

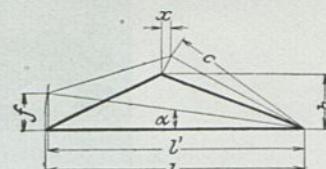


Abb. 266. Geometrie der Schlitzkuppelstange.

$$x = b - \left(\sqrt{h^2 + b^2} \left[\frac{b}{l} \sqrt{\frac{l^2 - f^2}{h^2 + b^2}} - \frac{h}{l} \frac{f}{\sqrt{h^2 + b^2}} \right] \right)$$

$$x = b - \left(\frac{b}{l} \sqrt{l^2 - f^2} - \frac{h}{l} f \right)$$

$$x = b - b \frac{l'}{l} + \frac{h}{l} \cdot f.$$

Angenähert ist $\frac{l'}{l} \approx 1$, daher

$$x \approx \frac{h}{l} \cdot f,$$

z. B. für

$$\frac{h}{l} = \frac{1}{10} \quad \text{und} \quad f = 20 \text{ mm}$$

entspricht der Federung eine wagerechte Längenänderung von etwa 2 mm.

Es ist einleuchtend, daß eine derartige Längenänderung den zulässigen Wert der Lagerspiele, ebenso die elastischen Dehnungen des Systems weit übertrifft. Schon eine Überhöhung von $\frac{1}{20}$ verlangt eine harte Federung des Fahrzeuges.

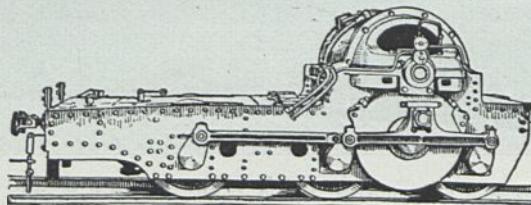


Abb. 267. Untergestell der 300 PS - C + C - Lokomotive der Mariazellerbahn, 1. Reihe, mit kurzer Schlitzkuppelstange. (Ö.S.S.W.)

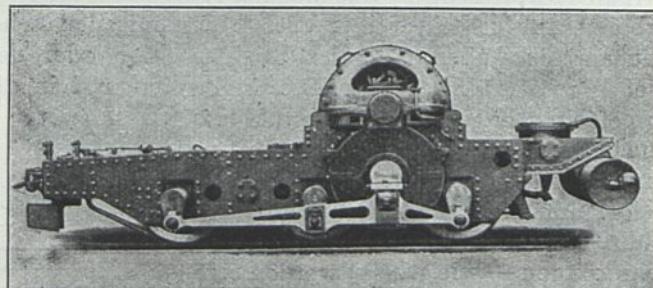


Abb. 268. Untergestell der 300 PS - C + C - Lokomotiven der Mariazellerbahn, 2. Reihe, mit langer Schlitzkuppelstange. (Ö.S.S.W.)

Die Schlitzkuppelstangen der beiden Reihen der Lokomotiven der Mariazeller Bahn bilden ein anschauliches Beispiel dafür, wie bei dreiachsigem Gestellen und kleinen Radständen die ursprünglichen (Abb. 267) Mißverhältnisse behoben (Abb. 268) werden können. Die Überhöhung der Treibwelle beträgt bei diesen Lokomotiven etwa 190 mm; in der ursprünglichen Anordnung war die Stangenlänge 1200 mm,

das Verhältnis $\frac{l}{h} = \frac{120}{19} \approx 6$. Durch Übergreifen der Stange auf die erste Achse

wurde unter Beibehaltung aller andern Anordnungen ein Verhältnis $\frac{2400}{19} \approx 12$ erzielt.

Die oben geschilderte Sachlage wird in der Praxis noch durch zwei Umstände verschärft.

Die zuverlässige Schmierung des Schlitzes ist kaum zu erreichen; ebensowenig läßt sich die Nachstellbarkeit der Kulisse ohne Umständlichkeit und ohne bedeutende Gewichtsvermehrung der Stange bewirken. Andererseits muß bei dieser Bauart die Kulisse die gesamte Zugkraft des Fahrzeuges übertragen, weil im Schlitz die treibende Kurbel angreift.

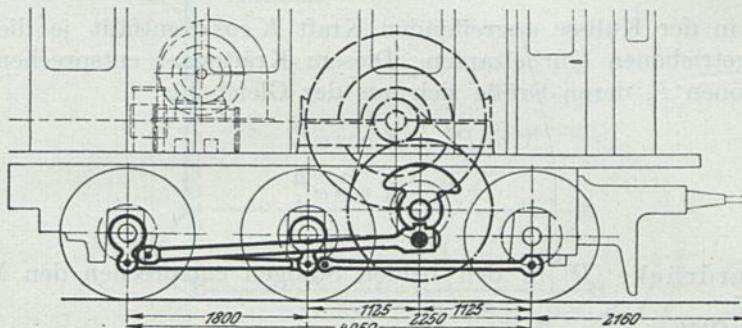


Abb. 269. Untergestell und Getriebe der C+C-Lokomotive der Lötschbergbahn, 1910. Angelenkte Treibstange, Überhöhung der Blindwelle 253 mm, Treibraddurchmesser 1350 mm, Motorleistung 1000 PS/h. (M.F.O — S.L.F.W.)

Geometrisch denselben Gesetzen ist der Antrieb einer schräg liegenden, an einem Kurbelzapfen angreifenden Treibstange unterworfen (Abb. 269), wobei jedoch die Federung nur einer Achse auf die Treibwelle von Einfluß sein kann.

Praktisch kommt bei letzterer Mechanik der Vorteil zur Geltung, daß die Stange eine vergleichsweise große Länge erhalten und nachstellbar eingerichtet werden kann. In den bisherigen Ausführungen (C+C-Lokomotive der Lötschbergbahn und 1—C+C—1-Lokomotive von B.B.C. für die S.B.B.) hat man einem in senkrechtem Sinn einebenigen Getriebe den Vorzug gegeben — wahrscheinlich um die beim zweiebenigen Getriebe nötigen langen Zapfen zu vermeiden und den Zapfen der Kurbel des Treibrades zu entlasten — und die Treibstange mit einem Auge an eine Kuppelstange angelenkt.

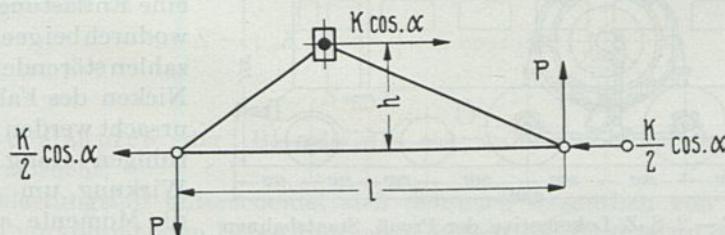


Abb. 270. Kräfteplan der Schlitzkuppelstange.

Der Kräfteplan der Schlitzkuppelstange ist der Abb. 270 zu entnehmen. Das an den Treibachsen widerstehende Moment sei

$$M_w = Kr = Q_1 r \cos \alpha + Q_2 r \sin \alpha$$

und auf Grund der Ableitung für das Parallelkurbelgetriebe

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha},$$

wo Q_1 und Q_2 die Kurbelkräfte in der Kulisse sind; daher

$$M_w = Q_1 r \left(\cos \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right) = Q_1 r \frac{1}{\cos \alpha}$$

$$K r = Q_1 r \frac{1}{\cos \alpha},$$

somit

$$Q_1 = K \cos \alpha \quad \text{und} \quad Q_2 = K \sin \alpha.$$

Von der in der Kulisse angreifenden Kraft $K \cos \alpha$ entfällt je die Hälfte auf einen der angetriebenen Kurbelzapfen. Diesem Kräftepaar entsprechen zwei senkrechte Reaktionen P , deren Größe sich aus der Gleichung

$$Pl = K \cos \alpha h$$

$$P = K \cos \alpha \frac{h}{l}$$

bestimmt.

Die Lagerdrücke (R) in den beiden Stangen entsprechen den Mittelkräften aus P und $\frac{K}{2} \cos \alpha$

$$R = \frac{K}{2} \cos \alpha \sqrt{1 + \frac{4h^2}{l^2}}.$$

Der Zapfendruck wechselt somit periodisch seine Größe; seine Richtung ist konstant, denn

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{\frac{K}{2} \cos \alpha} = \frac{K \cos \alpha \frac{h}{l}}{\frac{K}{2} \cos \alpha} = \frac{2h}{l},$$

d. h. bei Anordnung des Schlitzes in der Stangenmitte fällt der Zapfendruck in die Richtung der schiefen Verbindungslien der Stange.

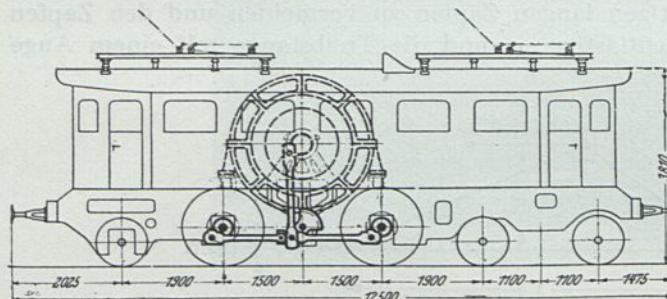


Abb. 271. 1 — B — 2 S.-Z.-Lokomotive der Preuß. Staatsbahnen mit senkrechter Treibstange und Blindwellen.

Leistung	1200 PS
Reibungsgewicht	32 t
Dienstgewicht	72 t
Uml./min	430
Triebadddurchmesser	1600 mm

Die Schlitzkuppelstange ist, namentlich in Verbindung mit Blindwellen, auch ohne Überhöhung ausgeführt worden, wodurch der oben erwähnte Mangel des zweiseitigen Anschlusses von Kuppelstangen an eine im Rahmen festgelagerte Kurbelwelle umgangen werden kann. (1 - C - Lokomotive der Mittenwaldbahn, Abb. 491.)

Den senkrechten Reaktionen entspricht einerseits eine Belastung, andererseits eine Entlastung der Federn, wodurch bei geeigneten Drehzahlen störende Bewegungen, Nicken des Fahrzeuges, verursacht werden können. Den ruhigen Gang stört diese Wirkung um so mehr, als die Momente an den beiden Maschinenseiten um 90° in der Phase verschoben sind.

Diese Umstände sprechen dafür, geringe Überhöhungen anzustreben.

c) Das Parallelkurbelgetriebe mit Blindwelle. Die beiden vorbehandelten Getriebearten setzen keine oder eine vergleichsweise geringe Überhöhung der treibenden Kurbelwelle über den Kuppelachsen voraus. Sofern eine Hochlage unvermeidlich oder erwünscht ist, muß ein besonderes Parallelkurbelgetriebe zur

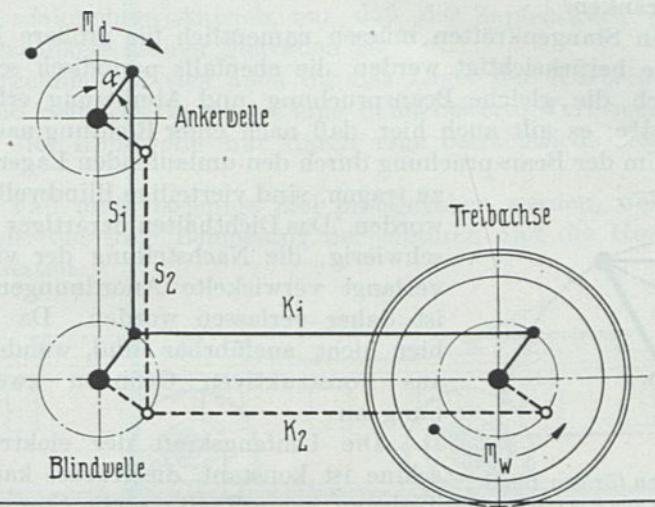


Abb. 272. Schema der Kraftübertragung mit senkrechter Treibstange und Blindwelle.

Verbindung der Treibwelle mit den Kuppelachsen vorgesehen werden. Eine Blindwelle, in der Ebene der Kuppelachsen angeordnet, bildet dann die Verbindung der beiden Getriebesysteme.

Es sei als Grenzfall angenommen, daß die gekuppelten Stangensysteme miteinander einen rechten Winkel einschließen (Abb. 271).

Unter den früheren Voraussetzungen kann man für das zweite Stangensystem dasselbe Gesetz für die Zerlegung der Kuppelstangenkräfte annehmen; es wird dann

$$K_1 = K \cos \alpha, \quad K_2 = K \sin \alpha \quad \text{und} \quad S_1 = K \sin \alpha, \quad S_2 = K \cos \alpha.$$

An einem Zapfen greifen die zu einander senkrechten Stangenkräfte (Abb. 272) S_1 und K_1 , bzw. S_2 und K_2 an.

Ihre Mittelkraft ist

$$S = \sqrt{(K \sin \alpha)^2 + (K \cos \alpha)^2},$$

somit

$$S = K.$$

Der Kurbelzapfen der Blindwelle ist mit einer unveränderlichen Kraft K beansprucht.

Dieser Belastungsfall unterscheidet sich demnach wesentlich von den sonst im Maschinenbau vorkommenden Belastungsarten, indem die Richtung der Kraft während des Umlaufs auch umläuft.

Die Richtung der Kraft gegen die Wagerechte ist bestimmt durch die Gleichung

$$\frac{K \sin \alpha}{K \cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha,$$

d. h. die Neigung der Richtung der Mittelkraft entspricht dem Winkel α . Der Zapfendruck dreht sich um den ruhend gedachten Zapfen mit der unveränderlichen Größe K während einer Umdrehung der Welle zweimal im Kreise herum. Jede Faser des Zapfenquerschnittes erleidet während jeder Umdrehung zweimal je eine größte Druck- und Zugbeanspruchung.

Dieser Art der Beanspruchung Rechnung tragend, ist es zwecklos, die Stangenlager zweiteilig und nachstellbar einzurichten. Es genügt vielmehr, den Kurbelzapfen in einteiligen Büchsen laufen zu lassen; dagegen empfiehlt es sich, die Beanspruchung soweit als möglich herabzusetzen, um die Abnutzung, d. h. das Entstehen von Lagerspielen einzuschränken.

Außer diesen Stangenkräften müssen namentlich für größere Drehzahlen auch die Fliehkräfte berücksichtigt werden, die ebenfalls periodisch schwanken.

Grundsätzlich die gleiche Beanspruchung und Abnutzung erfährt das Lager der Kurbelwelle; es gilt auch hier, daß nach einer Richtung nachstellbare Lager zwecklos sind. Um der Beanspruchung durch den umlaufenden Lagerdruck Rechnung

zu tragen, sind vierteilige Blindwellenlager versucht worden. Das Dichthalten derartiger Lager ist äußerst schwierig, die Nachstellung der vierteiligen Lager verlangt verwickelte Anordnungen, diese Bauart ist daher verlassen worden. Da einteilige Lager hier nicht ausführbar sind, wendet man lediglich aus konstruktiven Gründen zweiteilige Anordnung an.

Die Umfangskraft der elektrischen Triebmaschine ist konstant, die Kurbel kann in den beiden Totlagen keine Kraft an die Stange übertragen, so folgt, daß das zu übertragende Drehmoment zwischen den beiden Kurbeln der Blindwelle über die Welle hin und her pendelt, und zwar zweimal während jeder Umdrehung.

Das von der Blindwelle von der einen zur anderen Seite zu übertragende Drehmoment ist allgemein (Abb. 273)

$$M = Ky, \text{ wo } y = r \cos 2\alpha$$

$$M = Kr \cos 2\alpha = M_w \cos 2\alpha.$$

Diese ungünstige Art der Beanspruchung der Blindwelle setzt reichliche Bemessung, hochwertige Baustoffe und sorgfältige Erzeugung voraus.

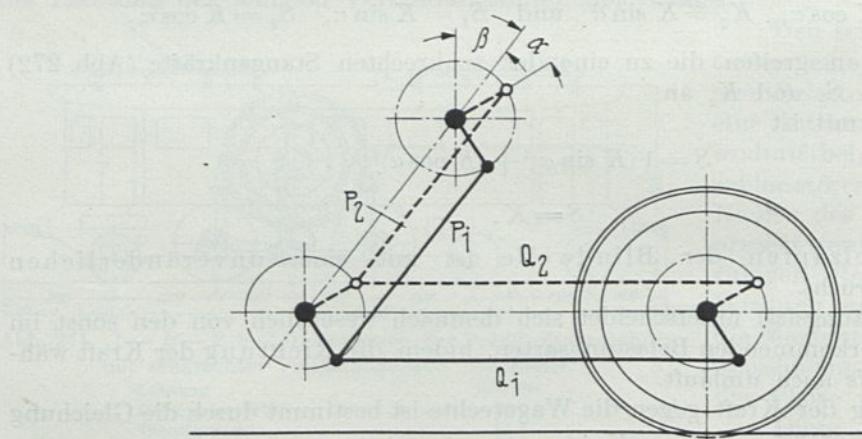


Abb. 273. Kräfteplan für den Blindwellen-Kurbelzapfen für das Getriebe Abb. 272.

Für den allgemeinen Fall eines beliebigen Winkels β der Stangenrichtung zwischen Motor und Blindwelle gegenüber der Senkrechten gilt bezüglich der Stangenkräfte (Abb. 274)

$$P_1 = K \cos \alpha, \quad P_2 = K \sin \alpha$$

$$Q_1 = K \sin (\alpha + \beta), \quad Q_2 = K \cos (\alpha + \beta).$$

Hieraus

$$S = K \cos \beta$$

wieder ein Festwert.

Es bestehen in bezug auf den schrägen Stangenantrieb die gleichen Verhältnisse wie beim senkrechten Antrieb, nur daß der Zapfendruck proportional dem cos des Neigungswinkels kleiner geworden ist.

Dasselbe Ergebnis läßt sich auch für das Lager der Kurbelwelle ableiten.

Entsprechend dem cos-Gesetz ist eine nennenswerte Verbesserung der Kräfteverhältnisse an der Blindwelle nur durch eine beträchtliche Neigung der Stange zu erzielen.

Für diesen Fall muß dasjenige Ziel preisgegeben werden, welchem die Blindwelle dienen soll: die freie Bemessung der Motoren und die Hochlage der Triebmaschinen im Gestell.

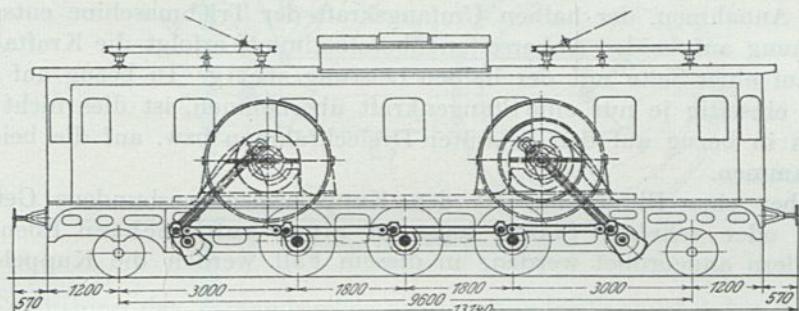


Abb. 275. Lokomotive der Französischen Südbahn mit zwei Schrägstangantrieben und zwei Blindwellen.

Der Schrägantrieb ist in Verbindung mit zwei Triebmaschinen auch doppelt mit zwei Blindwellen, die untereinander über die Kuppelachsen durch gegliederte Stangen (Abb. 275) oder durch Schlitzkuppelstangen verbunden sind, ausgeführt

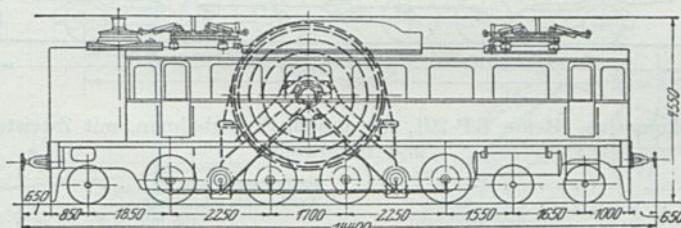


Abb. 276. Schema der Kraftübertragung mit zwei schrägen Stangen und einer Blindwelle.
Schnellzugslokomotive, Reihe EP 235, der preuß. Staatsbahnen. (B.E.W.)

Achsenfolge	2 — D — 1	Regelleistung	3000 PS
Dienstgewicht	108 t	Radurchmesser	1250 mm
Reibungsgewicht	66 t	Höchste Drehzahl	360/min

worden. Da in dieser Anordnung die beiden Anker miteinander starr gekuppelt sind, wird das ganze Getriebe durch alle Stetigkeitsstörungen und Schüttelerscheinungen der gekuppelten Anker in Mitleidenschaft gezogen.

Die ungünstige Beanspruchung der Blindwelle führt namentlich bei vergleichsweise hohen Leistungen bzw. Zugkräften zu konstruktiven Schwierigkeiten. Um diese zu mildern, überträgt man nach einer Ausführung der Bergmann E.W. (2-D-1 Schnellzugslokomotive der preuß. Staatsbahnen Abb. 276) die Leistung eines 3000 PS-Motors auf zwei Blindwellen mit zwei einseitig der Triebmaschine von jeder Kurbel gegeneinander unter 90° Neigung abgehenden Schrägstangen. Wenn

zwar diese Getriebeanordnung durch mehrfach starr geschlossene kinematische Ketten und statisch unbestimmte Systeme gekennzeichnet ist, so konnte doch ein ruhiger Lauf dieser Maschine festgestellt werden. Lediglich bei einer Fahrgeschwindigkeit von etwa 40 km/h verspürt man eine unbedeutende Neigung zu Schwüngen. Die Erklärung hierfür ist einerseits darin zu suchen, daß in den gekuppelten Systemen stets nur eine der Wellen, die Ankerwelle, nennenswerte Massen trägt, andererseits die Radreibung eine wirksame Dämpfung darstellt. Mitbestimmend dürfte des weiteren ein besonderes Merkmal dieses Getriebes sein. Dasselbe ist die erste Ausführung, bei welcher die vom Verfasser vertretene stetige Kraftübertragung durch Stangen, wenn auch unvollkommen, versucht wurde.

Es ist offenkundig, daß die von einem Ankerkurbelzapfen abgehenden gegenüberliegenden unter 90° Neigung angeordneten Stangen eine unveränderliche Mittelkraft geben, die unter den bezüglich der elastischen Verformung des Kurbelgetriebes gemachten Annahmen, der halben Umfangskraft der Triebmaschine entspricht. Da die Anordnung auf beiden Ankerseiten übereinstimmt, erfolgt die Kraftabgabe von Anker je auf einer Seite mit der halben Leistung stetig. In bezug auf die Blindwellen, die einseitig je nur eine Stangenkraft übernehmen, ist dies nicht mehr der Fall, jedoch in bezug auf den gesamten Dreieckrahmen bzw. auf die beiden Blindwellen zusammen.

Das über eine Blindwelle mit den Kuppelachsen verbundene Getriebe mit senkrechter oder schräger Stange kann in einer senkrechten Ebene mit den Kuppelgliedern angeordnet werden; in diesem Fall werden die Kuppelstangen in

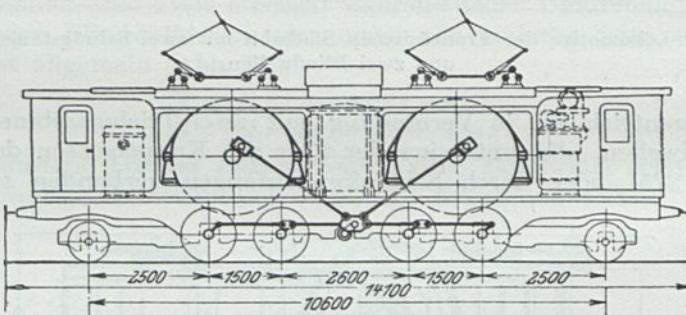


Abb. 277. Lokomotive. Reihe EP 201, der preuß. Staatsbahnen, mit Zweistangenantrieb und Blindwelle.

Achsenfolge	1 — D — 1	Reibungsgewicht	64 t
Dienstgewicht	92 t	Triebaddurchmesser	1050 mm
Höchste Drehzahl	455/min		

Augen an die Treibstange angelenkt. Will man die Beeinflussung der Blindwelle durch die angeschlossenen Kuppelstangen vermeiden, kann das Getriebe zweiebenig ausgeführt werden. Der doppeltlange Kurbelzapfen der Blindwelle wird mit einer Treibstange und einer Schlitzkuppelstange gefaßt. Die Ausführbarkeit der zweiebenigen Anordnung scheitert bei kleinen Raddurchmessern am Raummangel oder zwingt, da es an Platz für eine entsprechend bemessene Nabe für die Kurbel fehlt, zur kostspieligen Herstellung der Blindwelle samt Kurbeln aus einem Schmiedestück.

d) Der Zweistangenantrieb mit Blindwelle. Wenn zwei Triebmaschinen oder zwei treibende Kurbelwellen in einer Lokomotive anzutragen sind, kann das Drehmoment beider über eine gemeinsame Blindwelle auf das Laufwerk übertragen werden. (Abb. 277.) Es entsteht auf diese Art der Zweistangenantrieb, welcher als eine Entwicklungsstufe des Schrägantriebes anzusehen ist.

Für die Stangenkräfte gilt wie früher (Abb. 278):

$$\begin{aligned} P_1 &= K \sin(\alpha + \beta) & N_1 &= K \sin(\gamma - \alpha) & Q_1 &= 2K \cos \alpha \\ P_2 &= K \cos(\alpha + \beta) & N_2 &= K \cos(\gamma - \alpha) & Q_2 &= 2K \sin \alpha. \end{aligned}$$

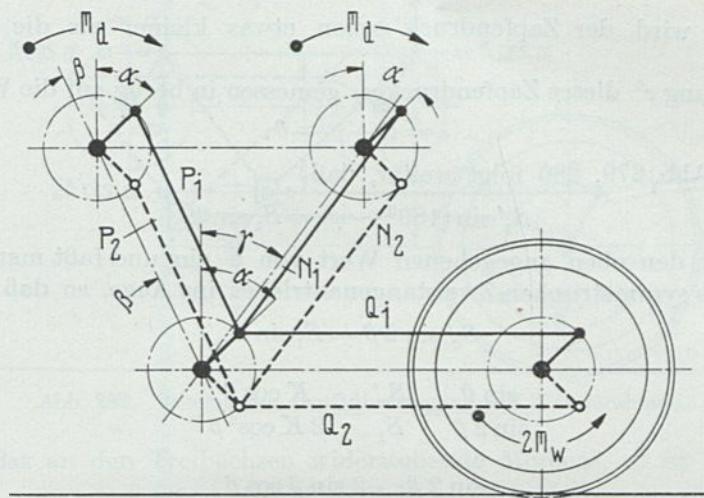


Abb. 278. Schema des Zweistangenantriebes.

Zur Ermittlung des Zapfendruckes an der Blindwellenkurbel hat man sich den Zweistangenantrieb in zwei einzelne Schrägantriebe mit im allgemeinen gegen die Senkrechte nicht gleichen Neigungswinkeln β, γ zerlegt zu denken. Die Zapfendrücke sind dann:

$$S'_1 = K \cos \beta \quad S'_2 = K \cos \gamma.$$

Die Neigungen dieser Zapfendrücke gegen die Wagerechte sind (Abb. 279)

$$\varphi' = \alpha + \beta \quad \text{und} \quad \varphi'' = \gamma - \alpha.$$

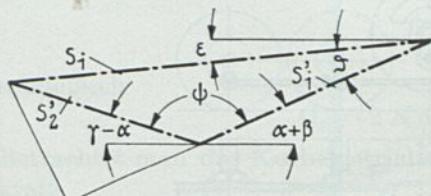


Abb. 279. Kräfteplan der Beanspruchung des Blindwellen-Kurbelzapfens beim Zweistangenantrieb.

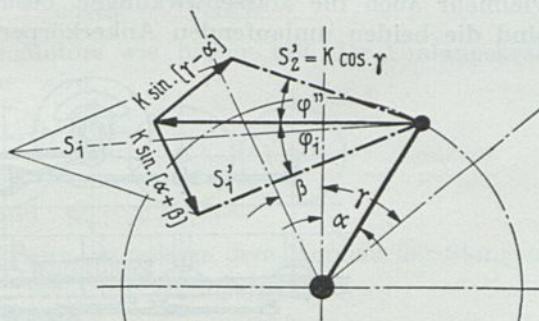


Abb. 280. Kräfteplan für den Kurbelzapfen der Blindwelle beim Zweistangengelenk.

Der gesamte Zapfendruck entspricht der Mittelkraft dieser beiden Teilkräfte, so daß

$$S_1^2 = K^2 (\cos^2 \beta + \cos^2 \gamma - 2 \cos \beta \cos \gamma \cos \psi),$$

wo ψ , wie der Abb. 279 zu entnehmen ist,

$$\psi = 180^\circ - [\alpha + \beta + \gamma - \alpha] = 180^\circ - (\beta + \gamma).$$

Diese Substitution durchgeführt, findet man schließlich

$$S_1 = 2K \cos^2 \beta,$$

d. h. der Kurbelzapfendruck der Blindwelle ist für eine bestimmte Belastung eine unveränderliche Größe.

Die Wirkung der Stangenneigung erläutert ein Beispiel; es sei

$$\beta = 45^\circ \cos^2 \beta = 0,48,$$

in diesem Fall wird der Zapfendruck schon etwas kleiner als die Umfangskraft eines Motors.

Die Richtung ε^0 dieses Zapfendruckes, gemessen in bezug auf die Wagerechte, ist

$$\varepsilon = \alpha + \beta - \vartheta.$$

Aus den Abb. 279, 280 folgt weiter, daß

$$S_2' \sin(180^\circ - \psi) = S_1 \sin \vartheta.$$

Setzt man hier den oben angegebenen Wert von ψ ein und faßt man den üblichen Sonderfall eines symmetrischen Zweistangenantriebes ins Auge, so daß $\beta = \gamma$ wird

$$S_2' \sin 2\beta = S_1 \sin \vartheta$$

und

$$\frac{\sin \vartheta}{\sin 2\beta} = \frac{S_2'}{S_1} = \frac{K \cos \beta}{2K \cos^2 \beta},$$

somit

$$\sin \vartheta = \frac{\sin 2\beta}{2 \cos \beta} = \frac{2 \sin \beta \cos \beta}{2 \cos \beta} = \sin \beta.$$

Der untersuchte Winkel zwischen der Teilkraft S_1' und der Mittelkraft S_1 am Kurbelzapfen der Blindwelle ist somit konstant und gleich dem Neigungswinkel der Stangen gegen die Senkrechte. Es folgt weiter, daß

$$\varepsilon = \alpha + \beta - \vartheta \quad \text{und} \quad \text{da } \vartheta = \beta \quad \text{auch} \quad \varepsilon = \alpha,$$

d. h. der Zapfendruck wandert entsprechend dem Winkel α in entgegengesetzter Richtung um den Zapfen.

Der Zweistangenantrieb mit Blindwelle hat sich nicht bewährt; zur einwandfreien Arbeitsweise eines Getriebes genügt eine ausgeglichene Statik nicht, es müssen vielmehr auch die Massenwirkungen berücksichtigt werden. Bei diesem Getriebe sind die beiden umlaufenden Ankerkörper miteinander starr verbunden.

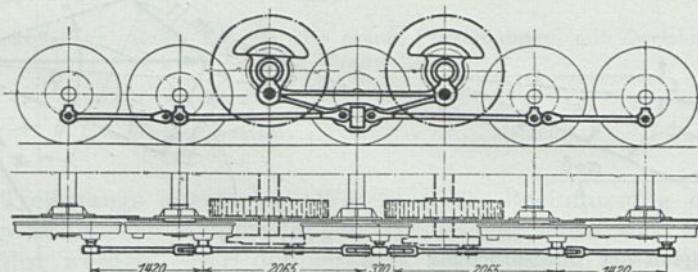


Abb. 281: Laufwerk mit Kandórahmen der 1—E—1 Lötschberglokomotive.

e) Der Schlitzkuppelrahmen. Eine besondere Art des Parallelkurbelgetriebes zur Verbindung zweier Kurbelwellen mit dem Laufwerk unter Vermeidung der Blindwelle bildet der Kuppelrahmen (Abb. 281) mit Schlitz (Kulisse), vielfach nach Kandó [da von ihm die erste Ausführung für die Veltlinlokomotive der Reihe 38 Jahr 1906 stammt] benannt.

Im Tiefpunkt des Kandóschen Dreieckrahmens befindet sich der senkrechte Schlitz, welcher nur wagerechte Kräfte aufzunehmen vermag, wenn man von der vergleichsweise kleinen Reibungskraft an den Seiten absieht.

Es können im ideellen Angriffspunkt des Kuppelrahmens nur die wagerechten Stangenkräfte des Laufwerkes Q_1 und Q_2 aufgenommen werden. (Abb. 282.)

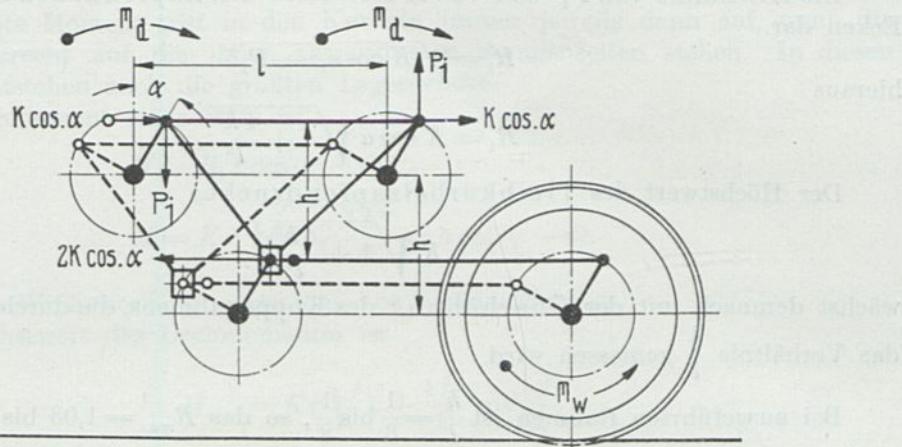


Abb. 282. Schema der Kraftübertragung mit Kandórahmen.

Ist M_w das an den Treibachsen widerstehende Moment, so ist

$$M_w = 2 M_m,$$

wo M_m das Drehmoment eines Motors bedeutet. Aus Gründen des Gleichgewichtes im Beharrungszustand muß

$$2 M_m = Q_1 r \cos \alpha + Q_2 r \sin \alpha$$

sein.

Nach den Gesetzen des Parallelkurbelgetriebes ist

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha},$$

daher

$$2 M_m = Q_1 r \left(\cos \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right) = Q_1 \frac{r}{\cos \alpha}.$$

Drückt man das Drehmoment eines Motors wie bisher mit der Umfangskraft K und dem Kurbelkreishalbmesser r aus, wird

$$2 K r = Q_1 \frac{r}{\cos \alpha}$$

schließlich

$$Q_1 = 2 K \cos \alpha \quad \text{und} \quad Q_2 = 2 K \sin \alpha.$$

Betrachtet man das Kurbelgetriebe einer Seite, so müssen dem Moment der Stangenkraft

$$2 K h \cos \alpha$$

entsprechend an den oberen Ecken zwei entgegengesetzte gerichtete Kräfte auftreten, deren Summe gleich $2 K \cos \alpha$ ist. Wegen der statischen Unbestimmtheit des Systems ist ein genauer Kräfteplan nur unter Annahme elastischer Formveränderungen denkbar.

Wie bez. des elementaren Parallelkurbelgetriebes kann auch hier angenommen werden, daß die beiden Kräfte gleichgroß sind. Zur Herstellung des Gleichgewichtes werden an den oberen Ecken noch zwei gleichgroße entgegengesetzte gerichtete vertikale Kräfte P_1 auftreten müssen, deren Moment

$$P_1 l = 2 K h \cos \alpha$$

wird. Die Kräfte P_1 müssen senkrechte Richtung haben, weil die Kraftübertragung in dieser Richtung erfolgt.

Die Mittelkraft von P_1 und von $K \cos \alpha$ stellt den Zapfendruck an den oberen Ecken dar.

$$R_1 = \sqrt{(K \cos \alpha)^2 + P_1^2}$$

hieraus

$$R_1 = K \cos \alpha \sqrt{1 + \frac{4 h^2}{l^2}}.$$

Der Höchstwert des Treibkurbelzapfendruckes

$$K \sqrt{1 + \frac{4 h^2}{l^2}}$$

wächst demnach mit der Überhöhung des Kuppelrahmens, die durch h bzw. durch das Verhältnis $\frac{h}{l}$ gemessen wird.

Bei ausgeführten Rahmen ist $\frac{h}{l} = \frac{1}{6}$ bis $\frac{1}{8}$, so das $R_{max} = 1,03$ bis $1,05 K$ wird.

Der Neigungswinkel des Lagerdruckes

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_1}{K \cos \alpha} = \frac{2 K \frac{h}{l} \cos \alpha}{K \cos \alpha} = 2 \frac{h}{l}$$

ist unveränderlich und übereinstimmt bei symmetrischem Kuppelrahmen mit der Seitenrichtung des Dreieckes.

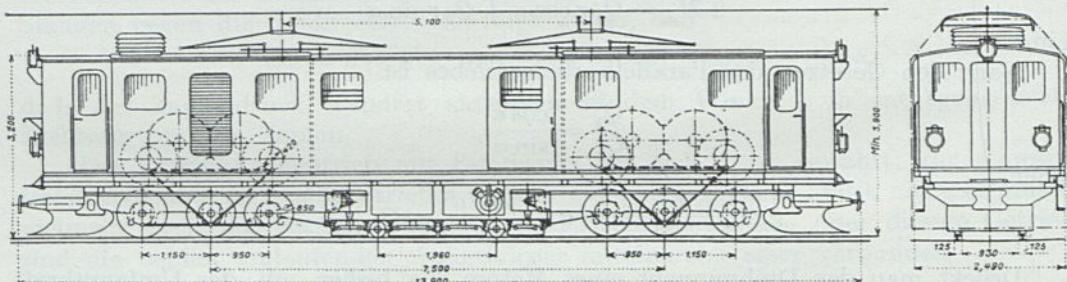


Abb. 283. C+C-Lokomotive der Berninabahn mit Schlitzkuppelrahmenantrieb; besonderes Laufgestell für Schienenbremsen (B.B.C.).

Der Schlitzkuppelrahmen ist von BBC mit unter rechtem Winkel vom Schlitz abgehenden Seiten mit vergleichsweise großer Höhe ($\frac{h}{l} = \frac{1}{2}$) für die C+C-Lokomotiven der Berninabahn ausgeführt worden. (Abb. 283.)

Wählt man nach Kleinow (dessen Ableitung hier wiedergegeben wurde) im Kräfteplan der Triebwerksdrücke $l = 2 K$ (Abb. 284) und errichtet auf dieser Basis ein gleichschenkeliges Dreieck mit der Höhe h , so stellen im Sinne der vorstehenden Ableitung die Seiten des Kraftes des Kuppelrahmens dar. Der feste ein unbestimmtes System darstellende Kuppelrahmen ist in einzelne Stangen aufgelöst zu denken, es fallen dann im symmetrischen Rahmen die Seitenkräfte in die Richtung der Stangen. Die wagerechte Teilkraft CD stellt die Beanspruchung des Rahmens in der wagerechten

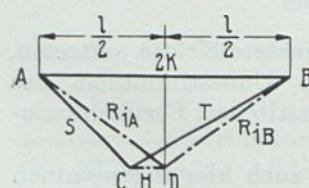


Abb. 284. Kräfteplan des Schlitzkuppelrahmens.

wagerechte Teilkraft CD stellt die Beanspruchung des Rahmens in der wagerechten

Verbindungsstange dar. Im symmetrischen Rahmen wird $CD = 0$ und übereinstimmen die Stangenkräfte S und T nach Richtung und Größe mit den Zapfendrücken R_{1A} und R_{1B} .

Das größte Moment tritt in den Kurbeln immer jeweils dann auf, wenn die Kurbeln senkrecht auf die ihnen zugeordneten Stangenseiten stehen. In diesen Stellungen entstehen auch die größten Lagerdrücke.

Das Drehmoment einer Seite ist

$$M = R_1 r \cos(\varphi - \alpha)$$

$$M = Kr \sqrt{1 + \frac{4h^2}{l^2}} \cos \alpha \cos(\varphi - \alpha),$$

wo nur α die Winkelstellung gegen das Lot veränderlich ist.

Der Höchstwert des Drehmomentes ist

$$M_{max} = Kr \sqrt{1 + \frac{4h^2}{l^2}} \cos^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Der Minimalwert

$$M_{min} = Kr \sqrt{1 + \frac{4h^2}{l^2}} \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Da

$$\cos \varphi = \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4h^2}} \quad \text{und} \quad \frac{\cos^2 \varphi}{2} = \frac{1 + \cos \varphi}{2},$$

wird schließlich

$$M_{max} = \frac{Kr}{2l} [l + \sqrt{l^2 + 4h^2}]$$

und

$$M_{min} = \frac{Kr}{2l} [l - \sqrt{l^2 + 4h^2}].$$

Als Eigentümlichkeit des Kuppelrahmens findet man, daß an den Motorwellen Torsionsmomente auftreten, die größer sind als die nutzbaren Motormomente; außerdem ändert sich die Richtung dieser Momente periodisch.

Vom baulichen Standpunkt ist anzuführen, daß der Schlitz schwer zu schmieren ist und die nachstellbare Einrichtung der Seiten umständlich wird. Man hat den Dreieckrahmen bisher stets mit angelenkten Kuppelstangen gebaut, so daß der Schlitz nur den Druck entsprechend einer Treibachse aufzunehmen hat. Kinematisch ist diese Anordnung nicht einwandfrei, weil dem Feder Spiel des Fahrzeuges entgegengesetzt gerichtete Längenänderungen der Kuppelstangen entsprechen. Dieser Mangel kann gemildert werden, wenn vergleichsweise lange Kuppelstangen vorgesehen werden.

Richtiger wäre, die Kupplung vom in der Kulisse spielenden Zapfen einseitig vorzunehmen, doch steht dem die hohe Beanspruchung der Kulisse durch die gesamte Zugkraft des Fahrzeuges entgegen.

Bemerkenswert ist der von Kleinow behandelte Belastungsfall, daß die beiden durch das Getriebe verbundenen Triebmaschinen nicht gleichgroße Drehmomente entwickeln. Das Drehmoment z. B. des Motors II sei

$$M_{di} = \varepsilon M_d, \quad \text{wo } 0 < \varepsilon < 1.$$

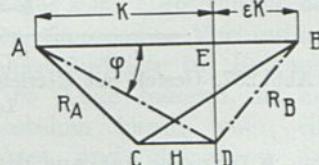


Abb. 285. Kräfteplan der Schlitzkuppelstange für ungleiche Belastung der gekuppelten Motoren.

Die einschlägigen Verhältnisse lassen sich am besten in einem Kräfteplan übersehen (Abb. 285). Die Stangenkraft am Zapfenlager des Motors I setzt sich aus der wagerechten Stangenkraft $K \cos \alpha$ und der senkrechten Teilkraft zusammen.

$$P_1 = K(1 + \varepsilon) \frac{h}{l} \cos \alpha$$

zusammen.

Am Kurbelzapfen des Motors II wirkt die Mittelkraft, ebenso eine wagenrechte Stangenkraft $\varepsilon K \cos \alpha$ und eine lotrechte Teilkraft

$$P_1(1 + \varepsilon) \frac{h}{l} \cos \alpha.$$

Stellt in Abb. 285 die Länge AB im Längenmaßstab die Länge l des Kuppelrahmens, im Kräftemaßstab die Kraft $K(1 + \varepsilon)$ dar und errichtet man in E ein Lot auf AB und der Kuppelrahmen sei ABC , so ist AD ein Maß für den Lagerdruck in A und BD ebenso für den Zapfen B . AC ist die Stangenkraft S , BC die Stangenkraft T und $CD = H$ die Kraft in der wagerecht gedachten Rahmenseite.

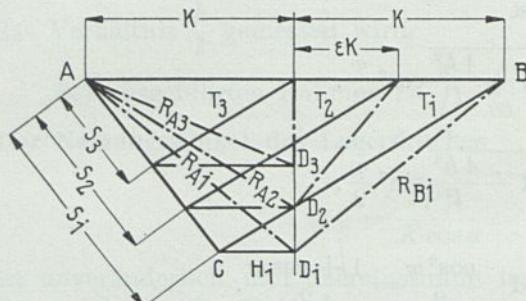


Abb. 286. Zerlegung der Stangenkräfte in der Schlitzkuppelstange.

gibt eine gute Übersicht über die Folgen einer ungleichen Arbeitsleistung der beiden Motoren.

In Abb. 286 sind drei Fälle dargestellt: $\varepsilon = 1,0, 0,5, 0,0$. Es zeigt sich, daß die mit verminderter Leistung arbeitende Welle auch weniger beansprucht ist, insbesondere beträgt die Beanspruchung des Zapfens B unter den dargestellten Verhältnissen nur etwa 40 % der Umfangskraft, wenn sie als Blindwelle lediglich nur zur Führung des Kuppelrahmens dient.

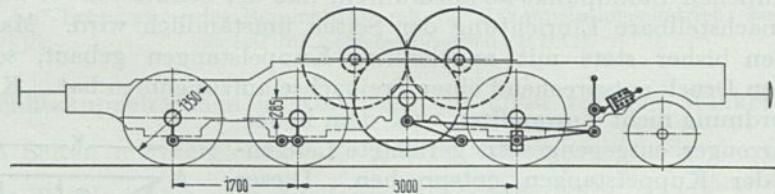


Abb. 287. Gestell mit Getriebe mit unsymmetrischem Schlitzkuppelrahmen der 1-C+C-1-Lokomotive der Reihe 12251 der S.B.B.

Kleinow hat aus dieser Ableitung den Schluß gezogen, daß der Kuppelrahmen auch bei Vorhandensein nur eines Motors bzw. einer Triebwelle angewendet werden kann.

In Ausführung dieses Gedankens ist neuerdings der unsymmetrische Kuppelrahmen mit einem Motor und einer Blindwelle, außerdem mit schief gelegter Seite zwischen den Kurbeln des Motors und der Blindwelle von der S. L. F., Winterthur für 1-C+C-1-Lokomotiven der Reihe 12251 der S. B. B. ausgeführt worden (Abb. 287). Es verlautet, daß für diese immerhin umständliche Mechanik die später noch eingehend zu erörternde Tatsache maßgebend war, daß Versuche mit den

starken Störungen durch Schüttelerscheinungen unterworfenen 1—E—1-Lokomotiven der Lötschbergbahn die einwandfreie Arbeitsweise dieser Anordnung bewiesen haben. Wenn auch diese Tatsache mitbestimmend gewesen sein mag, so zeigt

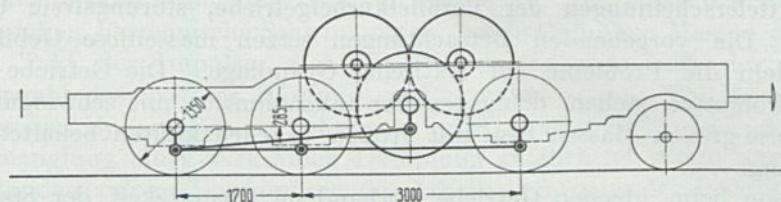


Abb. 288. Gestell der Lokomotive mit Schrägstangenantrieb.

eine Nachrechnung dieses Getriebes, daß die aus konstruktiven Gründen nötige Überhöhung der Vorgelegewelle der Motoren von etwa 285 mm mit der Schlitzkuppelstange oder schief liegender Treibstange (Abb. 288) nicht einwandfrei zu beherrschen war.

Nachdem die Blindwellenlager pendelnd und in der Stangenrichtung gefedert aufgehängt sind, stellt diese Anordnung einen Versuch der Auflösung des starren Schlusses der kinematischen Kette des Getriebes dar. Für ruhigen Lauf dieses Getriebes dürfte mitbestimmend sein, daß die eine der gekuppelten Kurbelwellen massenfrei ist und die im Schlitz angreifende Kurbelwelle durch die Radreibung wirksam gedämpft ist.

Von B.B.C. ist eine Auflösung des Kuppelrahmens in einen Zweistangenantrieb mit Kulisse für den Kuppelzapfen der Treibachse ausgeführt worden (Wiesental-, Rhätische Bahn), wodurch ein Getriebe entsteht, das im Gegensatz zu den bisher behandelten Blindwellen- und Kuppelrahmenantrieben ein statisch bestimmtes System darstellt; zugleich ist auch der starre Schluß der Verbindung zwischen den beiden Motoren aufgelöst.

Bei Abarten dieser Anordnung treten an Stelle der Kulisse Gelenke (1—D—1-Lokomotive Nr. 302 der Rhätischen Bahn) oder die Kulisse wird in eine Stange gelegt und trägt nur einen kurzen Blindzapfen (1—D—1-Lokomotive der Simplonbahn, Abb. 5.9).

Beim Zweistangenantrieb mit Schlitz können die vom Kuppelzapfen bzw. den etwa angelenkten Kuppelstangen ausgeübten Kräfte nur wagerecht gerichtet sein; das widerstehende Moment des Fahrzeuges muß daher die beiden wagerechten Kräfte ebenso wie beim Kuppelrahmen aufheben. Ein Unterschied besteht hier insoferne, als eine zwischen beiden Anordnungen wagerechte Verbindung zwischen den treibenden Kurbeln fehlt. Den wohl ausschließlich in Betracht kommenden Fall einer symmetrischen Stangenordnung ins Auge fassend, ist zunächst festzustellen, daß ein Gleichgewicht nur dann bestehen kann, wenn die Mittelkraft der beiden Stangenkräfte wagerecht gerichtet und gleichgroß der Kuppelstangenkräften Q_1 bzw. Q_2 ist. Die beiden Stangenkräfte müssen daher stets gleichgroß und entgegengesetzt gerichtet sein, also die eine jeweils auf Zug beansprucht sein, wenn die andere gedrückt ist. Die Stangenkräfte haben daher nicht immer den Richtungssinn, welcher für die Erzeugung eines Nutzdrehmomentes erforderlich ist. Es gibt Stellungen, in welchen die Stangen gegeneinander arbeiten.

Die Untersuchung des Kräfteplanes führt zu dem Ergebnis, daß die Zapfendrücke bei gleichgroßer Arbeitsleistung beider Triebmaschinen — dieselben geometrischen Verhältnisse vorausgesetzt — beim Zweistangen- und Kuppelrahmen-

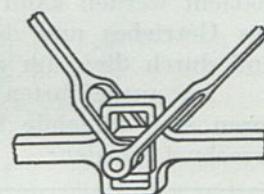


Abb. 289. Kulisse für Zweistangenantrieb ohne Blindwelle, Bauart B.B.C.

antrieb übereinstimmen. Mit abnehmender Leistung eines Motors nimmt beim Kuppelrahmen der betreffende Zapfendruck ab, beim Zweistangengetriebe bleiben die Lagerdrücke einander immer gleich.

7. Schüttelerscheinungen der Parallelkurbelgetriebe, störungsfreie Getriebeanordnungen. Die vorgehenden Betrachtungen setzen massenlose Gebilde voraus und behandeln die Probleme auf statischer Grundlage. Die Getriebe der elektrischen Lokomotive stehen demgegenüber ausnahmslos mit schwingungsfähigen, vergleichsweise großen Massen bzw. mit großen Trägheitskräften behafteten Massen in Verbindung.

Die schon beim ideellen Getriebe vorhandene Unstetigkeit der Stangenkräfte löst Massenwirkungen aus, die ihrerseits den Verlauf des auf statischer Grundlage ermittelten Kräftespieles abändern. Mitbestimmend in diesem Belange sind die bei der Herstellung der Getriebe unvermeidlichen Stichmaßfehler, Abweichungen in den Kurbel-Längen und -Stellungen, schließlich insbesondere die vorhandenen oder im Betriebe entstandenen Lagerspiele.

Der ursprünglich stetige Umlauf der Triebmaschine überträgt sich daher auch im ideellen elastischen Getriebe nicht mehr ungestört auf die getriebene Masse und wenn diese im Vergleich zur Masse der Triebmaschine unendlich groß gedacht werden kann — z. B. die Masse der Lokomotive — werden die Bestandteile des Getriebes und der Triebmaschine den störenden Rückwirkungen unterworfen und durch diese im gleichmäßigen Umlauf gestört werden.

An ausgeführten Lokomotiven und zwar meist an Maschinen mit zwei Motoren sind folgende kritische Geschwindigkeiten nach Kummer beobachtet bzw. errechnet worden:

Bahnanlage	Lokomotive	Achsenfolge	Getriebe	$v_e/km/h$	$v_k/km/h$	μ
Valtellinabahn . . .	Reihe 38 (1906)	1—C—1	Abb. 485	256	64	4
Milano-Varese . . .	" 37 (1912)	1—C—1	" 488	312	78	4
Lötschberg . . .	" 130 (1913)	1—E—1	" 281	164	41	4
Schles. Gebirgsbahn	E.P. 235 (1917)	2—D—1	" 276	80	40	2

Hier bedeutet v_e die der Eigenfrequenz der umlaufenden Massen entsprechende Fahrgeschwindigkeit, v_k die die Schüttelerscheinungen zeigende Geschwindigkeit und μ einen Modul, welcher ausdrückt, welches Vielfache die Eigenfrequenz von der kritischen Geschwindigkeit bildet.

Um die durch das Kräftespiel im Kurbelgetriebe verursachte Verformung und die Bewegungsvorgänge physikalisch erfassen zu können, muß man die übliche Vorstellung, daß es sich um ein starres System handelt, aufgeben, weil das Entstehen von

Relativbewegungen der gekoppelten Massen nur unter Voraussetzung elastischer Verformungen möglich und verständlich wird.

In dem von K. E. Müller für ein zweimotoriges Getriebe angegebenem Schema (Abb. 290) sind die der elastischen Verformung unterliegenden Bestandteile des Getriebes durch Federn angedeutet. Aus diesem Schema

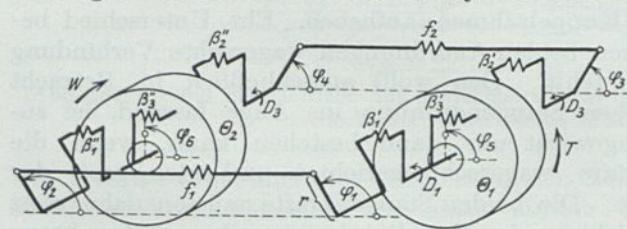


Abb. 290. Schema der Federungen in einem Parallelkurbelgetriebe.

wird es offenkundig, daß sich die Federn unter Einwirkung der periodisch wechselnden Stangenkräfte verformen und daß die auf beiden Getriebeseiten während des Umlaufes im allgemeinen nicht gleichgroßen Kräfte, die die Verformung der elastischen

Getriebeteile verursachen sich nur auf dem Wege über die umlaufenden Massen ausgleichen können. Zufolge des periodischen Wechsels dieser Impulse erzeugen letztere Schwingungen der umlaufenden Massen, die sich dem mit einer mittleren Winkelgeschwindigkeit erfolgenden Umlauf überlagern. Im dauernd kraftschlüssigen System entstehen harmonische Schwingungen der beeinflußten Massen und tritt bei geeignetem Takt der Impulse, d. i. die Übereinstimmung mit der natürlichen Schwingungszahl des Systems Häufung — Resonanz — ein. Bei Resonanz treten im geschlossenen System Beanspruchungen unbestimmter Größe auf, die insbesondere in Ermanglung einer wirksamen Dämpfung gefährliche Werte annehmen und unter Umständen zufolge Erschöpfung des Arbeitsvermögens der beanspruchten Bestandteile zum Bruche führen können.

Diese umständlichen Erscheinungen werden durchsichtiger, wenn man die Bewegungsvorgänge und das Kräftespiel des Kurbelgetriebes durch ein Modell mit

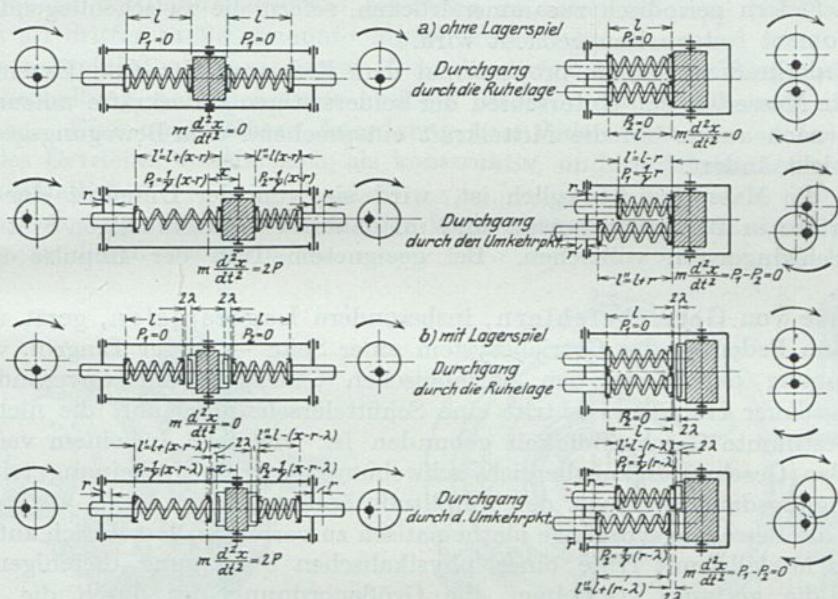


Abb. 291. Schema eines Schüttelmodells.

geradliniger Bewegung rekonstruiert. In dem in Abb. 291 dargestellten Schüttelmodell entspricht dem umlaufenden Ankerkörper die geradlinig in der Führung reibungslos bewegliche Masse m , die zweite Masse sei ∞ groß, so daß sie keinerlei Beeinflussung unterliegt.

Das einmotorige Fahrzeug mit Parallelkurbelgetriebe und Blindwelle bildet ein Beispiel für diesen Grenzfall. Es sei schon hier bemerkt, daß bei derartigen Maschinen Schüttelerscheinungen in bedenklichem Maße nicht aufgetreten sind, in der Hauptsache wohl deshalb, weil die Reibung am Radumfang der Stangenkraft eine Grenze setzt.

In eine zweite Gruppe gehören Triebfahrzeuge, bei welchen zwei Motoren durch Kuppelrahmen oder Blindwellen miteinander in starrer Verbindung stehen.

Daß im (elektrisch oder mechanisch) ungedämpften zweimotorigen Getriebe Schüttelschwingungen entstehen müssen, beweist die mit den Lokomotiven der Reihe 38 der italienischen Staatsbahnen gemachte Erfahrung. Diese Drehstrommaschinen sind mit zwei Motoren verschiedener Drehzahl ausgerüstet; die Maschinen haben drei Geschwindigkeiten: für zwei arbeitet je ein Motor allein, für die dritte sind zwei Motoren in Kaskade geschaltet. In letzterer Schaltung liefern

die Lokomotiven einwandfrei, sie waren dagegen heftigen Schüttelschwingungen unterworfen, sobald nur ein Motor unter Strom stand und der zweite stromlos mitgeschleppt wurde. D. h. sobald die kräftig dämpfende Wirkung des Drehstrommotors fehlte, konnten sich die Schüttelerscheinungen frei entwickeln. Mittelbar war somit die Stromart, richtiger die Beschaffenheit der Eigencharakteristik des Motors entscheidend für die Zulässigkeit gewisser Getriebeanordnungen.

Im Schüttelmodell (Abb. 291, links) sind die beiderseitigen elastischen Kurbel- und Stangensysteme durch die beiden gewichtslos gedachten Federn dargestellt. Das Kräftespiel des Kurbelgetriebes ist durch Zerlegen einer stetigen Umfangskraft in zwei periodisch wechselnde Kräfte und Wiedervereinigung derselben in der angetriebenen Welle zu einer stetigen Umfangskraft gekennzeichnet.

Im Modell wird dieser Vorgang durch die beiden synchron umlaufend gedachten, um 180° versetzt angeordneten Exzenter nachgeahmt, die durch ihren Umlauf die beiden Federn periodisch zusammendrücken, sofern die zwischenliegende Masse für den Moment festgehalten gedacht wird.

Die Federkraft ist jeweils proportional dem Federweg, der dem Exzenter entspricht. Die Masse hat den Unterschied der beiderseitigen Federkräfte aufzunehmen, wobei sich nach außen hin die Mittelkraft entsprechend dem Bewegungsgesetz der Exzenter nicht ändert.

Wenn die Masse frei beweglich ist, wird sie von der Differenz der beiderseitigen Kräfte in Bewegung gesetzt und im dauernd kraftschlüssigen System harmonische Schwingungen vollziehen. Bei geeignetem Takt der Impulse tritt Resonanz ein.

Im Falle von Getriebefehlern, insbesondere Lagerspielen, gerät wechselweise je eine Feder — das Getriebesystem einer Seite — außer Eingriff, wodurch die Schwingung der Masse den harmonischen Charakter mit unveränderlicher Schwingungsdauer einbüßt. Es tritt eine Schüttelerscheinung auf, die nicht mehr an eine bestimmte Geschwindigkeit gebunden ist, vielmehr in einem vergleichsweise großen Geschwindigkeitsbereich schwebungsartig in Erscheinung tritt, weil die Schwingungsdauer sich mit der Amplitude ändert.

Ohne die Bewegungsvorgänge mathematisch zu verfolgen, lassen sich auf Grundlage dieses Modells mit Hilfe einer physikalischen Überlegung diejenigen Mittel feststellen, die geeignet erscheinen, die Größenordnung der durch die Massenschwingung verursachten Beanspruchungen herabzusetzen und die Schwingungszahl in einem jeweils zweckmäßig erscheinenden Sinn zu beeinflussen.

Die Größe der Impulse wächst mit der Amplitude der Verformung der Feder, indem auch für das wirkliche Getriebe Beanspruchungen unter der Proportionalitätsgrenze vorausgesetzt sind. Im Versuchsmodell entspricht die Steigerung der Impulse einer Vergrößerung der Exzentrizität.

In absolutem Sinne unterliegt die Masse stets der vollen Schwankung der Federkraft zwischen dem positiven und negativen Höchstwert jeder Stangenkraft, ein für das übliche Kurbelgetriebe kennzeichnender Umstand.

Denkt man sich die Masse aus dem Modell entfernt und die Federn selbst massenfrei, entsteht durch die beiden Exzenter überhaupt keine Verformung, somit auch keine Änderung der Federspannung. Hieraus folgt, daß die Masse zu folge ihres Trägheitswiderstandes eine Ursache der Steigerung der Stangenkräfte bildet.

Wenn dagegen der Nachgiebigkeitsgrad der Federn gesteigert wird, entspricht einer bestimmten Amplitude des Exzenterspiels eine vergleichsweise geringere Federkraft bzw. ein geringerer Unterschied der beiderseits der Masse wirkenden Kräfte, daher wird die Masse dem Federspiel nur bei vergleichsweise kleinen Drehzahlen folgen können.

Auf Grund dieser physikalischen Betrachtungen ergibt sich, daß

1. bei der üblichen Getriebeanordnung — je ein Kurbelsystem beiderseits des Ankerkörpers — nicht zu vermeiden ist, daß als Impuls die gesamte Änderung der Stangenkraft während der ganzen Dauer des Umlaufes in Erscheinung tritt;
2. die Steigerung der Stangenkraft durch Verringerung der schwingenden Masse vermindert werden kann;
3. schließlich die Erhöhung des Nachgiebigkeitsgrades die natürliche Schwingungszahl des Systems herabsetzt.

Die an erster und zweiter Stelle genannten Eigenschaften haften dem gebräuchlichen Kurbelgetriebe elektrischer Maschinen grundsätzlich an. Insbesondere ist es unmöglich, die vorhandenen Massen zu verringern, weil die Leistung elektrischer Maschinen an bestimmte Gewichte gebunden ist. Man hat sich damit abgefunden, nur das an dritter Stelle genannte Mittel anzuwenden.

Die ausgeführten Anordnungen lösen die Aufgabe in der Weise, daß sie durch Zwischenschaltung vergleichsweise weicher Federn, die Impulse von den Massen fernhalten. Eine unmittelbare Anordnung von Federungen in der kinematischen Kette des Getriebes erweist sich als konstruktiv undurchführbar oder zumindest sehr umständlich.

Die Federung läßt sich konstruktiv ungezwungen mit den Zahnrädern verbinden bzw. in diesen unterbringen.

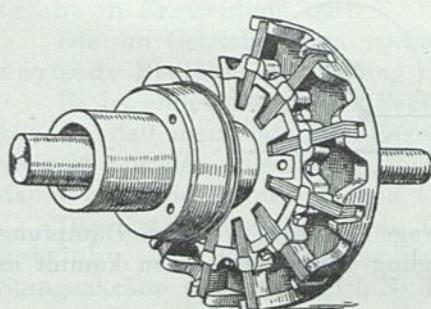


Abb. 292. Elastische Kupplung einer Versuchslokomotive mit Blindwelle und Parallelkurbelgetriebe der G.E.C.

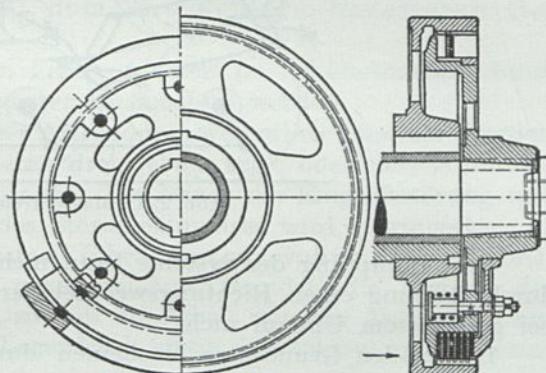


Abb. 293. Rutschkupplung für 350 PS.

Die Einschaltung von elastischen Kupplungen (Abb. 292) in das Getriebe, gefederte Lagerung der Wellen erscheinen daher die wissenschaftlich begründeten und in der praktischen Ausführung bewährten Behelfe zur Vermeidung der Gefahren der Schüttelschwingungen, wobei für tunlich großes Arbeitsvermögen und möglichst gute Dämpfung Vorsorge zu treffen ist.

Zu letzterem Zwecke eignet sich die im Getriebe von elektrischen Zahnradlokomotiven seit etwa zwanzig Jahren gut bewährte Rutschkupplung (Abb. 293), die im Bedarfsfall mit einer Federkupplung verbunden werden kann.

Die Auflösung des starren Schlusses der kinematischen Kette des Kurbelgetriebes erweist sich insofern als zweckdienliche Maßregel, als auf diesem Wege den Stangenkräften und damit der Größe der Impulse eine bestimmte Grenze gesetzt erscheint.

Der Zweistangenantrieb ohne Blindwelle ist auch vom letzteren Standpunkt bemerkenswert. Bei dieser Anordnung ist der starre Schluß zwischen den beiden Getriebeseiten aufgelöst. Nachdem außerdem jeder Schwingung ein Spiel des Zapfens

in der Kulisse entspricht, ist durch die Seitenreibung des Steines in den Führungen eine wirksame Dämpfung erzielt.

Die eigene Elastizität des Kurbelgetriebes wird im allgemeinen vergleichsweise sehr klein sein; dieser Fall entspricht im Modell sehr kräftigen Federn. Wenn weiters auch die umlaufende Masse vergleichsweise klein ist, wird der stetige Ausgleich der Federnkräfte nicht gehindert werden. Diese Lösung entspricht einem praktisch starren Getriebe und kommt für Getriebe in Betracht, die dauernd in gutem Zustand gehalten werden können, so daß auch Lagerspiele keine Störungsquellen darstellen können.

Die Auflösung der geschlossenen kinematischen Kette des Kurbelgetriebes ist von der M.F.O. bei den 1—C+C—1-Lokomotiven Reihe 12251, Abb. 287, der S.B.B. mit Erfolg versucht worden; die hier vorgesehene federnde Lagerung der Blindwelle ist gleichwertig einer in die Stangen gelegten Federung.

Gründlich kann die Quelle der Schüttelerscheinungen dadurch behoben werden, daß man Anordnungen trifft, bei welchen die den wechselnden Stangenkräften entsprechende Verformung sich dauernd ausgleichen kann, ohne den Weg über die Masse machen zu müssen, und dadurch, daß die Massen aus dem Getriebe entfernt werden.

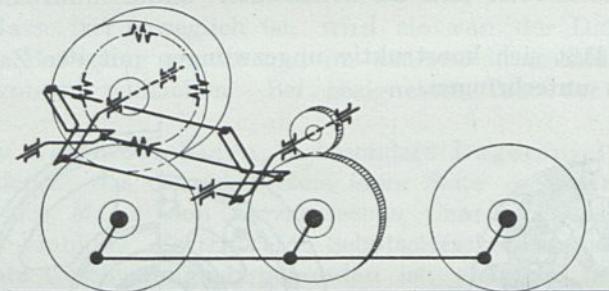


Abb. 294. Massenfreies Kurbelgetriebe.

Eine Dämpfung des Systems kann nicht in Frage kommen, weil eine Dämpfung durch Reibung einen Richtungswechsel der Bewegung voraussetzt; dazu kommt es bei gerichtetem Umlauf nicht.

Die beiden Grundsätze erscheinen durch das Schüttelmodell, Abb. 291 rechts, verwirklicht. Die einerseits der Masse angeordneten beiden Federn werden von den beiden Exzentern wechselweise gestreckt und zusammengedrückt. Die Mittelkraftsumme der beiden Federkräfte bleibt unverändert, die Masse m verharret in Ruhe, d.h. wenn zwar das Kräftespiel in den Federn mit den früheren Amplituden vor sich geht, gelangt keine Änderung der Kraftwirkung an die Masse.

Durch diese Anordnung ist beides erreicht; die Masse ist außerhalb des Getriebes und trifft diese auch kein Kraftwechsel, weil die Zerlegung und Wieder vereinigung der Umfangskraft sich innerhalb des Getriebes vollzieht.

Diesen Voraussetzungen entspricht ein aus zwei um 90° gegeneinander versetzten Systemen bestehendes, einseitig der Triebmaschine angeordnetes Kurbelgetriebe (Abb. 294).

Die Ankermasse ist außerhalb des Kurbelgetriebes; die vom Anker einseitig, stetig abfließende Arbeit wird wie bisher in den Stangen zwar zerlegt, sie tritt jedoch erst wieder, zu einem stetigen Drehmoment vereinigt, an der ange triebenen Welle in Erscheinung.

Das für das bisher gebräuchliche zweiseitige Kurbelgetriebe kennzeichnende Pendeln der vollen Leistung zwischen den beiden Getriebeseiten ist bei dieser Anordnung behoben, wodurch der ruhige Maschinenlauf gefördert wird.

Sind Getriebefehler oder Lagerspiele vorhanden, so lehrt das Schüttelmodell (rechts), Abb. 291, daß die Masse nicht in Ruhe verharrt. Während die eine Feder außer Eingriff ist, weicht die andere der Masse aus. Die Differenzwirkung der Federkräfte kommt bei dieser Anordnung nur im Bereich des Federspiels zur Geltung, wogegen bei der zweiseitigen Anordnung die

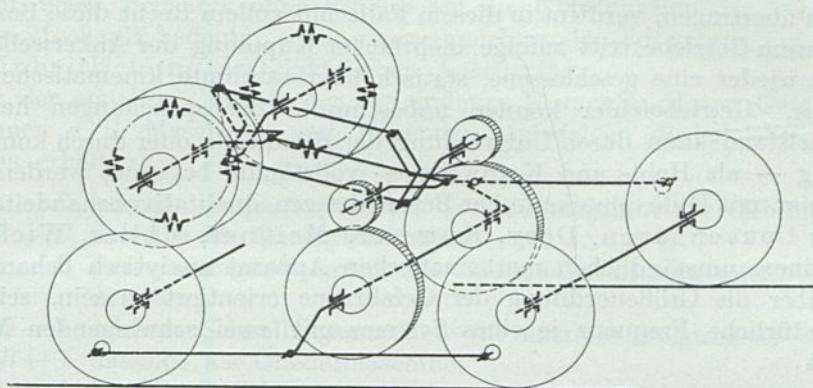


Abb. 295. Massenfreies Dreiphasengetriebe für zwei Triebmaschinen mit Zahnradvorgelege.

Differenzwirkung während des ganzen Umlaufes regelmäßig auch bei ideellem Getriebe oder gestört bei dem mit Fehlern behafteten Getriebe in Erscheinung tritt.

Die im Getriebe etwa vorhandenen Fehler können im Schüttelmodell durch unruhige Stellen am Umfang der Exzenter nachgeahmt werden.

Es ist einleuchtend, daß Fehler dieser Art dadurch wesentlich gemildert werden können, daß man statt zwei Exzenter deren drei, je um 120° , oder vier, je um 90° versetzt mit den zugehörigen Federn vorsieht. Die Dauer der Eingriffsstörung und damit auch die Amplitude und Größe des Störungsimpulses wird verringert.

Die Nutzanwendung dieses Grundsatzes führt zum dreiphasigen Kurbelgetriebe, Abb. 295, welches dadurch gekennzeichnet ist, daß die Summe der Stangenkräfte dauernd gleich Null wird, so daß die Arbeit von der Ankerwelle auf eine zweite parallele Kurbelwelle ohne Lagerdruck stetig übertragen werden kann. Ein Fall, der bekanntlich nur bei coaxial gekuppelten Wellen vorkommt.

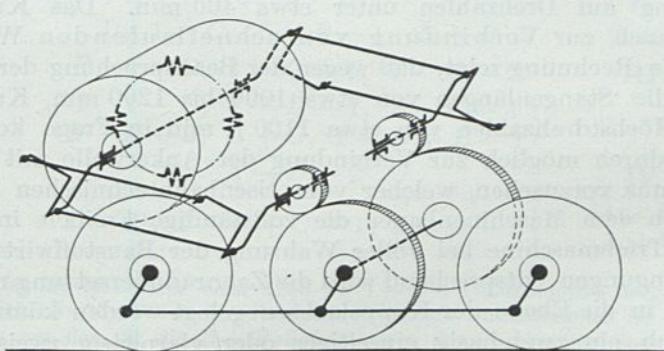


Abb. 296. Massenfreies Vierphasengetriebe mit Zahnradvorgelege, Bauart des Verfassers.

Bei Lokomotiven wird die seitliche, wie auch [die coaxiale Anordnung des Dreiphasengetriebes zwischen zwei Triebmaschinen wegen der Umständlichkeit der Konstruktionen auf bauliche Schwierigkeiten stoßen.

Praktisch aussichtsreich ist dagegen das Vierphasengetriebe (Abb. 296). Dieses entsteht, wenn das einseitig angeordnete aus Kurbel und um 90° versetzten Schleppkurbel bestehende System um 180° versetzt auf der anderen Seite wiederholt wird.

Bei diesem Getriebe fließt vom Anker je die halbe Leistung auf einer Getriebeseite stetig ab. Die mit dem Anker gekuppelte Blindwelle hat keinerlei Drehmoment zu übertragen, verdient in diesem Falle mit vollem Recht diese Bezeichnung.

In diesem Getriebe tritt zufolge mehrfacher Kupplung der Ankerwelle mit der Blindwelle wieder eine geschlossene, statisch überbestimmte kinematische Kette in Erscheinung. Getriebefehler können unbestimmte Beanspruchungen hervorrufen. Diesem Übelstand kann durch Unterteilung der Blindwelle oder durch konzentrische Ausführung — als Hohl- und Kernwelle — vollständig begegnet werden.

Das hier mit Hilfe physikalischer Betrachtungen qualitativ behandelte Problem wurde von Couvenhoven, Döry, Kummer, Meißner, Müller, Wichert zum Teil mit einem umständlichen mathematischen Apparat analytisch behandelt.

Um über die Größenordnung der Gefahrzone orientiert zu sein, sei erinnert, daß die natürliche Frequenz je eines Systems mit zwei schwingenden Massen m_1 und m_2 ist

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{\gamma m_1 m_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}{\gamma}},$$

wo γ den Nachgiebigkeitsgrad des Systems bedeutet.

Für $m_2 = 0$ und $m_1 = m$ wird

$$\nu = \frac{0,5}{\pi \sqrt{m \gamma}}$$

und für $m_1 = m_2 = m$

$$\nu = \frac{0,707}{\pi \sqrt{m \gamma}}.$$

8. Konstruktive Vorteile der massenfreien Kurbelgetriebe. Vereinheitlichung der Triebmaschinen. Die Anwendung des Kurbelgetriebes blieb in Hinblick auf die Schüttelerscheinungen bei elektrischen Lokomotiven mit Recht auf Anordnungen mit vergleichsweise niedrigen Drehungszahlen beschränkt.

Durch die Befreiung des Kurbelgetriebes von den Massenwirkungen entfällt die Beschränkung auf Drehzahlen unter etwa 400/min. Das Kurbelgetriebe kann demnach auch zur Verbindung von schnelllaufenden Wellen Verwendung finden. Die Rechnung zeigt, daß wegen der Beanspruchung der Stangen durch die Fliehkraft die Stangenlängen von etwa 1000 bis 1200 mm, Kurbelradien von etwa 200 mm, Höchstdrehzahlen von etwa 1100 je min in Frage kommen können.

Es wird dadurch möglich zur Verbindung der Ankerwelle mit dem Laufwerk einen Mechanismus vorzusehen, welcher vom eisenbahntechnischen Standpunkt befriedigt und auch dem Maschinenbauer die vollständige Freiheit in der günstigen Bemessung der Triebmaschine bei voller Wahrung der Baustoffwirtschaft beläßt.

Diesen Bedingungen entsprechend wird die Zahnradübersetzung nicht fehlen und die Vorlegewelle in die Ebene der Kuppelachsen gelegt werden können. Die Ritzelwelle wird durch ein zweiphasig einseitiges oder vierphasig zweiseitiges Kurbelgetriebe mit der Ankerwelle gekuppelt.

Die Triebmaschine erhält auf diese Art eine hohe Schwerpunktslage; sie wird allseitig bequem zugänglich.

Ein wesentlicher Vorteil der vollständigen Befreiung der Motorbemessung vom Zwang der Geometrie der Zahnradübersetzung und den aus eisenbahn-

technischen Gründen zu wählenden Triebbraddurchmesser ist erreicht und hat zur Folge, daß lediglich das Gewicht der Lokomotive die Leistung und Bezeichnung der Triebmaschine beeinflußt. Einem bestimmten Lokomotivgewicht entsprechen mehrere Achsanordnungen, demnach in weiten Grenzen veränderliche Verkehrsaufgaben derselben Leitung, die in allen Fällen mit derselben motorischen Einrichtung bewältigt werden können, weil Laufwerk und Fahrgeschwindigkeit bei dieser Mechanik ohne Einfluß auf die Konstruktion der Triebmaschine sind. Diese Mechanik bedeutet somit einen aussichtsvollen Fortschritt auf dem Wege der Vereinheitlichung der elektrischen Ausrüstung.

Dank der erzielten Freiheit der verbundenen Elemente: Motor, Getriebe, Laufwerk können z. B. Maschinen mit folgenden Achsfolgen die gleiche elektrische Ausrüstung erhalten:

- F langsam laufende schwere Güterzugmaschine für Gebirgsstrecken;
- $C - C$ dasselbe als Gliedermaschine;
- $1 - E$ Personenzugslokomotive für mäßige Geschwindigkeiten auf Gebirgsstrecken;
- $1 - D - 1$ schwere Schnellzugsmaschine für mittlere Steigungen;
- $1 - B + B - 1$ dasselbe als Gliedermaschine;
- $2 - C - 1$ und $2 - B - 2$ Schnellzugsmaschinen für ebenes Gelände für hohe und höchste Geschwindigkeiten.

Eine gegebene elektrische Ausrüstung umfaßt den ganzen Geschwindigkeitsbereich des Eisenbahnbetriebes. Dieselben Bestandteile in der halben Anzahl eignen sich auch für Maschinen mit der Achsfolge $1 - B$ und C . Letzteres Schema kommt für den leichteren Verschiebedienst in Frage; ein extremer Fall gegenüber den übrigen ausgeführten Aufgaben.

Ebenso wird ein zweiter Typ für fünfachsige Maschinen mit den Achsanordnungen E , $1 - B$, $1 - C - 1$ und $2 - B - 1$ ausreichen.

Die praktisch in Betracht kommenden Achsfolgen zusammengefaßt, kann festgestellt werden, daß für ein Bahnsystem mit einem bestimmten Achsdruck mit stets konstruktiv einwandfrei ausgelegten und geeigneten vier, äußerst fünf Motorgrößen für alle erdenklichen Aufgaben das Auslangen gefunden werden kann:

Achszahl, Leistungsgröße	Achsfolge	Motortyp
2	B	I
3	$C, 1 - B$	II
4	$D, 1 - C, 1 - B - 1, B + B$	$2 \times I$
5	$E, 1 - D, 1 - C - 1, 1 - B - 2$	III
6	$\{ F, 1 - E, 1 - D - 1, 2 - C - 1 \}$ $\{ 2 - B - 2, C + C, 1 - B + B - 1 \}$	$2 \times II$
7	$1 - D - 2$	IV
8	$D + D, 1 - C + C - 1, 2 - D - 2 \{$	$4 \times I$ $1 \times V$

In Abb. 494 ist die Maßskizze einer 1200-PS- $1 - C - 1$ -Lokomotive dargestellt. Von dieser Bauart befinden sich zwanzig Stück für die Österreichischen Bundesbahnen im Bau. Der Motor — elektrisch identisch mit den für die $B + B$ -Lokomotiven der Preußischen Staatsbahn verwendeten, läßt sich zufolge seines Durchmessers von 1420 mm und der verlangten Regelgeschwindigkeit von 42 km/h bei 540 U./min noch ohne Überhöhung der Blindwelle einbauen. Die Schlitzkuppelstange wurde hier entbehrlich.

Dieselbe Motorleistung genügt auch für eine Lokomotive mit der Achsfolge E , wobei die Geschwindigkeit auf $3/5$ und die Zugkraft am Radumfang auf $5/3$ zu steigern wäre oder auch für eine Achsfolge $1 - B - 2$ und 63 km/h Geschwindigkeit.

Die bezüglich der Geometrie der Zahnradübersetzung weiter oben angegebene Formel für diesen Motor, mit den konstruktiven Festwerten $a = 163 \text{ mm}$, $b = 165 \text{ mm}$, $h = 0$ angewendet, führt zu dem Ergebnis, daß für die *E*-Lokomotive Triebräder mit $D_t = 1871 \text{ mm}$ Durchmesser angewendet werden

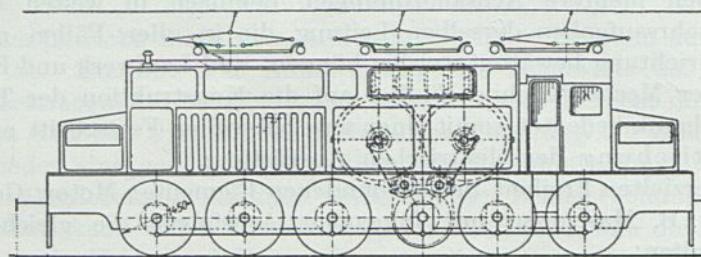


Abb. 297. Entwurf einer *E*-Lokomotive mit massenfreiem Getriebe.

müßten, um eine Überhöhung (h) der Blindwelle zu vermeiden. Die Übersetzung wäre $1:7,57$. Für eine langsamlaufende Güterzugsmaschine sind derartig große Raddurchmesser unerwünscht, die Übersetzung von $1:7,57$ für größere Leistungen ebenfalls nicht vorteilhaft. Beides kann unter Beibehaltung der Motortypen nur durch eine Überhöhung der Blindwelle umgangen werden. Für die für diese Bauart gebräuchlichen Raddurchmesser $D_t = 1450$ bzw. 1350 mm müßte die Überhöhung mit 186 bzw. 218 mm und die Übersetzung mit $1:5,87$ bzw. $1:5,03$ bemessen werden. Derartige Überhöhungen sind unzulässig. Nachdem weiterhin die Abmessungen der Triebmaschine nicht verringert werden können, zwingt die Geometrie der Zahnradübersetzung für die *E*-Lokomotive einen anderen Motortyp zu wählen bzw. die Lokomotivleistung statt auf zwei auf drei Motoreinheiten aufzuteilen, so wünschenswert es auch wäre, dieselbe elektrische Ausrüstung für alle fünfachsige Anordnungen ($1-C-1$, *E*, $1-D$, $1-B-2$) beizubehalten.

In Abb. 297 ist ein Entwurf für eine *E*-Lokomotive mit etwas langsamer laufenden Motoren dargestellt. Dank der Kurbelübertragung zwischen Anker- und Ritzelwelle ist es möglich, zweckmäßige Raddurchmesser ohne Überhöhung der Blindwelle anzuwenden. Dieselbe Anordnung ist auch für $1-D$, $1-C-1$ - und $1-B-2$ -Typen möglich.

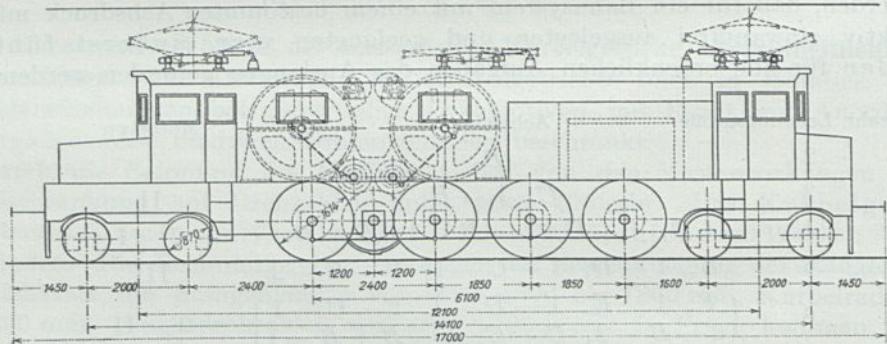


Abb. 298. Entwurf einer $2-D-2$ -Lokomotive mit massenfreiem Getriebe.

Abb. 298 stellt den Entwurf für eine $2-D-2$ -Schnellzugslokomotive dar. Bemerkenswert für diese Bauart ist der günstige Gesamtachsstand bzw. die Lokomotivlänge, die sich wenig von denjenigen von Dampflokomotiven der gleichen Achszahl und Achsanordnung unterscheidet.

Will man das schnellaufende Getriebe der hier besprochenen Anordnung vermeiden, kann das hier gestellte konstruktive Ziel auch in der Weise erreicht werden, daß man die Ritzel auf den Ankerwellen beläßt und die langsamlaufende Vorgelegewelle über ein zweiphasiges Getriebe mit der Blindwelle verbindet. Zwecks Aufschluß der kinematischen Kette ist die Vorgelegewelle als Hohl- und Kernwelle auszuführen. Diese Anordnung wird im Gewicht etwas schwerer und führt zu kon-

struktiv ungünstigen Anordnungen; sie hat jedoch den Vorteil für sich, daß keinerlei neuartige Behelfe angewendet werden müssen.

Als Ergebnis der über die Getriebeanordnungen durchgeföhrten Betrachtungen können die wissenschaftlichen Grundsätze festgelegt werden, die nach dem heutigen Stande der Technik für den Entwurf zweckdienlicher Triebmaschinen und deren Getriebe zu beachten sind.

Der Einzelantrieb mit vielen kleinen Einheiten ist vom Standpunkt der Baustoffwirtschaft unvorteilhaft, andererseits unterliegt diese Bauart den durch die Geometrie der Zahnübersetzung bedingten Einschränkungen am meisten. Hochgetriebene Beanspruchungen und unbefriedigende Zugänglichkeit der eine Wartung benötigenden Bestandteile sind die weiteren Folgen. Vom Betriebsstandpunkt unerwünscht ist die Beeinträchtigung der Reibungskraft der vorderen Achse durch die Hebelwirkung der Zugkraft am Haken, dann auch die Tieflage des Schwerpunktes bei zum Teil ungefederter Belastung der Achsen.

Dagegen steht der Vorteil, daß die Verbindung mit den Treibachsen durch rein umlaufende Organe bewirkt werden kann, so daß keinerlei störende Bewegungen des Fahrzeuges zu gewärtigen sind.

Der Gestellmotor verlangt stets ein besonderes Getriebe zur Kraftübertragung von der Triebmaschine zur Treibachse. Zu diesem Zweck wurden bislang vielfach Anordnungen des Parallelkurbelgetriebes herangezogen, die, wie gezeigt wurde, von

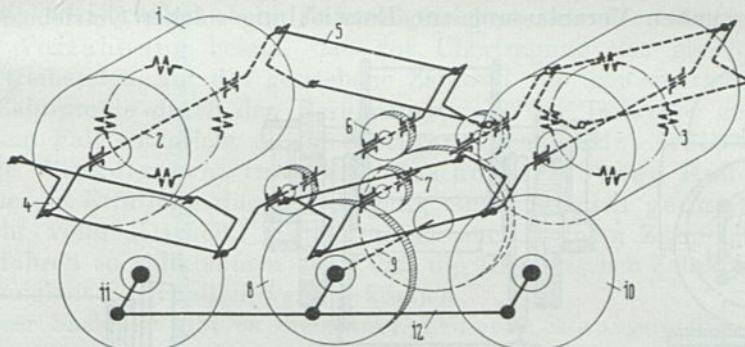


Abb. 300. Massenfreies Kurbelgetriebe für zwei Motoren mit gemeinsamen großen Zahnrädern.

störenden Bewegungen nicht frei sein konnten. Neuere Ausführungen, die von derartigen Mängeln befreit sind, können insofern nicht befriedigen, als sie zu diesem Behufe die durch den Gestellmotor erreichbaren Vorteile: Hochlage der Triebmaschine, bequeme Bedienbarkeit derselben, freie Formgebung, nicht zu hoch getriebene Beanspruchungen preisgegeben haben.

Ein vom elektrotechnisch-konstruktiven, fahrzeugtechnischen und bahnbetriebs-technischen Standpunkt in gleicher Weise befriedigender Entwurf sollte demnach folgende Bedingungen erfüllen.

Eine einmotorige Lösung wird wegen der ungünstigeren Anlage der Geschwindigkeitsregelung nur bei vergleichsweise kleinen Leistungen etwa 500 PS namentlich bei schmalspurigen Lokomotiven mit Vorteil vorzusehen sein. In diesem Fall wird es genügen, daß aus zwei um 90° versetzten Kurbelsystemen bestehende Parallelkurbelgetriebe überhaupt nur einseitig also massenfrei zur Verbindung mit der der Ankerdrehzahl laufenden Ritzelwelle anzuordnen.

Für mäßige Leistungen und zweimotorige Fahrzeuge kann diese Anordnung beibehalten werden, wobei für jede Triebmaschine je eine Ritzelwelle, jedoch eine

gemeinsame Treibwelle mit großem Zahnrad vorzusehen sein wird. Zur Fernhaltung äußerer Stoßwirkungen vom Getriebe wird das große Zahnrad oder der Achsenkörper, unter Umständen beide Federkupplungen erhalten. Gestattet es der Raum, sind die Federkupplungen am zweckmäßigsten auf den Ritzelwellen anzubringen, weil auf diese Art jede Möglichkeit, daß die beiden Ankerkörper gegeneinander schwingen, ausgeschlossen wird (Abb. 300).

Der Grundsatz, die Lokomotivleistung auf zwei Motoreinheiten aufzuteilen, lässt sich bis zu Leistungen von etwa 2500 PS festhalten. Einer weiteren Steigerung der Gesamtleistung stehen vom elektrischen Standpunkt keine Hindernisse im Wege, auch könnte das Getriebe für wesentlich größere Leistungen ausgeführt werden, doch verlangt die Befahrung scharfer Krümmungen eine Gliederung des Gestelles, wenn die Länge größer als 18 bis 20 m wird.

Da je Meter Lokomotivlänge sich Leistungen von 100 bis 140 PS/h unterbringen lassen, bildet die oben genannte Leistung die praktische Grenze für ein zweimotoriges Gestell.

Die beiden Triebmaschinen werden hintereinander angeordnet mit doppelten und symmetrischen Parallelkurbelgetrieben zur Verbindung mit der unterbrochenen Ritzelwelle ausgerüstet. Die Federung im Ankerkörper wird nicht fehlen, außerdem auch in den großen Zahnräden vorgesehen werden. Die Vorgelegewelle befindet sich in gleicher Höhe mit den Kuppelachsen, mit welchen eine einseitige Triebstange die Kraftübertragung bewirkt.

9. Der Gestellmotor für Einzelbetrieb. Die besprochenen Gefahren des Parallelkurbelgetriebes gaben Veranlassung zur Entwicklung solcher Getriebeanordnungen,

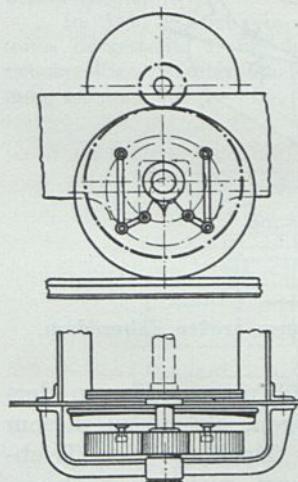


Abb. 301. Treibstangenkupplung für Gestellmotoren mit Einzelantrieb. Bauart B.B.C.

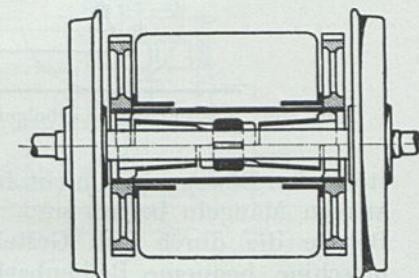
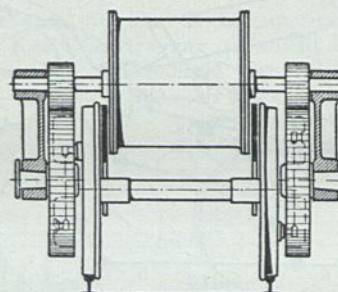


Abb. 302. Elastische Hohlachsen-Kupplung Bauart S.S.W.

die beim Gestellmotor die Anwendung umlaufender Übertragungsmittel mit stetiger Kraftübertragung ermöglichen. Die diesbezüglichen Bestrebungen führten unter einem zum Einzelantrieb.

In diese Gruppe gehört der von B.B.C. (Abb. 301) entwickelte Einzelantrieb, der sich, soweit die Verbindung zwischen großem Zahnrad und Treibachse in Betracht kommt, an die von Ganz & Co. für die erste Reihe der Triebfahrzeuge der Valtellina-Bahn ausgeführten Gelenkkupplung anlehnt. Als ein Vorteil dieser Bauart ist die Ausnutzung der vollen Spurweite für die Triebmaschine anzuführen. Ähnliche Ziele verfolgt das Tschanzgetriebe (Abb. 234), das neben Freihaltung des Federspieles

der Treibachse auf eine elastische Verbindung zwischen Motor und Treibachse Wert legt.

Die Eigenfederung von Torsionswellen zieht eine den Siemens-Schuckert-Werken patentierte Anordnung vor (Abb. 302).

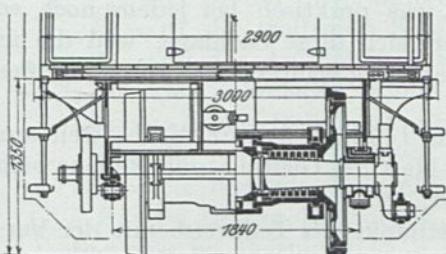


Abb. 303. Hohlachse Bauart Klien-Lindner.

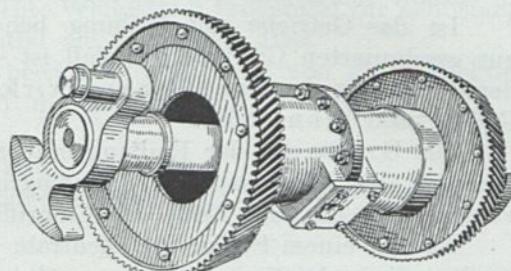


Abb. 304. Hohlachse Bauart Liechty.

Zu dem gleichen Zweck können die elastischen Aschantriebe von Klien-Lindner (Abb. 303) und Liechty (Abb. 304) herangezogen werden.

Sämtliche Anordnungen kommen darüber nicht hinweg, daß die einfache Zahnräuberübersetzung die freie Formgebung der Triebmaschine behindert, daher können die Vorteile der Gestellbauart nicht voll ausgenützt werden; oder man muß eine doppelte Zahnräuberübersetzung vorsehen.

10. Stetigkeitsstörungen beim Zahnradgetriebe. Das kinematische Grundgesetz der Verzahnung besagt, daß zur Übertragung des gleichmäßigen Umlaufes vom treibenden auf das getriebene Zahnrad die gemeinsame Normale der paarenden Zahnprofile durch den Berührungs punkt der Teilkreise gehen muß.

In diesem Fall entspricht einem stetigen Umlauf des treibenden Rades eine stetige Winkelgeschwindigkeit des angetriebenen Rades.

Über die zur Erfüllung dieser Bedingung einzu haltenden geometrischen Gesetze besteht volle Klarheit. Es unterliegt auch keinem Zweifel, daß die Erzeugungsverfahren so vollkommen sind, daß die theoretischen Zahnformen mit sehr großer Genauigkeit eingehalten werden können.

Bei dieser Sachlage gibt es theoretisch keinerlei Störungsquelle der Stetigkeit der Bewegungsübertragung. Es ist demnach vorweg als Widerspruch zu bezeichnen, daß in allen Lehrbüchern und Abhandlungen, trotzdem der Nachweis für die Stetigkeit der Bewegung paarerender Zahnräder erbracht wird, doch stets von Vorkehrungen gesprochen wird, die zur Erzielung des ruhigen Ganges insbesondere bei hoher Winkelgeschwindigkeit zweckmäßig sind.

Diese Auffassung steht mit der Praxis in Übereinstimmung, indem geräuschlos laufende Zahnräder die Ausnahme bilden. Insbesondere im Straßenbahnbetrieb ist man gewöhnt, brummende Zahnräder als unvermeidliches Übel in den Kauf zu nehmen. Wenn diese Sachlage inmitten des geräuschvollen Straßenverkehrs zwar geduldet werden kann, so ist doch zu bedenken, daß derartige Geräusche als der hörbare Ausdruck von Schwingungerscheinungen anzusehen sind, die ihrerseits ohne Arbeitsverbrauch nicht entstehen können.

Die Zahnradgeräusche treten bei Kompressoren von Vollbahnlokomotiven ganz besonders störend auf, indem sie hier das Erkennen des ordnungsgemäßen Zustandes der maschinellen Einrichtung und des Getriebes behindern. In einem ruhig laufenden Fahrzeug könnte der Fahrer durch sein durch den Fahrdienst nicht in Anspruch genommenes Gehör jede geringste Störung sofort wahrnehmen.

Es hat demnach mehrfaches Interesse, die Ursachen der Zahngeräusche, die Quelle der periodisch wechselnden Störungen der Stetigkeit der Kraftübertragung

zu erfassen und diejenigen Mittel zu suchen, die geeignet erscheinen, diesem Übel zu steuern.

Im reibungsfreien Getriebe entspricht der durch die richtige Verzahnung erzielten stetigen Bewegungsübertragung auch eine stetige Kraftübertragung; es entfällt somit jede Schwingungen erzeugende Ursache.

Ist das Getriebe mit Reibung behaftet — was praktisch bei jedem noch so gut geschmierten Getriebe der Fall ist —, ändert sich diese Sachlage, weil die in der Richtung der Zahnflanken wirkende Reibung während des Zahneingriffes Größe und Sinn ändert.

Die Größe der der Reibung entsprechenden Teilkraft ändert sich, weil aus Gründen der Kinematik des Zahneingriffes das Maß des Gleitens und Rollens sich vom Beginn bis zum Ende des Eingriffes ändert.

Nur in einem Punkte der Zentrale — Schnittpunkt der Teilkreise mit der Verbindungsline der Kreismitten — wälzen sich die Zahnprofile aneinander ab, gegen den Anfang des Eingriffes nimmt das Maß des Gleitens zu. Ebenso zwischen Teil- und Fußkreis, wenn auch nicht im solchen Maß. Das Gesetz der durch diese vermischt Bewegungsart verursachten Reibung ist nicht bekannt, soviel steht jedoch fest, daß der Widerstand der gleitenden Reibung ein Vielfaches desjenigen der

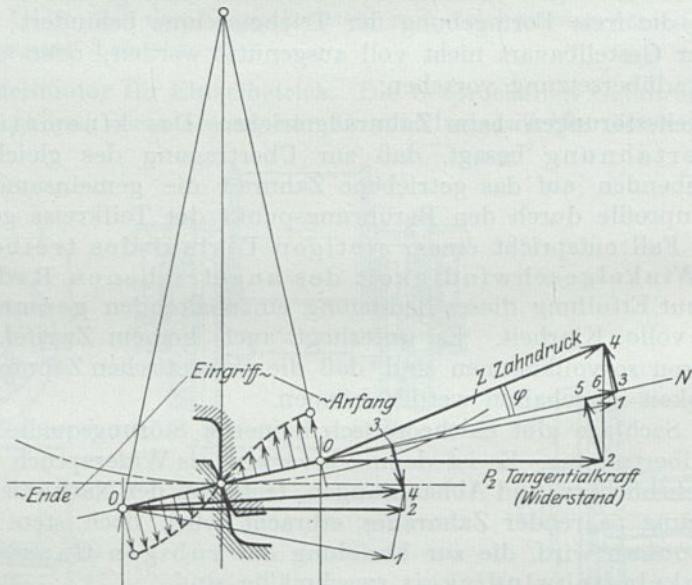


Abb. 299. Kräfteplan des Zahneingriffes.

rollenden Reibung beträgt. Zufolge der stetigen Änderung des reinen Wälzens im Zentralpunkt bis zum Überwiegen des Gleitens am Anfang und dem Ende des Eingriffes darf für die Änderung des Reibungswiderstandes eine stetige Kurve mit dem Nullpunkt in der Zentrale angenommen werden, wenn der Reibungswiderstand des Rollens praktisch Null gesetzt wird.

Aus Ursache der Richtungsänderung der gegenseitigen Bewegung der aufeinander gleitenden Zahnflanken, ändert sich auch der Sinn der Reibungskraft. Am Beginn des Eingriffes dringen die Zähne in die Lücken ein, die Reibung wirkt dieser Bewegung entgegen, es tritt die bekannte stemmende Wirkung ein, wogegen am Ende des Zahneingriffes das Entgegengesetzte der Fall ist. In der Zentrale findet keine Relativbewegung der berührenden Zahnflanken statt, die Wirkung der Reibung verschwindet.

Der Zusammenhang dieser Wirkungen läßt sich an Hand des Kräfteplanes zweier paarer Zahne übersehen (Abb. 299).

Der Einfachheit halber ist für das eine Zahnrad $R = \infty$ gesetzt, so daß der Fall einer Zahnstange vorliegt.

- $P_2 = 02$ ist der unveränderlich gedachte Widerstand tangential zur Zahnstange,
- $P_1 = 01$ die treibende Kraft tangential am treibenden Rad,
- 25 = die das Ausgleiten der Zahne bewirkende Teilkraft von P_2 in Richtung der Zahnflanke, somit \perp auf N die Eingriffslinie,
- 34 = μN die Reibungskraft,
- 05 = die normale Teilkraft von P_2 und
- 35 = die normale Teilkraft der radialen Komponente von P_2 ,
- $Z = 04$ ist der Zahndruck,
- $\operatorname{tg} \varphi = \mu$ im Beispiel 0,15.

Wenn $\mu = 0$ wird dem Verzahnungsgesetz entsprechend dauernd

$$P_1 = P_2;$$

die Kraftübertragung ist stetig.

Hat μ einen endlichen Wert, ändert sich während des Eingriffes Sinn und Größe der Reibungskraft. Die Richtung ist dauernd senkrecht auf die Eingriffsnormale. In jeder Stellung entspricht dieser Reibungskraft eine andere tangentielle und radiale Teilkraft. Die tangentielle Teilkraft wirkt am Anfang des Eingriffes dem stetigen Umlauf entgegen, am Ende im Sinne desselben. Das in Abb. 299 dargestellte Beispiel entspricht den Eingriffsverhältnissen einer Lamelle der Abtschen Zahnstange. Bei 15% Reibung verändert sich die Tangentialkraft um etwa $\pm 3\%$, was in einer entsprechenden Schwankung der Triebkraft zum Ausdruck kommt, wenn auch die Bestandteile des Antriebes diese der Mittelkraft überlagerte Schwingung dämpfen. Tatsächlich läßt die Stromkurve von Zahnradlokomotiven die der Verzahnung entsprechende Vibration erkennen. Es ist naheliegend, daß bei geeignetem Takt dieses schwingenden Kraftwechsels die Zahnräder Torsionsschwingungen der Wellen oder der Wellenstummel hervorrufen können.

Wesentlich sind auch die Wirkungen der periodisch wechselnden radialen Teilkraft der Zahnreibung. Diese verursacht Biegungsschwingungen der Achsstummel und bewirkt beim Vorhandensein von Lagerspielen, daß die durch Zahnräder gekuppelten Wellen auseinandergetrieben und dann zusammengezogen werden. Eine bedenklich vermehrte Zahnreibung und Ausschlagen der Lager muß die Folge dieser Erscheinungen sein.

Es fragt sich, welche konstruktive Mittel zur Verfügung stehen, um die beschriebene schädliche und störende Wirkung der Reibung der Zahnflanken zu vermeiden. Daß eine zuverlässige Schmiedung als erstes Gebot anzusehen ist bedarf keiner weiteren Erörterung.

Eine Zahnform mit vergleichsweise geringem Gleiten der paarenden Zahnflanken (Maag) wirkt im gleichen Sinn günstig. Allerdings ist dies nur durch Kürzung der Eingriffsdauer und schrägere Lage der Eingriffslinie zu erzielen.

Aus dem Kräfteplan geht ohne weiteres hervor, daß die Vergrößerung der Eingriffsdauer über die Länge der Teilung das Übel wirksam verringert, weil sich entgegengesetzt wirkenden Eingriffsbereiche überlagern und ihre Wirkungen aufheben.

Die bei Bahnmotoren im allgemeinen benötigten Zahnstärken und Übersetzungen setzen den diesbezüglichen Maßnahmen eine ziemlich enge Grenze.

Als Zuflucht bliebe die Schrägverzahnung, gegen die die beträchtliche achsiale Teilkraft des Zahndruckes spricht, die das vom Standpunkt der Kollektor-

abnutzung wünschenswerte achsiale Spiel behindert. In Amerika sollen diesbezügliche Versuche im Gange sein.

Ohne diesen Übelstand in Kauf nehmen und die Vorteile der gebräuchlichen groben Verzahnung preisgeben zu müssen, läßt sich dem Übel abhelfen, wenn man die Zahnkränze in der Radebene teilt und die Räder mit zwei um je eine halbe Teilung versetzten Zahnkränzen versieht. Die Wirkung dieser Maßnahmen steht außer Zweifel, wie die langjährigen Betriebserfahrungen mit der Abtschen Zahnstange, die diesen Grundsatz verwirklicht, beweisen. Das Vorbild dieser Zahnstange erscheint überzeugend, weil die Eingriffsverhältnisse der Zahnräder von Bahnmotoren sehr ähnlich sind. Es steht außer Frage, daß gefräste Zahnräder dieser Bauart nach den gebräuchlichen Abwälzverfahren ebenso gute wenn nicht bessere Ergebnisse zeitigen müssen, als nach einem speziellen Verfahren erzeugte und geschliffene Zahnräder, die zur Erreichung einer bestimmten Zahnform eine kürzere Eingriffsdauer in Kauf nehmen müssen.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, warum das lästige Brummen der Zahnräder insbesondere bei der Kurzschlußbremsung in Erscheinung tritt. Wie nachgewiesen, handelt es sich hier um eine Schwingungerscheinung, die bei Vorhandensein einer wirksamen Dämpfung verschwindet. Dieses ist der Fall während der Fahrt mit Strom. Die vergleichsweise große Stromquelle hält die Linienspannung fest und diese schickt den dämpfenden Strom in den Motor. In der Kurzschlußbremsung ist das Fahrzeug bzw. die bremsende Maschine sich selbst überlassen. Ihre geringe elektrische und mechanische Trägheit läßt jede Schwankung der Kraft ungestört in Erscheinung treten, wodurch die Sachlage aufgeklärt erscheint.

11. Grundsätzliche Einteilung der Getriebearten. Zusammenfassend können vom Standpunkt der räumlichen Anordnung Triebmaschinen und der Geometrie des Getriebes folgende Getriebearten unterschieden werden:

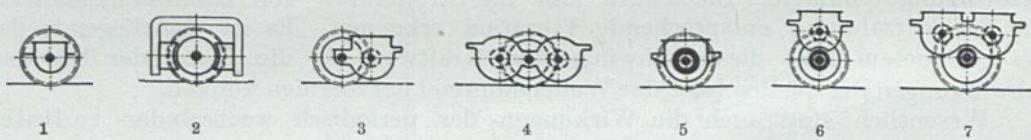


Abb. 305. Untergestellmotor-Bauformen.

A. Untergestellmotor.

a) Einzelantrieb. (Abb. 305).

1. Achsmotor fest auf der Treibachse.
2. Anker fest auf der Achse, Gehäuse gefedert.
3. Zahnradmotor, Pratzenlager.
4. Doppelmotor, Pratzenlager.
5. Achsmotor mit Hohlwelle, gefederte Mitnehmerkupplung.
6. Zahnradmotor mit Hohlwelle, Motor senkrecht über der Achse, elastische Mitnehmer.
7. Doppelmotor ober der Achse, gefederte Hohlwelle.

B. Gestellmotor.

b) Vielachsenantrieb, eine treibende (Motor- oder Vorgelege-) Welle. (Abb. 306).

1. Motor- bzw. Vorgelegewelle und getriebene Achsen, einebenig, geradlinige, gegliederte Kuppelstangen.
2. Wie vor, jedoch Schlitzkuppelstange.
3. Triebwelle überhöht, schiefe Schergabeln.

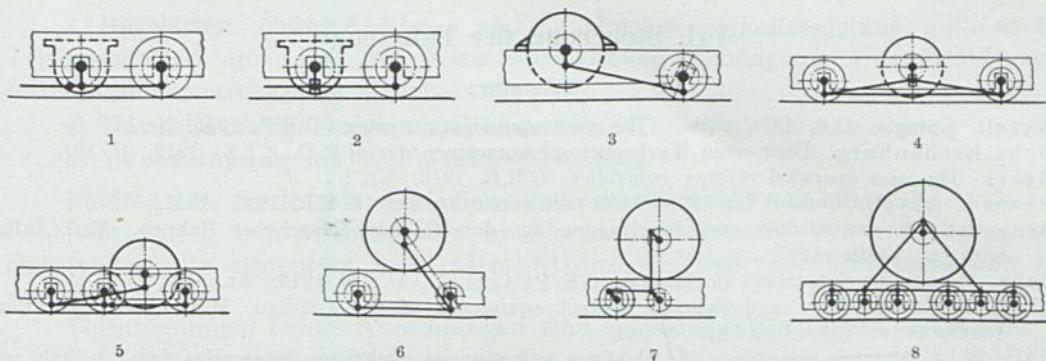


Abb. 306. Getriebe-Anordnungen für Gestellmotoren: eine Treibwelle.

4. Motor- bzw. Vorgelegewelle gegenüber den getriebenen Achsen überhöht, Schlitzkuppelstange.
5. Wie vor, jedoch angelenkte Treibstange.
6. Schiefe Treibstange, eine Blindwelle.
7. Senkrechte Treibstange, eine Blindwelle.
8. Dreieckkuppelrahmen, zwei Blindwellen.

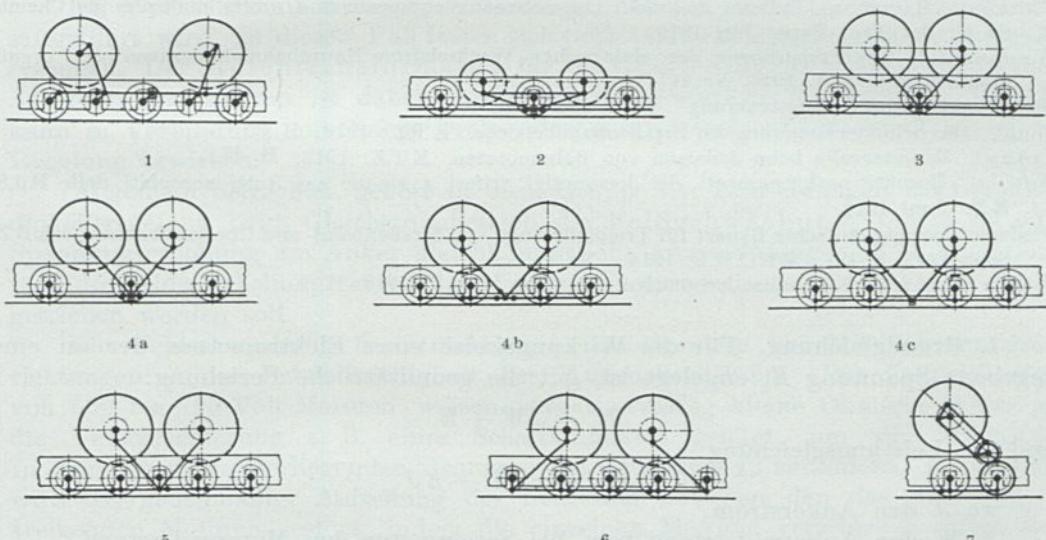


Abb. 307. Getriebe-Anordnungen für Gestellmotoren: zwei Treibwellen.

- c) Vielachsenantrieb, zwei treibende (Motor- bzw. Vorgelege-) Wellen. (Abb. 307).
 1. Schlitzkuppelrahmen ohne Überhöhung der Treibwelle.
 2. Schlitzkuppelrahmen mit geringer Überhöhung der Treibwellen (Kandórahmen).
 3. Dreieck-Schlitzkuppelrahmen.
 4. Zweistangenantrieb ohne Blindwelle.
 - a) mit Kulisserie für den Kurbelzapfen der Treibachse.
 - b) mit in Augen angelenkten Kuppelstangen.
 - c) mit Kulisserie an einem Punkt einer Kuppelstange angreifend.
 5. Zweistangenantrieb mit Blindwelle.
 6. Zweistangenantrieb mit zwei Blindwellen und gegliederten Kuppelstangen.
 7. Schnellaufendes Kurbelgetriebe, Blindwelle einebenig mit den Kuppelachsen.
 8. Einzelantrieb (Tschanz, B.B.C., S.S.W., West.).

VII. Steuerung der Fahrzeuge.

Literatur:

- Axtell. Sprague G.E. PC-Control. (The electropneumatic System) G.E.R. 1916. Nr. 11.
 Behn-Eschenburg. Über neue Wechselstromlokomotiven der M.F. Ö. E.T.Z. 1912. H. 10.
 Beers. The cam operated railway controller. G.E.R. 1919. Nr. 1.
 Beers u. Axtell. Control for 1200—1500 volt car-equipment. G.E.R. 1920. H. 4.
 Bragstad. Konstruktionen und Schaltungen aus dem Gebiete elektrischer Bahnen. Verl. Julius Springer, Berlin, 1907.
 Case. Recent developments in Sprague. G.E.-PC-Controll. G.E.R. 1916. Nr. 10.
 Clarke. The auxiliary and lighting control equipment of the Chicago, Milwaukee & St. Paul Locomotives. E.J. Juni 1920, S. 244.
 Cuénod. Commande simultanée de plusieurs automotrices électriques intercalées dans un train par moyen des asservissements. R. Thury. Genève 1912.
 Dick, Kerr & Co. Eine neue Vielfachsteuerung für elektrische Eisenbahnen. El. 1907. Ref. E.T.Z. 1907.
 Engel. Einige Schalt- und Bezeichnungsregeln für elektrisch betriebene Züge. E.K.B. 1918. H. 18.
 Heilfron. Über einige neuere Fragen aus dem elektrischen Vollbahnwesen. E.T.Z. 1910. H. 12.
 Kleinow. Wechselstromlokomotiven der Siemens-Schuckert-Werke für Vollbahnen. E.K.B. 1912. H. 23.
 Kraemer. Die Zugsteuerung der Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werke. E.T.Z. 1908. H. 10.
 Mardis. The electrical equipment and control of the Chicago, Milwaukee & St. Paul Locomotives. E.J. Juni 1920, S. 235.
 Modificazione ai reostati liquidi delle locomotive elettriche. R.T.F.I. Aug. 1918, S. 83.
 Niethammer. Elektrische Zugsteuerungen. Z.f.E. Dez. 1903.
 Thomson-Houston. Bulletin mensuel. Les nouveaux équipements à unités multiples de Chemin de fer de l'Etat Paris. Jan. 1913.
 Wachsmuth. Die Steuerungen der elektrischen Wechselstrom-Hauptbahnlokomotiven der preuß. Staatsbahnen. G.A. 1916. Nr. 947.
 Die Westinghouse-Zugsteuerung. E.B.T. 1905. Nr. 18.
 Wolf. Die Schützensteuerung im Straßenbahnbetriebe. E.T.Z. 1918. H. 37.
 Jrányi. Zeitintervalle beim Anlassen von Bahnmotoren. E.T.Z. 1913. H. 47.
 Verole. Recenti perfezionamenti dei locomotivi trifasi a cinque assi tutti accoppiati delle F.d.S. R.T. Juni 1914.
 Vielfachsteuerung einfacher Bauart für Triebfahrzeuge von Straßenbahn- und Überlandbahnen. Sch.B.Z. Sept. 1919, S. 137. B.B.C.M.B. 1914. Nr. 4.
 Webb. A new type of mine locomotive controller. G.E.R. 1918. H. 9.

1. Grundgleichung. Für die Wirkungsweise eines Elektromotors, der an eine gegebene Spannung E_k angelegt ist, gilt die grundsätzliche Beziehung:

$$E_k = JW + E$$

und die Leistungsgleichung

$$E_k J = J^2 W + EJ$$

wo J den Ankerstrom,

W den Ankerwiderstand bzw. bei Serienmotor den Motorwiderstand und E die Gegen-EMK. bezeichnet.

Die Gleichung gilt auch für Wechselstrom, nur handelt es sich dann um eine geometrische Addition und ist dann W kein rein Ohmscher Widerstand.

JW ist in diesem Zusammenhang das Maß für die Verluste, muß daher möglichst klein gehalten werden, so daß bei guten Maschinen im Betrieb $E_k = E$. Hieraus folgt, daß die Inbetriebsetzung eines Motors vom Stillstand nicht mit der vollen Klemmenspannung erfolgen darf; man muß vielmehr durch geeignete Mittel dafür sorgen, daß E_k auf denjenigen Wert herabgesetzt wird, welcher den verlangten bzw. zulässigen Strom erzeugt. Nachdem dieser Vorgang sich im Bahnbetrieb sehr oft wiederholt, außerdem auch eine möglichst wirtschaftliche Beeinflussung der Geschwindigkeit des Motors ein betriebsmäßiges Erfordernis ist, wird für diese Zwecke auf dem Fahrzeug eine Steuereinrichtung, der Fahrschalter (Kontroller), vorgesehen, der zweckmäßigerweise unter einem auch für den Fahrtichtungswechsel dient.

2. Regelarten. Zum Anfahren und zu Geschwindigkeitsregelung gibt es für Triebmaschinen mit von der Klemmenspannung abhängiger Umlaufzahl zwei grundsätzlich verschiedene Mittel:

- a) Vorschaltung geeigneter Widerstände,
- b) Veränderung der Klemmenspannung.

Beide Arten der Regelung können die Leistungszufuhr mit einer angemessenen Zahl von Stufen, d. h. in mehr oder weniger ausgeprägten Stufen vornehmen oder eine vollständig stufenlose rein allmähliche Regelung der Leistungszufuhr bewirken.

Vermischungen beider Anordnungen sind auch möglich und gebräuchlich.

Bei Gleichstrombetrieb ist die stufenweise Widerstandsregelung so gut wie ausschließlich in Gebrauch. Da jedoch mit dieser Anfahrmethode namhafte Arbeitsverluste verbunden sind, pflegt man sie mit der Spannungsregelung insofern zu verbinden, als man bei Vorhandensein von zwei und vier oder mehr Motoren diese in Reihe, Reiheparallel und parallel schaltet, was einer entsprechenden Unterteilung der Spannung gleichkommt.

Es sind auch Versuche gemacht worden, mittelst eines Umformers die allmähliche Spannungsregelung bei Gleichstrombetrieb durchzuführen, doch sind die erforderlichen Einrichtungen sehr umständlich gewesen.

Bei Wechselstrombetrieb ist es die Regel, daß am Fahrzeug ein Transformator mitgeführt wird. In diesem Fall lassen sich praktisch beliebige Spannungen sekundär erzeugen. Der Stufentransformator für die Geschwindigkeitsregelung beim Anfahren und Fahren ist daher eine allgemein gewordene Einrichtung. Derselbe kann in Verbindung mit einem Dreh- oder Zusatztransformator die allmähliche Regelung bewirken.

Allgemein betrachtet, gehört in diese Gruppe der Einrichtungen zur Geschwindigkeitsregelung beim Gleichstrombetrieb die Feldschwächung, indem sie einer Spannungserhöhung am Anker gleichkommt; ihr Anwendungsgebiet ist beschränkt, weil die Feldschwächung normal bei Wendepolmotoren nicht unter 60, äußerst 50 % getrieben werden soll.

Die Feldschwächung beeinträchtigt — insbesondere bei Mittelspannungseinrichtungen — die Betriebssicherheit der Wagenausrüstung. Die Feldwicklungen von 500 bis 700-Volt-Motoren weisen verhältnismäßig kleine Ohmsche Werte auf, die Verschlechterung z. B. eines Schaltkontaktees genügt, um die Stromwerte in den nebeneinanderliegenden Stromzweigen wesentlich zu verändern. In der Folge wird die gleichmäßige Aufteilung der Belastung zwischen den das Fahrzeug antreibenden Motoren gestört, indem die einzelnen Motoren verschieden erregt sind. Der schwächer erregte Motor übernimmt zu viel Last, wodurch unzulässige Erwärmungen entstehen.

3. Arten der Steuerung. Leistungen bis etwa 4×250 PS bei 600 Volt, entsprechend 1300 A können unmittelbar geschaltet werden, d. h. der Steuerapparat, der vom Fahrer betätigter Fahrschalter, ist so eingerichtet, daß der Fahrschalter selbst die erforderlichen Ein-, Aus- und Umschaltungen des Motorstromes besorgt. Die oben genannte Leistung führt bereits zu sehr großen Dimensionen, so daß die Fahrschalter unhandlich und sehr schwer werden. Diesem System haftet der Fehler an, daß ein geringfügiger Mangel in irgendeinem Stromkreis den ganzen Steuerapparat unbrauchbar machen kann, andererseits muß eine sehr gedrängte Bauart gewählt werden, weil mit dem Raum zu sparen ist. Hierunter leidet die Betriebssicherheit.

Trotz dieser räumlichen Beschränkungen läßt sich nicht vermeiden, daß die Fahrschalter für direkte Schaltung bei großen Leistungen sehr schwer werden, so daß deren Bedienung einen großen Kraftaufwand des Fahrers verlangt, andererseits

lassen sich die Schaltungen eben aus dieser Ursache nicht mit der erwünschten Raschheit durchführen.

Es hat sich daher für größere Leistungen das System der mittelbaren Steuerung eingebürgert, bei welchem mit schwachen Strömen von einigen wenigen A oder mittelst Druckluft Hilfsschalter betätigt werden, die die Motorströme schalten.

Das mittelbare System eignet sich unter einem zur Schaltung der Motoren mehrerer Fahrzeuge; die Zugsteuerungen sind nach diesem Grundsatz gebaut, wodurch vor allem vermieden wird, daß Starkströme aus einem Fahrzeug in das andere geführt werden müssen.

Bei elektrischen Bahnen, namentlich mit Motorwagenbetrieb, liegt öfter das Bedürfnis vor, die Zugseinheiten durch Kupplung mehrerer Triebwagen zu vergrößern. Die getrennte Steuerung mehrerer Triebfahrzeuge ist zwar bei entsprechender Schulung der Fahrer ohne weiteres durchführbar, jedoch unwirtschaftlich insbesondere dann, wenn das Bedürfnis nach Zügen, die aus mehreren Triebwagen bestehen, sich des öfteren wiederholt.

Die unmittelbare Steuerung mehrerer Fahrzeuge von einem Fahrschalter verlangt sehr verwinkelte Schaltungen und schwere unhandliche Kuppelvorrichtungen. Diese Übelstände können durch mittelbare Steuerungen umgangen werden.

4. Grundsätze der Schaltregeln. Unabhängig vom angewendeten System müssen alle Steuerapparate für Fahrzeuge gewisse Schaltregeln berücksichtigen, ohne welche ein einwandfreies Arbeiten nicht zu erzielen ist.

Der Fahrschalter muß derartig eingerichtet sein, daß ein Fahrtrichtungswchsel bei eingeschaltetem Strom unmöglich

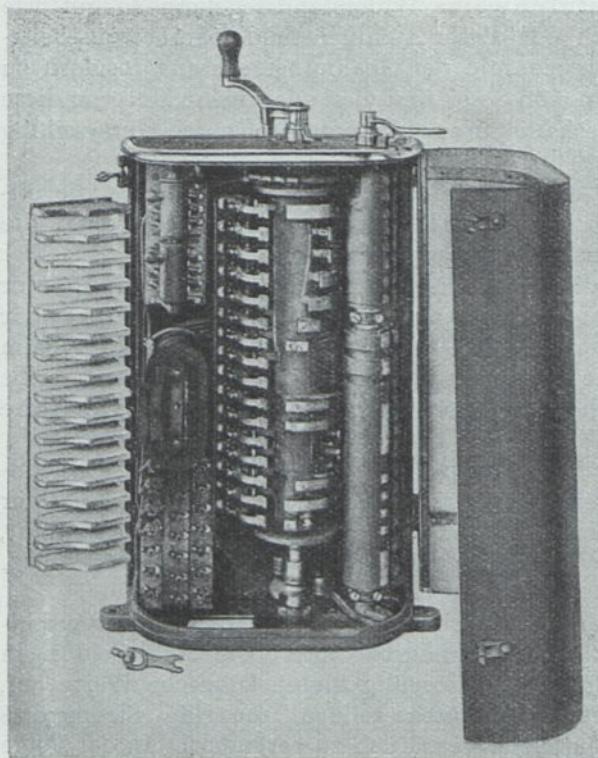
Abb. 308. Zweimotoriger-Straßenbahnschalter für Reihen-Nebeneinander-Schaltung u. Kurzschlußbremsung.
(Ältere Bauart A.E.G.).

sei, weil eine derartige Schaltung einen schweren Kurzschluß zur Folge haben würde.

Weiterhin müssen Feld und Anker vor dem Einsetzen der Stromschaltung bereits in die der jeweiligen Fahrtrichtung entsprechende Richtung geschaltet sein, weil nur so sicher vermieden wird, daß Feld und Anker nicht gleichzeitig Strom erhalten, d. h. der Motor nicht etwa unerregt an die Spannung geschaltet wird.

Um diesen Bedingungen zu entsprechen ist es zur Regel geworden, den zumeist als Schaltwalze ausgebildeten Fahrschalter (Abb. 308) mit zwei gegenseitig verriegelten Walzen auszurüsten. Die eine, die Fahrtrichtungswalze, kann nur bei ausgeschaltetem Strom betätigt werden und führt die richtige Folge der Anker- und Feldwicklungen vorgängig herbei.

Mit der Hauptschaltwalze kann erst dann geschaltet werden, wenn die Umschaltwalze bereits in die Endstellung gebracht ist.



Die Stromunterbrechung hat grundsätzlich gleichzeitig an mehreren Stellen, je nach der Linienspannung und je nach der Stromstärke an mindestens zwei, meistens bis 6 Stellen zu erfolgen, damit der entstehende Lichtbogen einen langen Weg hat. Außerdem ist es unerlässlich, eine wirksame elektromagnetische Funkenlöschung vorzusehen, um ein Anbrennen der Berührungsstellen zu verhindern.

Bei Bremskontrollern wird die erforderliche Umkehrung des Ankers zur Herbeiführung der Generatorwirkung mit einer dritten Schaltwalze bewirkt, für welche dieselbe Bedingung gilt, wie für die Umkehrwalze.

Die Steuerungen sollen weiterhin mit einer Einrichtung versehen sein, um einen Motor oder eine Motorgruppe betriebsmäßig abschalten zu können; neuzeitliche Typen ermöglichen diese Abschaltung, ohne den Kontroller öffnen zu müssen.

Die Kurbel für die Hauptschaltwalze und der Griff der Umschaltwalze dürfen nur in ausgeschaltetem Zustand abnehmbar sein.

Die Fahrschalter sind — mit Ausnahme der für steile Reibungsbahnen bestimmten Typen, bei denen die reine Parallelschaltung vorzuziehen ist, weil in diesem Fall durch das Gleiten der einen Achse die Zugkraft des anderen Motors nicht gestört werden kann — stets für die Reihen-Nebeneinander (R. P.)-Schaltung eingerichtet.

Die einfache R. P.-Schaltung gibt zwei wirtschaftliche Geschwindigkeitsstufen entsprechend der Fahrt mit Motoren zu zweit in Reihe mit je halber Spannung und zu zweit nebeneinander mit voller Spannung.

Mit vier Motoren lässt sich dieses Verfahren erweitern und drei Geschwindigkeitsstufen erzielen. Bei Schaltung der vier Motoren hintereinander, dann zwei neben- und zwei hintereinander und schließlich alle vier parallel entstehen die wirtschaftlichen Geschwindigkeitsstufen $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und 1.

Diese Unterteilung ist nicht gleichmäßig; für die $\frac{1}{4}$ -Geschwindigkeit ist wenig Bedarf. Die Amerikaner wenden bei neueren großen Lokomotiven, die mit sechs bzw. zwölf Motoren ausgerüstet sind, eine gleichmäßige Unterteilung der Geschwindigkeit in drei und vier Stufen an.

Drei Geschwindigkeitsstufen werden erzielt durch folgende Schaltung:

	Spannung je Motor	Geschwindigkeit
6 Motoren hintereinander	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$
3 Motoren hintereinander, 2 Reihen nebeneinander	$\frac{2}{6}$	$\frac{2}{3}$
2 Motoren hintereinander, 3 Reihen nebeneinander	$\frac{3}{6}$	1

Vier Geschwindigkeitsstufen lassen sich erzielen, wenn zwölf Anker, die für $\frac{1}{3}$ -Spannung gewickelt sind, zur Verfügung stehen.

Die Geschwindigkeitsstufen sind:

	Spannung je Motor	Geschwindigkeit
12 Motoren hintereinander	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{4}$
6 Motoren hintereinander, 2 Gruppen nebeneinander	$\frac{1}{6}$	$\frac{2}{4}$
4 Motoren hintereinander, 3 Gruppen nebeneinander	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}$
3 Motoren hintereinander, 4 Gruppen nebeneinander	$\frac{1}{3}$	$\frac{4}{4}$

Zu diesen Schaltungen, die an dem Übelstand der Hintereinanderschaltung vieler Motoren kranken, führt die den Motoren unmittelbar angelegte Hochspannung in der Fahrleitung, für welche die Triebmotoren nicht mehr sicher gebaut werden können.

Zum stoßfreien Anfahren sind bei Straßenbahntriebwagen in der Reihenschaltung 4, äußerst 5 Widerstandsstellungen, eventuell noch 1 bis 2 widerstandslose Stellungen mit Feldschwächung, in der Parallelschaltung 2 bis 3 Widerstandsstellungen und 1 bis 2 Shuntstellungen erforderlich. Für Lokomotiven, namentlich solche für Verschubdienst, ist eine größere Stufenzahl erwünscht.

Wichtig ist der Schaltvorgang beim Übergehen von Reihe auf Parallel; diesbezüglich sind zwei Methoden üblich. Bei der einen, die meist gebräuchliche Art, wird der Fahrstrom nicht unterbrochen, sondern zunächst der eine Motor kurz-

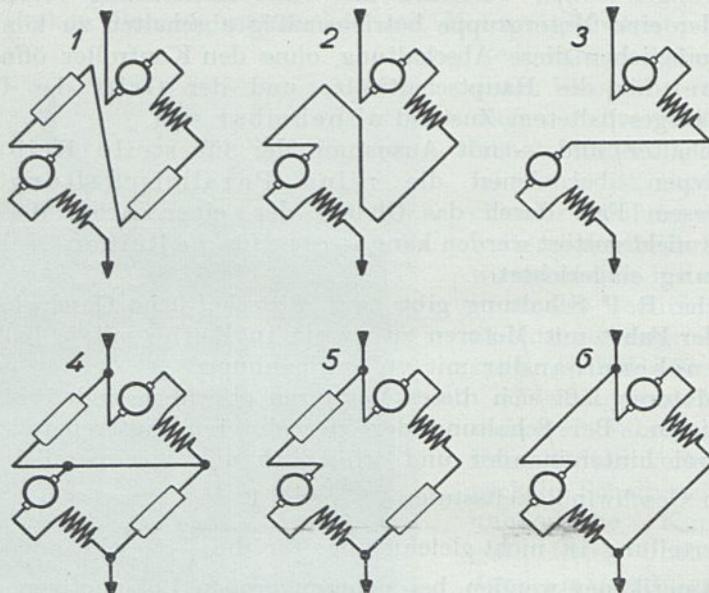


Abb. 309. Brückenschaltung für zwei Motoren.

geschlossen und der andere mit vorgeschaltetem Widerstand an die volle Spannung gelegt. Der erstere wird hierauf ebenfalls hinter dem Widerstand an die Spannung gelegt.

Bei dem anderen System wird der Fahrstrom unterbrochen und hierauf beide Motoren wieder gleichzeitig mit entsprechendem Widerstand nebeneinander an die Spannung gelegt.

Die erstere Methode schont naturgemäß den Fahrschalter und die Motoren; es erleidet jedoch das Fahrzeug während des Umschaltens eine Einbuße an Beschleunigung, weil nur die halbe Motorzahl arbeitet. Ein Nachteil dieser Schaltung ist, daß bei fehlerhafter Bedienung gegebenenfalls nur mit der halben Motorzahl längere Zeit gefahren werden kann und wodurch diese überlastet werden.

Die Übergangsschaltung von Reihe auf Nebeneinander mit Stromunterbrechung oder Kurzschließung der halben Motorzahl bedingt, daß die Zugkraft in dieser Periode vollständig aussetzt und der Wagen, wenn zu langsam geschaltet wird, eine nennenswerte Verminderung der Geschwindigkeit erfährt. Durch die Brückenschaltung (Abb. 309) wird erreicht, daß auch im Übergang alle Motoren fast dieselbe Stromstärke beibehalten, so daß auch die Zugkraft angenähert aufrecht bleibt.

Bei viermotorigen Wagen läßt sich nach einem amerikanischen Patent von Jones mit nur acht Schaltern und einer einzigen Widerstandsstufe eine befriedigende Steuerung mit drei wirtschaftlichen Betriebsstellungen einrichten (Abb. 310).

5. Fahrschalter für unmittelbare Steuerung. Die allgemein üblichen Gleichstromfahrschalter für Straßen- und Lokalbahnwagen gehören bis etwa 1000 Volt Be-

triebsspannung und für Leistungen von bis vier Motoren zu je 80 PS der Gruppe der unmittelbaren Schalter an.

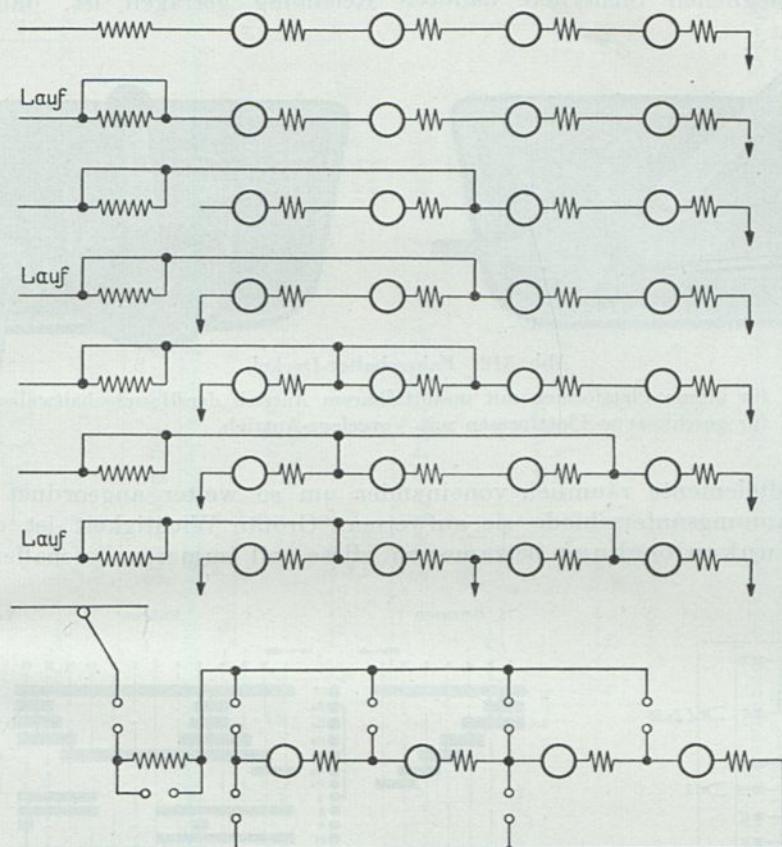


Abb. 310. Schema einer Mehrfach-Reihen-Neben-Schaltung für drei Geschwindigkeiten mit vier Motoren.

Für zweimotorige Wagen lassen sich die Fahrsschalter mit Dimensionen betriebssicher bauen, die eine bequeme Unterbringung im Fahrzeug gestatten und eine leichte Bedienung vom Fahrer ermöglichen.

Straßenbahnkontroller sind meist etwa 930 mm hoch, 575 mm breit und 230 mm tief (Abb. 311). Nachdem die Kurbel der Hauptschaltwalze in der Regel mit 175 mm Hub hergestellt wird, muß der Fahrsschalter von der Wagenspritzwand etwas zurückgesetzt werden, damit der Fahrer in der Bedienung der Kurbel nicht behindert wird. Hierdurch wird von der Plattform etwas Raum verloren. Diesem Übelstand kann man dadurch begegnen, daß man die Hauptschaltwalze durch ein Zahnradvorgelege (Abb. 312b) mit der Kurbelachse verbindet.

Die Abb. 313 bis 319 stellen Beispiele für Schaltpläne mit unmittelbarer Steuerung dar.

Die richtige Bemessung aller Schaltelemente ist Sache des Entwurfes; dem Bahningenieur obliegt

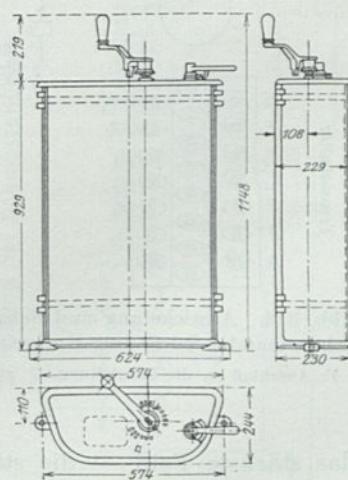


Abb. 311. Straßenbahn-Fahrsschalter.

lediglich die Aufgabe, eine den besonderen Verhältnissen entsprechende Auswahl zu treffen. In dieser Beziehung wird zu untersuchen sein, ob den Anforderungen der höchstmöglichen Sicherheit dadurch Rechnung getragen ist, daß die ein-

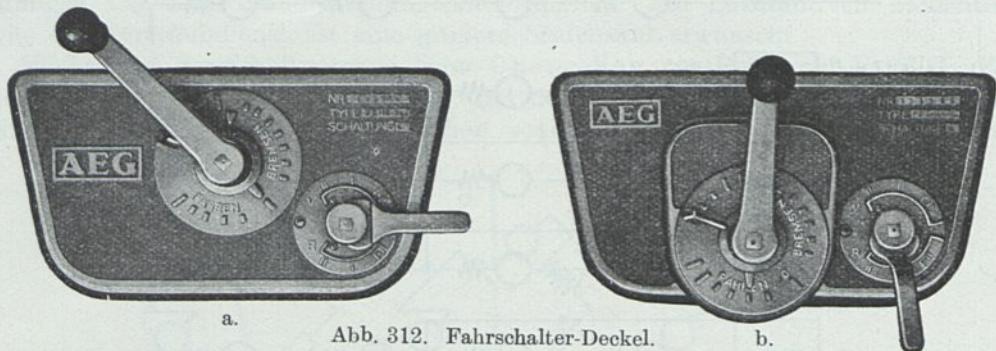


Abb. 312. Fahrtschalter-Deckel.

- a) für offene Plattformen mit unmittelbarem Antrieb der Hauptschaltwalze.
b) für geschlossene Plattformen mit Vorgelege-Antrieb.

zellenen Schaltelemente räumlich voneinander um so weiter angeordnet wurden, je größere Spannungsunterschiede sie aufweisen. Größte Wichtigkeit ist der Anordnung der Funkenlöschung beizumessen; diese soll immer so beschaffen sein, daß

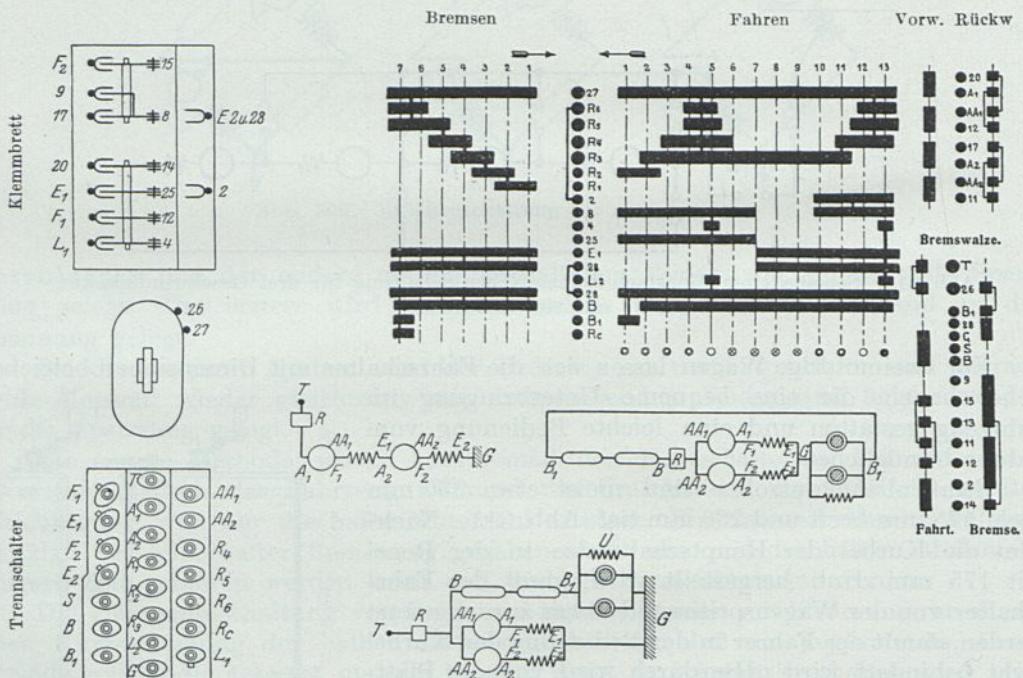


Abb. 313. Abwickelung und Schaltprinzip eines Straßenbahnfahrtschalters für zwei Motoren, Reiheneinander-Schaltung, Kurzschlußbremse. Punkte mit gleicher Bezeichnung sind verbunden (A.E.G.).

T: Anschluß an die Fahrleitung. G: an die Erde. A und AA: Ankermassen. F und E Klemmen der Feldwicklung; 26-27 Funkenlöschspule.

das stärkste Feld — die stärkste Blaswirkung — bei demjenigen Schaltfinger auftritt, der in bezug auf Stromstärke und Zahl der Schaltungen am meisten beansprucht ist. Zufolge der unvermeidlichen großen Streuungen wird eine den ganzen

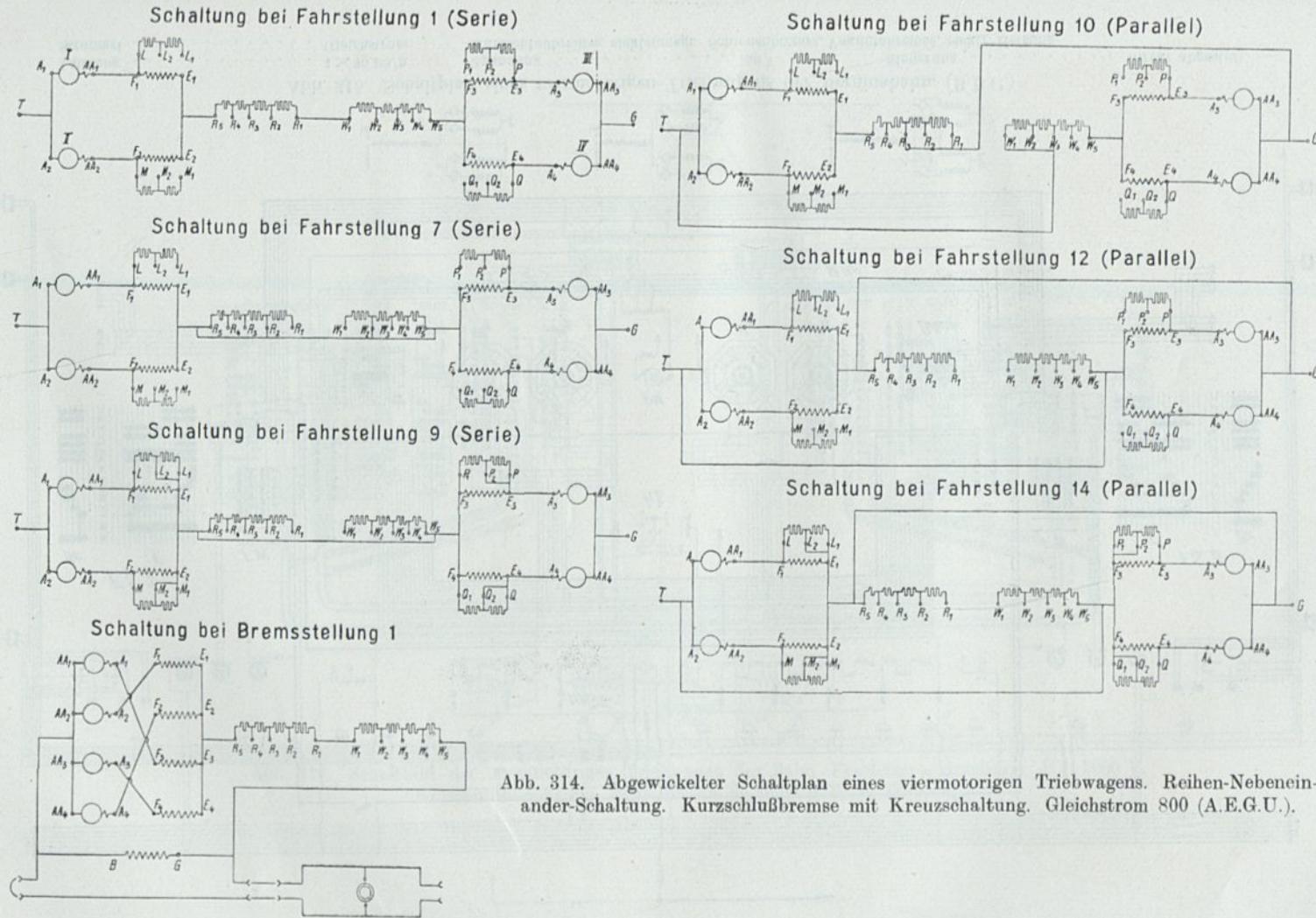


Abb. 314. Abgewickelter Schaltplan eines viermotorigen Triebwagens. Reihen-Nebeneinander-Schaltung. Kurzschlußbremse mit Kreuzschaltung. Gleichstrom 800 (A.E.G.U.).

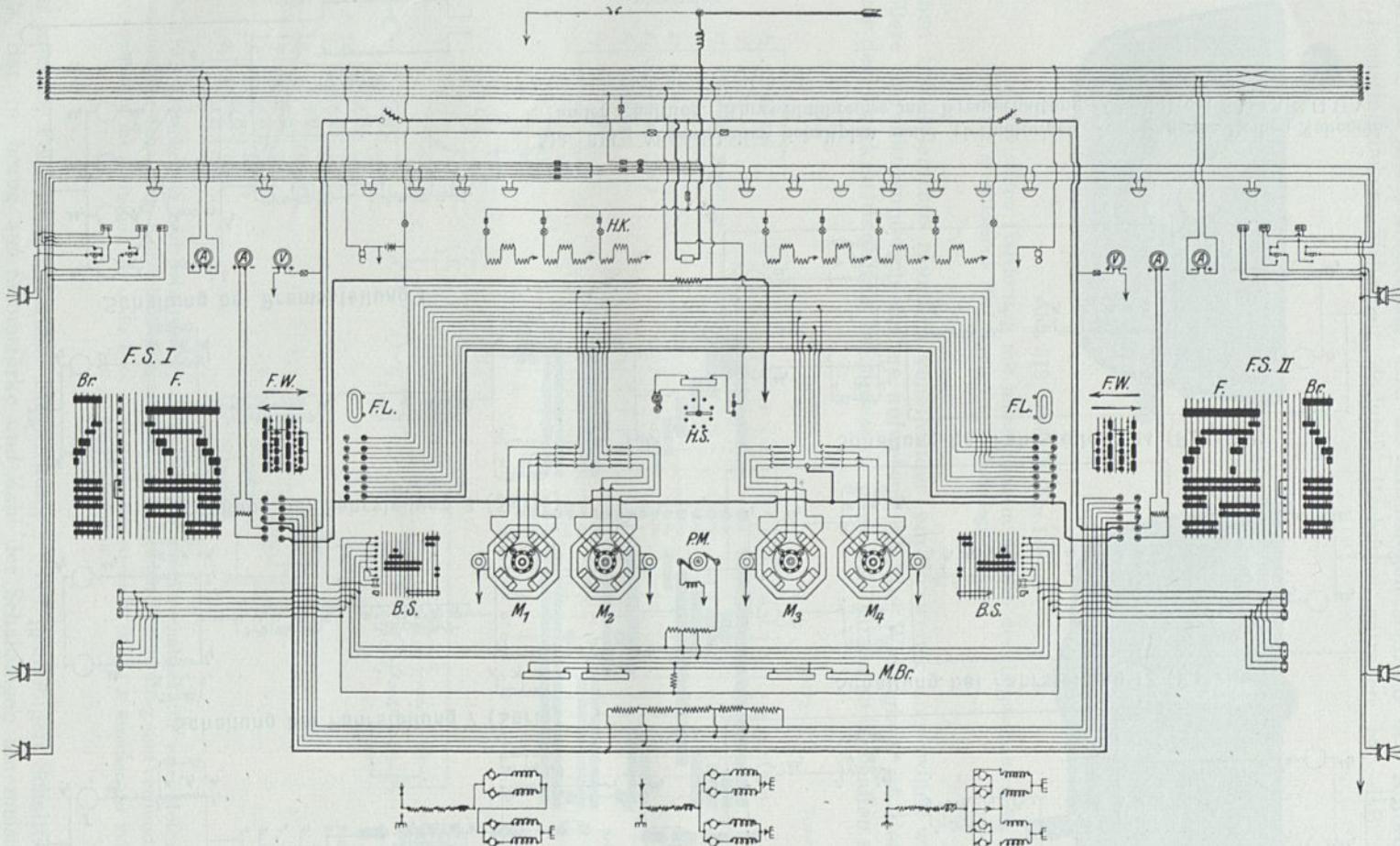


Abb. 315. Schaltplan eines viermotorigen Triebwagens der Berninabahn. (B.B.C.)

Leistung	4 × 70 PS/h	Spannung	750 V.	Steuerung	direkt abgestuft.
Stromart	Gleichstrom.			Kurzschlußbremse, elektromagn. Schienenbremse, Vakuumbremse, elektr. Heizung.	

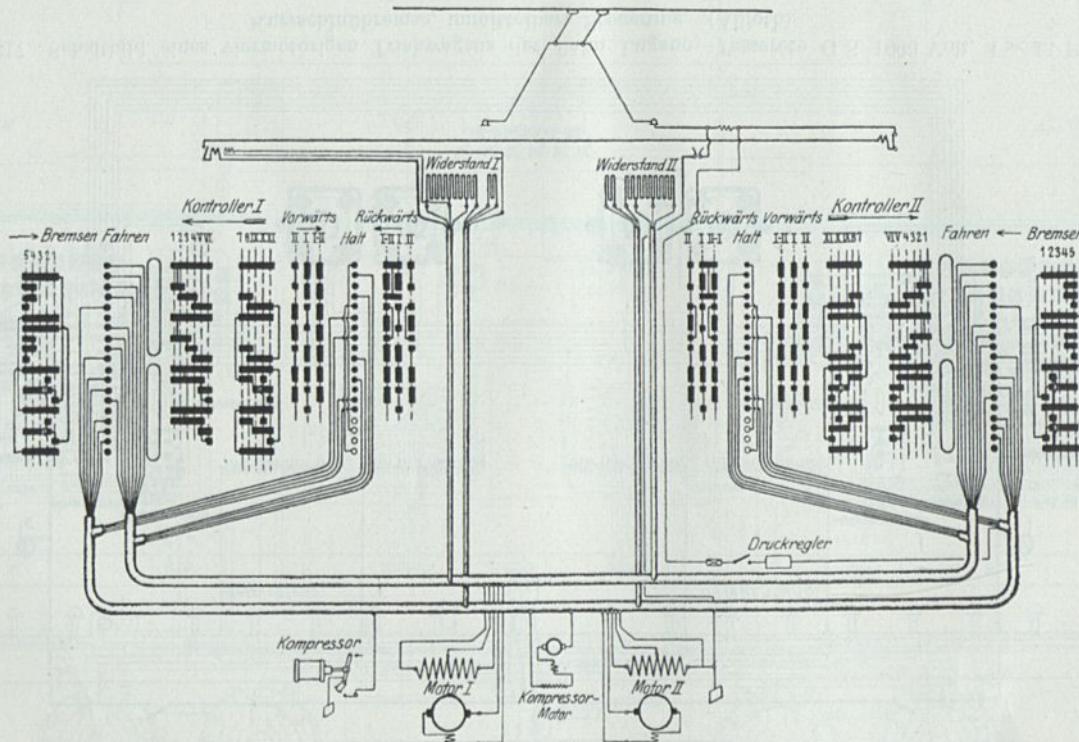


Abb. 316. Schaltbild der zweimotorigen Triebwagen der Bahn Frankfurt—Homburg G.S. 1000 V.
Kurzschlußbremsung, Feldschwächung, unmittelbare Steuerung.

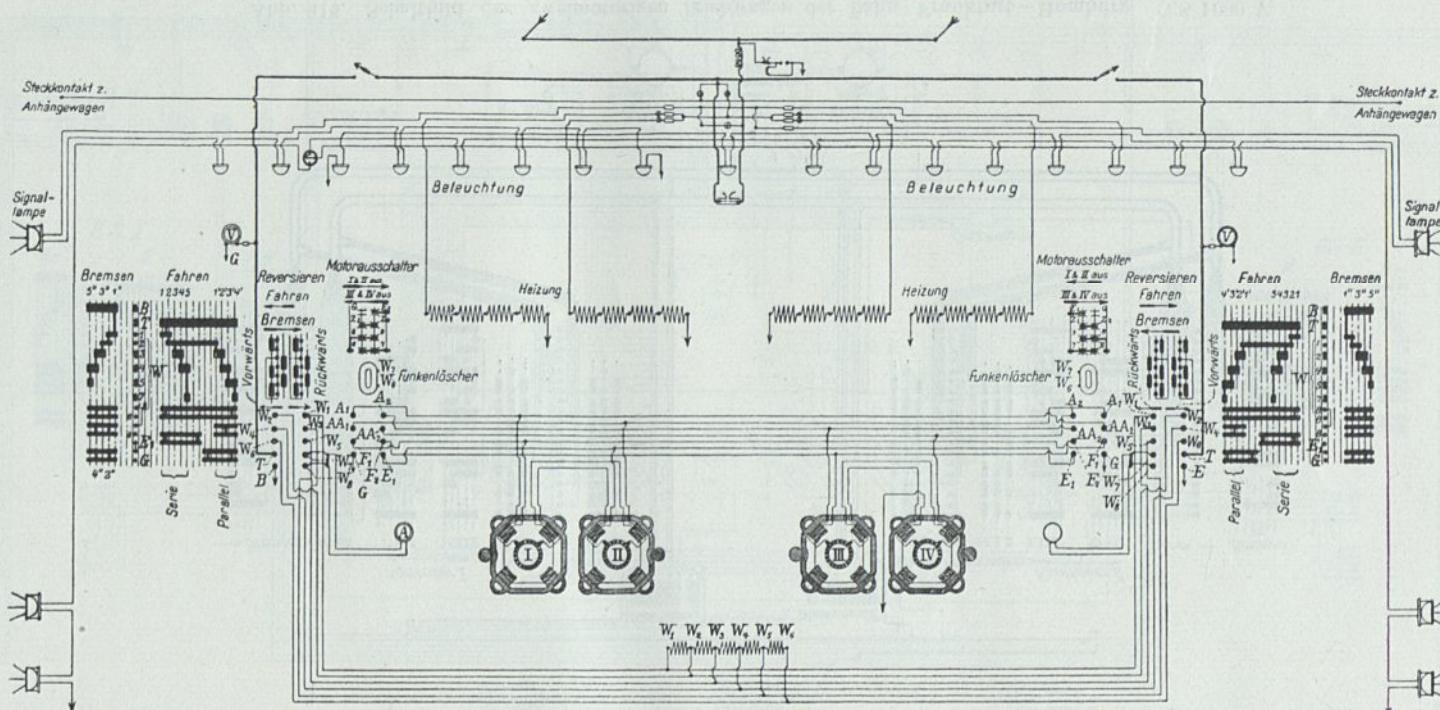


Abb. 317. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Bahn Lugano—Tesserete G.S. 1000 Volt, 4×45 PS., Kurzschlußbremse, unmittelbare Steuerung. (Allioth).

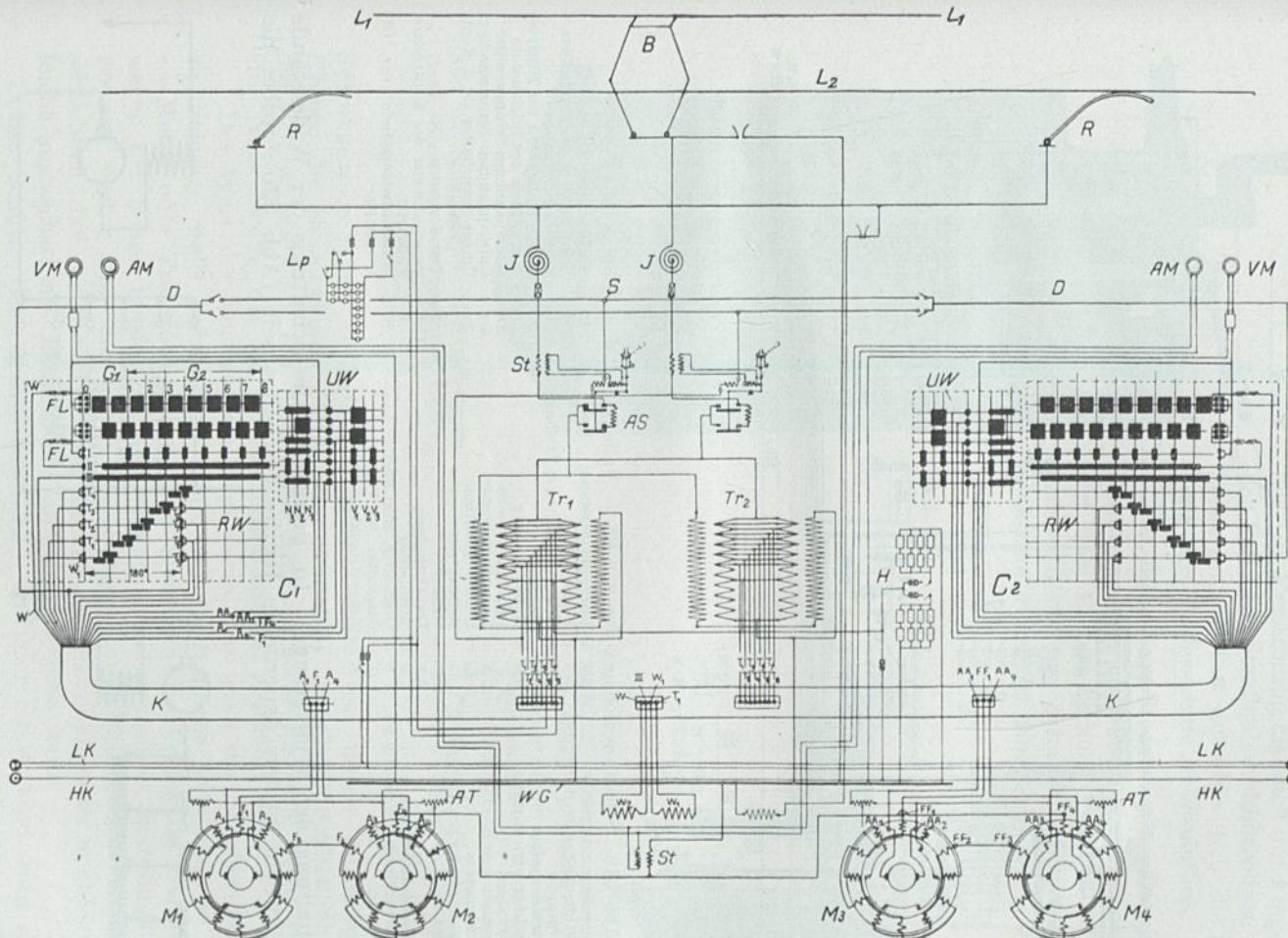


Abb. 318. Schaltbild eines Triebwagens der Valle-Maggiabahn W.S. 800 und 5000 V., 20 Per., unmittelbare Steuerung. Gegenstrombremse (M.F.O.).
 AM Strommesser, AS selbsttätiger Höchststromschalter durch Überstrom, Druckluft auch von Hand betätigten, AT Drosselspule, B Hochspannungsbügel, C_1 C_2 Fahrschalter, D Spannungsleitung, FL Bläserspule, G Fahrschalterstellungen zum Anfahren, G_2 Fahrschalterstellungen in Fahrt, H Heizkörper, HK Heizleitung für Beiwagen, J Drosselspule, K Kabelschlauch, L_1 800 V. Fahrleitung, L_2 5000 V. Fahrleitung, LK und L_p Beleuchtung 55 V., M_1 bis M_4 Motoren, N_1 Fahrwendestellung „Rückwärts“ für die Motoren 1 bis 4, N_2 für die Motoren 1 und 2, N_3 für 3 und 4, R Schleifbügel, RW Fahrschalterwalze, S Schwachsicherung, St Stromwandler, Tr_1 und Tr_2 Transformatoren, UW Fahrtwenderstellung, V_1 Fahrtwenderstellung „Vorwärts“ für die Motoren 1 bis 4, V_2 für die Motoren 1 und 2, V_3 für die Motoren 3 und 4, VU Spannungsmesser, WG Erdanschlüsse am Wagengestell.

Schaltbereich beherrschende Bläserwicklung einer nur einen verhältnismäßig kleinen Kern umfassenden Spule vorzuziehen sein. Die beste Lösung stellt diesbezüglich eine Anordnung dar, bei welcher jeder Schaltfinger seine eigene Bläserspule erhält und diese vom Strom des betreffenden Schaltfingers durchflossen wird.

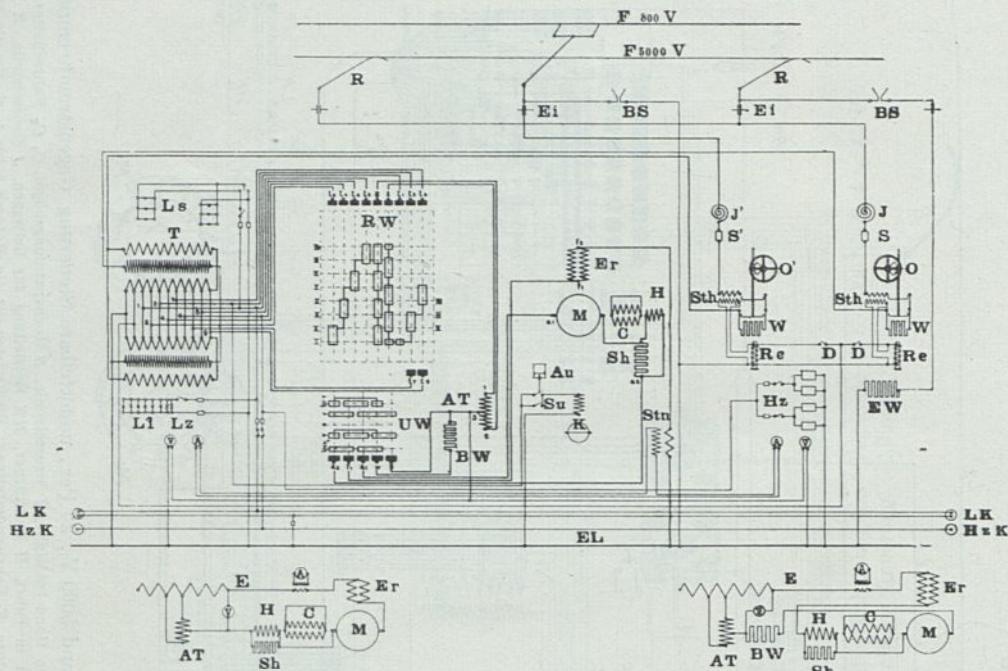


Abb. 319. Schaltungsschema der 250 PS — Valle-Maggia-Lokomotive (M.F.O.).

A = Amperemeter
 Au = Druckluftschalter der Kompressorgruppe
 AT = Autotransformator
 BS = Blitzschutzworrichtungen
 BW = Bremswiderstand
 C = Kompensationswicklung des Triebmotors
 D = Druckknöpfe für Betätigung der Relais
 E = Erde
 Ei = Hochspannungseinführungen
 Er = Erregerwicklung d. Triebmotors
 El = Erdleitung

EW = Erdungswiderstand
 F = Fahrdraht
 H = Hilfspannung d. Triebmotors
 Hz = Heizung
 Hsk = Heizkupplung
 J, J' = Induktionsspulen
 K = Kompressormotor
 Li = Innenbeleuchtung
 Ls = Reflektoren
 Lz = Stecker
 LK = Lichtkupplung
 M = Triebmotor
 O = Ölschalter, 5000 Volt
 O' = Ölschalter, 800 Volt
 R = Rutenstromabnehmer

Re = Auslöserrelais
 RW = Regulierwalze des Kontrollers
 S, S' = Schmelzsicherungen
 Sh = Shunt Widerstand zur Hilfspannung des Triebmotors
 Sth = Oberspannungs-Stromwandler
 Stn = Unterspannungs-Stromwandler
 Su = Umgehungsschalter für d. Kompressormotor
 T = Transformator
 UW = Umschaltwalze des Kontrollers
 V = Voltmeter
 W, W' = Vorschaltwiderstände der Ölschalter

6. Schaltung der Widerstände. In bezug auf die Schaltung der Widerstände können sämtliche Stufen dauernd in Reihe geschaltet sein (Abb. 320), wobei die

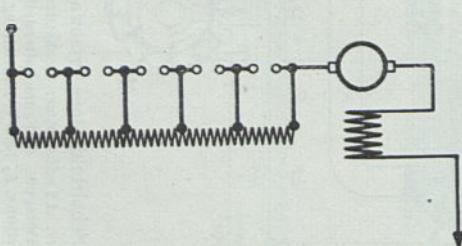


Abb. 320.
Anfahrwiderstände in Reihenschaltung.

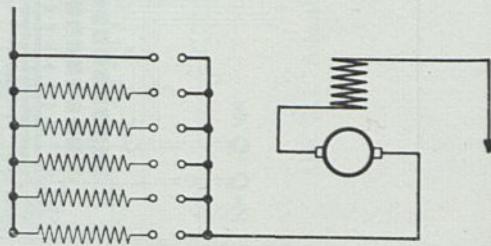


Abb. 321.
Anfahrwiderstände in Nebeneinander-Schaltung.

Wärmekapazität jeder folgenden, also später kurzgeschlossenen oder abgeschalteten Stufe größer bemessen sein muß als der vorgehenden. Nachdem im ersten Moment

des Anfahrens alle Widerstandselemente eingeschaltet sind, ist die Wärmeausnutzung eine gute; dagegen verlangt diese Schaltung eine gleich reichliche Bemessung aller

Kontaktfinger und Segmente, weil alle den gleichen Strom führen. Bei der Nebeneinanderschaltung (Abb. 321) ist das Gegenteil sowohl bezüglich der Erwärmung als auch der Fingerbemessung der Fall. Bei Straßenbahnkontrollern und direkter Steuerung ist fast ausschließlich die Reihenschaltung der Widerstände gebräuchlich.

7. Mittelbare Steuerungen. Die mittelbaren Steuerungen sind dadurch gekennzeichnet, daß der vom Fahrer bediente Schalter (Abb. 322, 323) nur Hilfsströme schaltet, die dann ihrerseits elektromagnetische Einzelschalter — Hüpfen oder

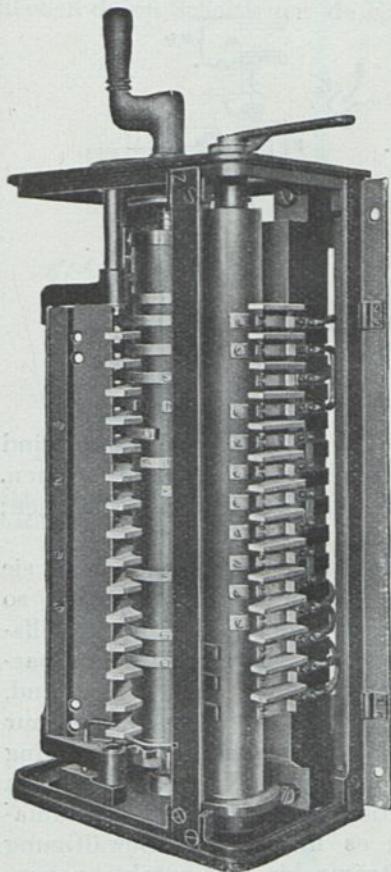


Abb. 322. Steuerschalter der Triebwagen Bonn-Siegburg-Königswinter, 1000 V. (S.S.W.)

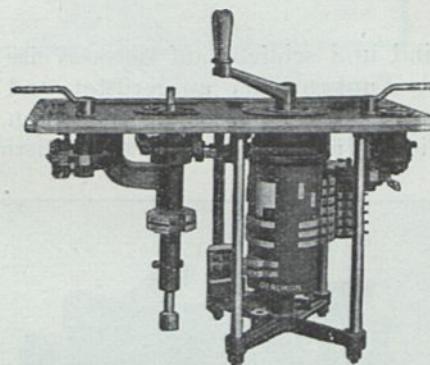


Abb. 323. Fernsteuerungs-Kontroller für Einphasen - Wechselstrom - Lokomotiven, mit elektrischer oder elektropneumatischer Fernbetätigung von: Stromabnehmer, Lokomotiv-Kontroller, Fahrtwender, Hoch- u. Niederspannungs-Ölschalter mit mechanischer Verriegelung der Betätigungshebel. (M.F.O.)

Schützen genannt — betätigen oder Ventile von durch Luftdruck betätigten Kolben die Einzelschalter öffnen oder schließen, anheben. Schließlich kann durch die Hilfsströme auch ein besonderer Antriebsmotor für eine Schaltwalze oder für eine Nockenwelle, die die Einzelschalter anhebt, gesteuert werden.

Der Wert der Fernschalter liegt darin, daß man die Schalter möglichst nahe an diejenige Stelle heransetzen kann, wo die fragliche Schaltung zu erfolgen hat — Motor oder Transformator — und hierdurch die Verlegung starker Kabel, die wegen der hohen Leistungen und verhältnismäßig kleinen Spannungen nötig sind erspart, weiter daß die hohen Spannungen vom Führerstand ferngehalten und schließlich, daß der Steuervorgang in eine Anzahl voneinander unabhängige, einzeln leicht auswechselbare Bestandteile aufgeteilt werden kann.

Die Schütze der A.E.G., der G.E.C. und der S.S.W. sind rein elektromagnetische Schalter; die B.E.W. und West. bauen elektromagnetisch gesteuerte Luftdruckschütze.

8. Elektromagnetische Schalter für mittelbare Steuerungen. Beim S.S.W.-Hüpfen (Abb. 324a) greift der Zugmagnet unmittelbar an dem einarmigen Hebel an, der am

freien Ende die Kontakteleiste trägt. Diese berührt in geschlossenem Zustande des Hüpfers eine Reihe von federnden Kontakten, die senkrecht zur Bildebene angebracht

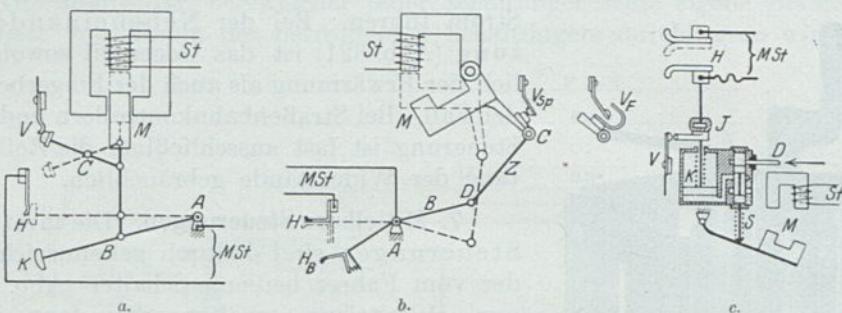


Abb. 324. Elektromagnetische Fernschalter (Hüpfer, Schütze) a. S.S.W., b. A.E.G. und G.E.C. c. West und B.E.W.

St = Zugspule, M = Schaltmagnet, V = Sperrkontakt, H = Hauptstromschalter, K = Pressluftkolben.

sind und schließt auf diese Weise den Hauptstrom. Die mittleren Kontakte sind als Funkenzieher ausgerüstet und mit magnetischer Lichtbogenlöschung versehen.

Der Anker des Zugmagneten muß den ziemlich schweren Hebel hochziehen; diese Hüpfer benötigen sehr leistungsfähige Zugmagnete.

Aus dem gleichen Grunde sind sie auch gegen Spannungsschwankungen so empfindlich, daß sie eine besondere Hilfsgruppe benötigen, bestehend aus Spartransformator, Hüpfer und Widerstand, die selbsttätig für Einhaltung einer nur um wenige Volt schwankenden Spannung sorgt. Die federnden Kontakte berühren die Kontakteleiste nur in einer sehr schmalen Fläche; es müssen zur Bewältigung stärkerer Ströme bis 14 Kontakte nebeneinander angeordnet werden, wozu noch die Funkenkontakte kommen.

Die A.E.G. und die G.E.C. (Abb. 324b, 325) verwenden bei ihren Schützen eine Kniehebelwirkung, indem sie den Magnetanker mittelst des Zwischenhebels auf den zweiarmigen Schalthebel einwirken lassen, der einerseits drehbar gelagert ist, andererseits am freien Ende die Kontakte trägt.

Diese Kontakte sind als bewegliche Walzkontakte ausgebildet, die aus Kupfer bestehen und mit einem eisernen Schuh ausgerüstet sind. Beim Anziehen des Magneten legen sich zuerst die eisernen Schuhe der Walzkontakte gegen entsprechend ausgebildete feste Kontakte, dann wälzen sich beide Kontakte aufeinander ab, berühren sich schließlich mit einer größeren Fläche, wobei der Druck der Kontakte aufeinander dank der Kniehebelwirkung groß wird. Aus letzterer Ursache kommt die A.E.G. selbst für große Stromstärken mit nur höchstens drei Paar

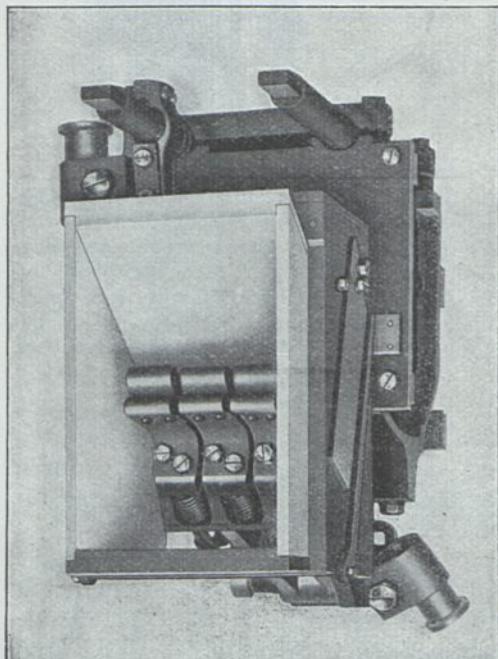


Abb. 325. Elektromagnetischer Einzelschalter mit Funkenlöschung und Abwälzkontakten.
(A.E.G.)

chend ausgebildete feste Kontakte, dann wälzen sich beide Kontakte aufeinander ab, berühren sich schließlich mit einer größeren Fläche, wobei der Druck der Kontakte aufeinander dank der Kniehebelwirkung groß wird. Aus letzterer Ursache kommt die A.E.G. selbst für große Stromstärken mit nur höchstens drei Paar

Walzkontakte aus. Diese sind gleichzeitig Funkenzieher, wobei sie durch eine vom Hauptstrom durchflossene Bläserspule unterstützt sind.

Die eisernen Kontaktschuhe verhindern eine Verschlechterung der Berührungsflächen durch Schaltfeuer, da Eisen viel weniger zur Perlenbildung neigt als Kupfer.

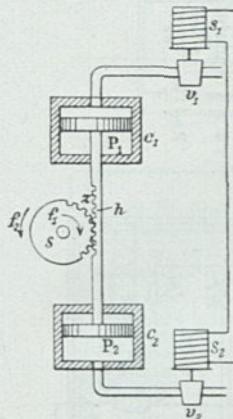


Abb. 326. Schema des elektropneumatischen Fahrtwenders. (West.)

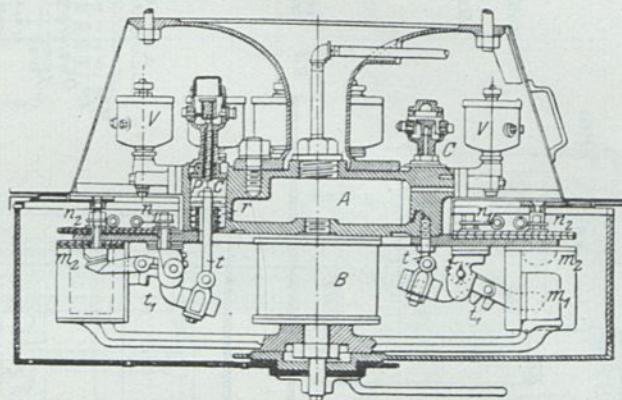
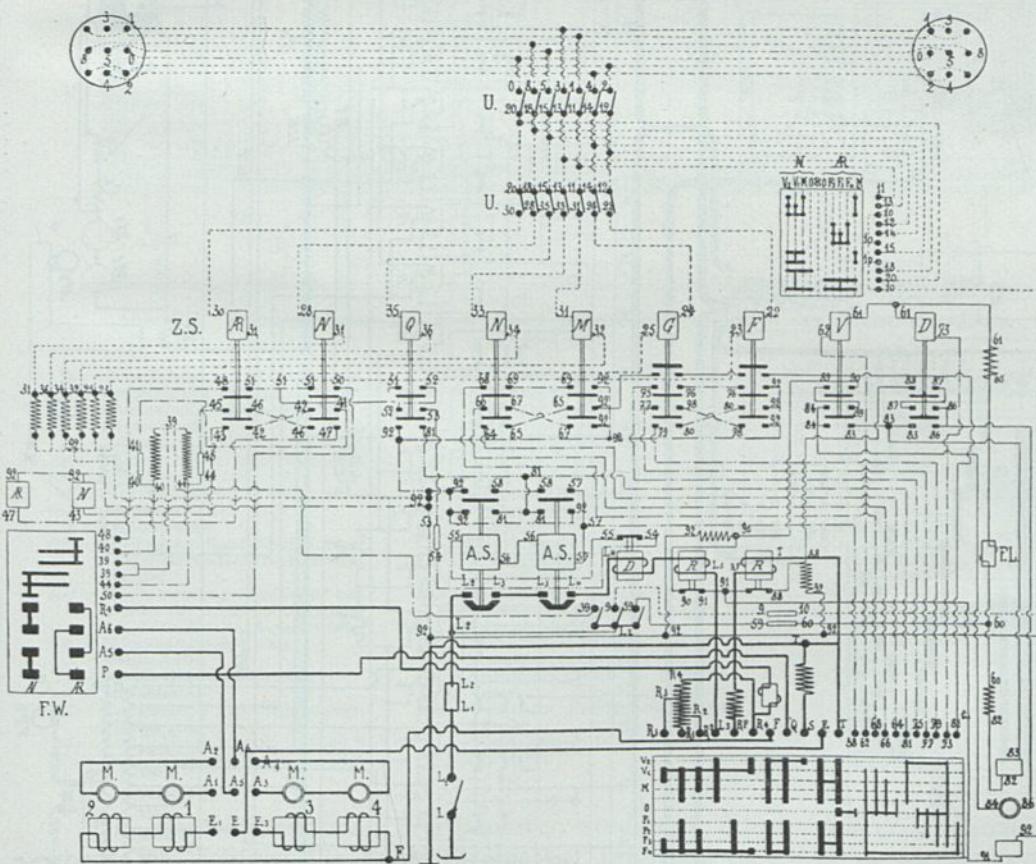


Abb. 327.
Elektropneumatischer Fernschalter. (West.)



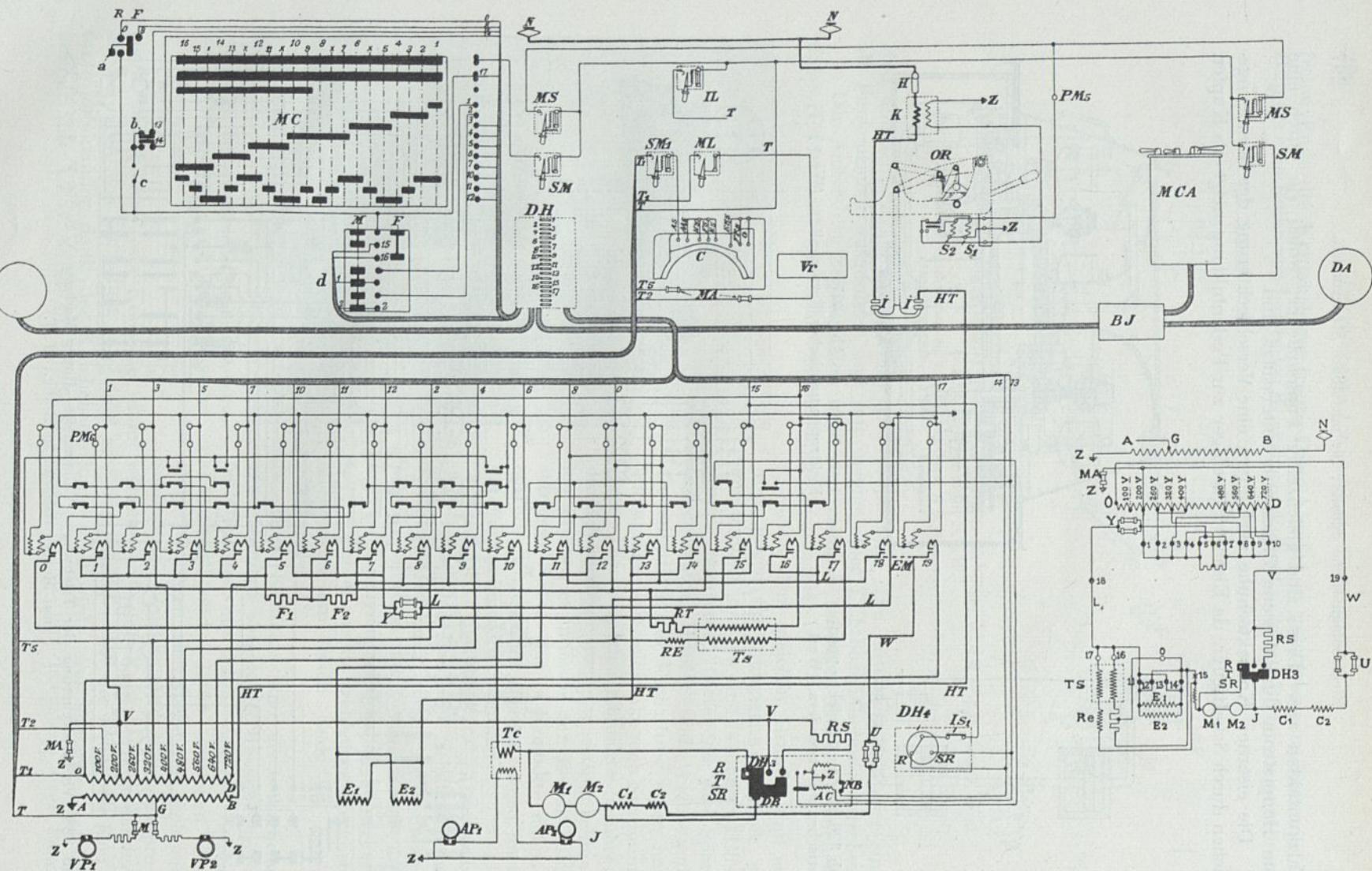


Abb. 329. Schaltprinzip und Schaltplan der 1 — C — 1, 1500 PS., W.-Lokomotive der französischen Südbahn. (T.H.)

Durch die Kniehebelwirkung ist die Schaltgeschwindigkeit geringer als beim S.S.W.-Hüpfer. Dafür ist die Empfindlichkeit gegen Spannungsabfälle wesentlich geringer.

Gegen Spannungsschwankungen gänzlich unempfindlich ist das elektropneumatische Schütz, indem hier Druckluft die Schaltbewegung bewirkt und der Steuerstrom nur die entsprechenden Ventile auslöst (Abb. 324/c, 326, 327).

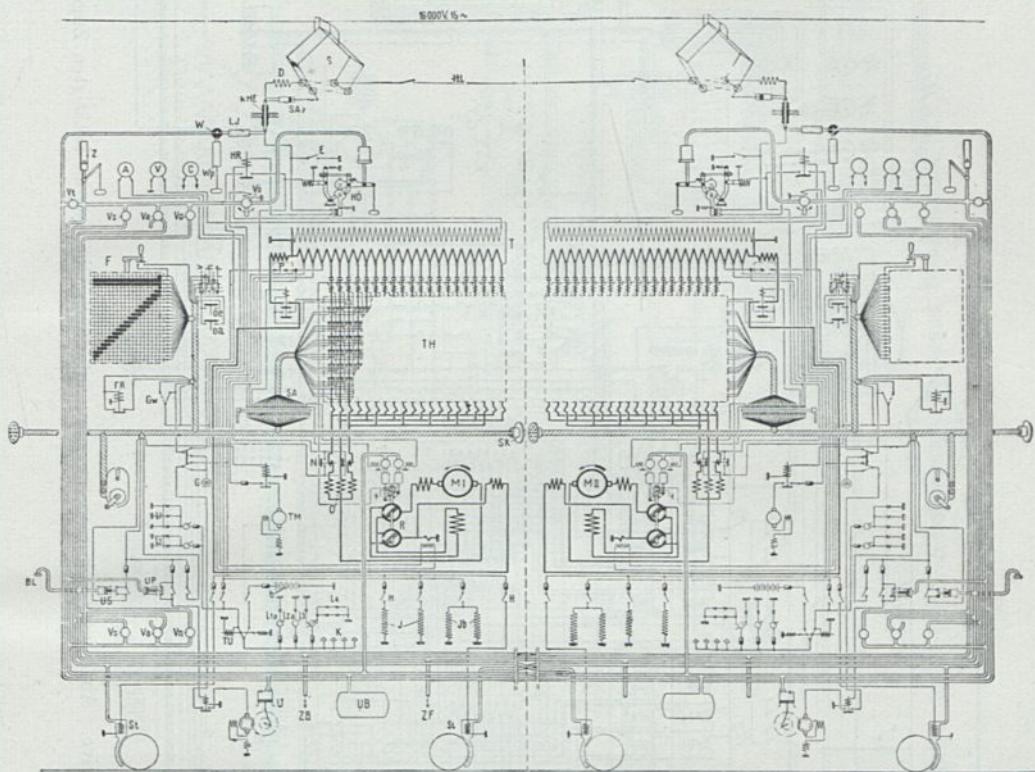


Abb. 330. Schaltbild der 1—C+C—1 Güterzug-Lokomotive der Riksgränsenbahn.
(S.S.W.).

A = Strommesser mit Skala für Zug-
BL = Bremsleitung für Zug [kraft
C = Geschwindigkeitsmesser
D = Drosselspule
E = Erdungsschalter [Kurbel
F = Führerschalter mit Totmann-
FR = Sicherheits-Relais
G = Steuerstrom-Steckdose
Gw = Wechselschalter
H = Handschalter
HL = Hochspannungs-Leitung auf den
Lokomotivedächern m. Trenn-
schalter
HO = Hochspannungs-Ölschalter mit
Luftdruck- u. Handbetätigung,
mit Fern-Ein- u. Ausschaltung
HR = Hochspannungs-Relais
J = Heißluftofen
Jb = Blindwellenlager-Heizung
K = Steckkontakt:
KHE = Kombinierte Hochspannungs-
Einführung
LJ = Luftisolator [3700 S
M I u. M II = Triebmotoren WBM

N = Niederspannungs-Relais
O = Schaltdziesselpule
P = Spannungsregler
R = Fahrtrichtungsumschalter mit
Druckluftbetätigung
S = Stromabnehmer
SAx = Stromabnehmer-Antriebszylin-
der
SAy = Vierfach-Abschalter [der
SK = Vierfach-Kabelkupplung
St = Sandtrockner
T = Haupttransformator
TH = Hüpfergerüst
TM = Ventilator-Motor
TU = Selbsttätiger Umschalter
U = Druckluftpumpe
UB = Druckluftbehälter
UP = Selbsttätiger Pumpenschalter
US = Selbsttätiger Steuerstrom-Ab-
schalter
V = Spannungsmesser [schalter
Va = Ventil f. d. selbsttätige Bremse
Vn = Ventil für die nichtselbsttätige
Bremse
Vo = Ventil für den Hochspannungs-
Ölschalter

Vs = Ventil für die Sandstreuer
Vt = Ventil für die Stromabnehmer
W = Dreiegehahn
WP = Handpumpe
Z = Pfeife
ZB = zur Bremse
ZF = zum Funktionsventil
b = Batterie für Notbeleuchtung
l1 = 3 Glühlampen à 16 NK im
Maschinenraum
l1a = 1 Glühlampe à 16 NK im Ma-
schinenraum
l2 = 2 Glühlampen à 50 NK in den
Streckenlampen unten
l2a = 1 Glühlampe à 50 NK in der
Streckenlampe oben [stand
l3 = 1 Glühlampe à 16 NK im Führer-
raum
l4 = 4 Glühlamp. à 1 NK f. Meßgeräte
v = Vorwärts
h = Halt
r = Rückwärts
oe = Ölschalter „Ein“
oa = Ölschalter „Aus“

Die hier beschriebenen drei Bauarten werden für Gleichstrom und Wechselstrom gebaut; die Schütze für beide Stromarten brauchen sich nur in der Zugspule zu unterscheiden, bzw. kann auch bei Wechselstrombetrieb für die Betätigung der Zugspulen Gleichstrom vorgesehen werden, indem hierdurch die Zugkraft der Zugspulen

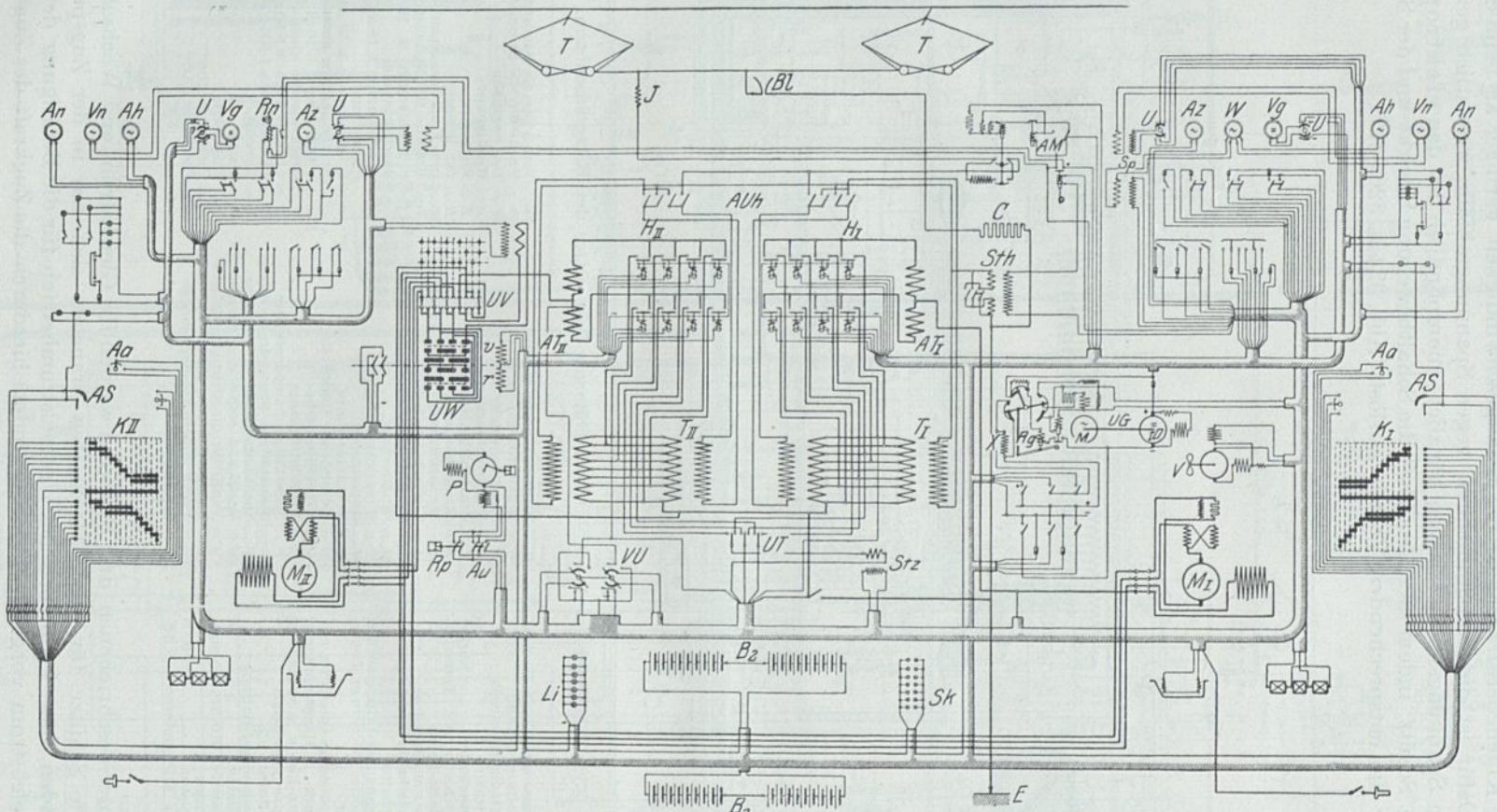


Abb. 331. Schaltplan der 2000 PS - C + C - - Lötschberg-Lokomotive. Abgestufte Schützensteuerung mit durch Gleichstrom betätigten Zugspulen. (M.F.O.).

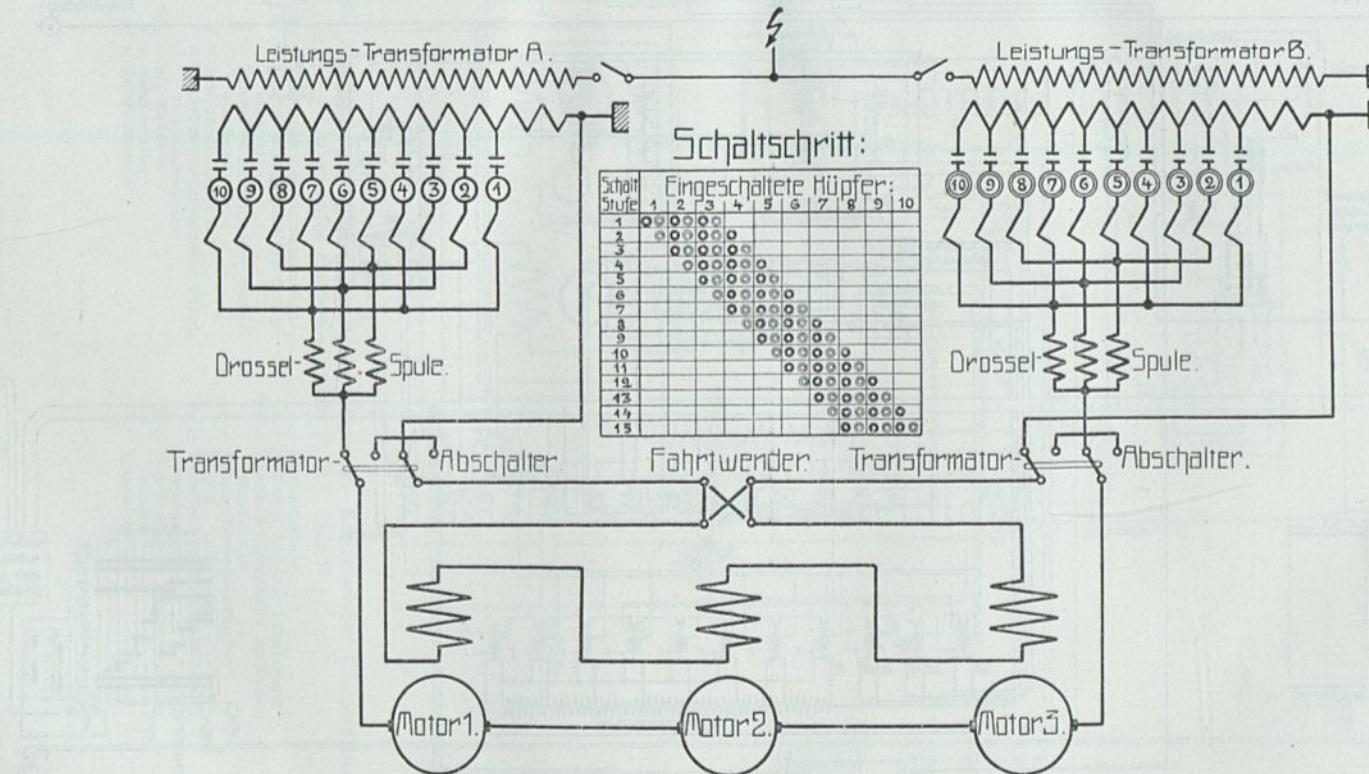


Abb. 332. Grundsätzlicher Schaltplan der *B + B + B*-Lokomotive der preuß. Staatsbahnen. (S.S.W.)

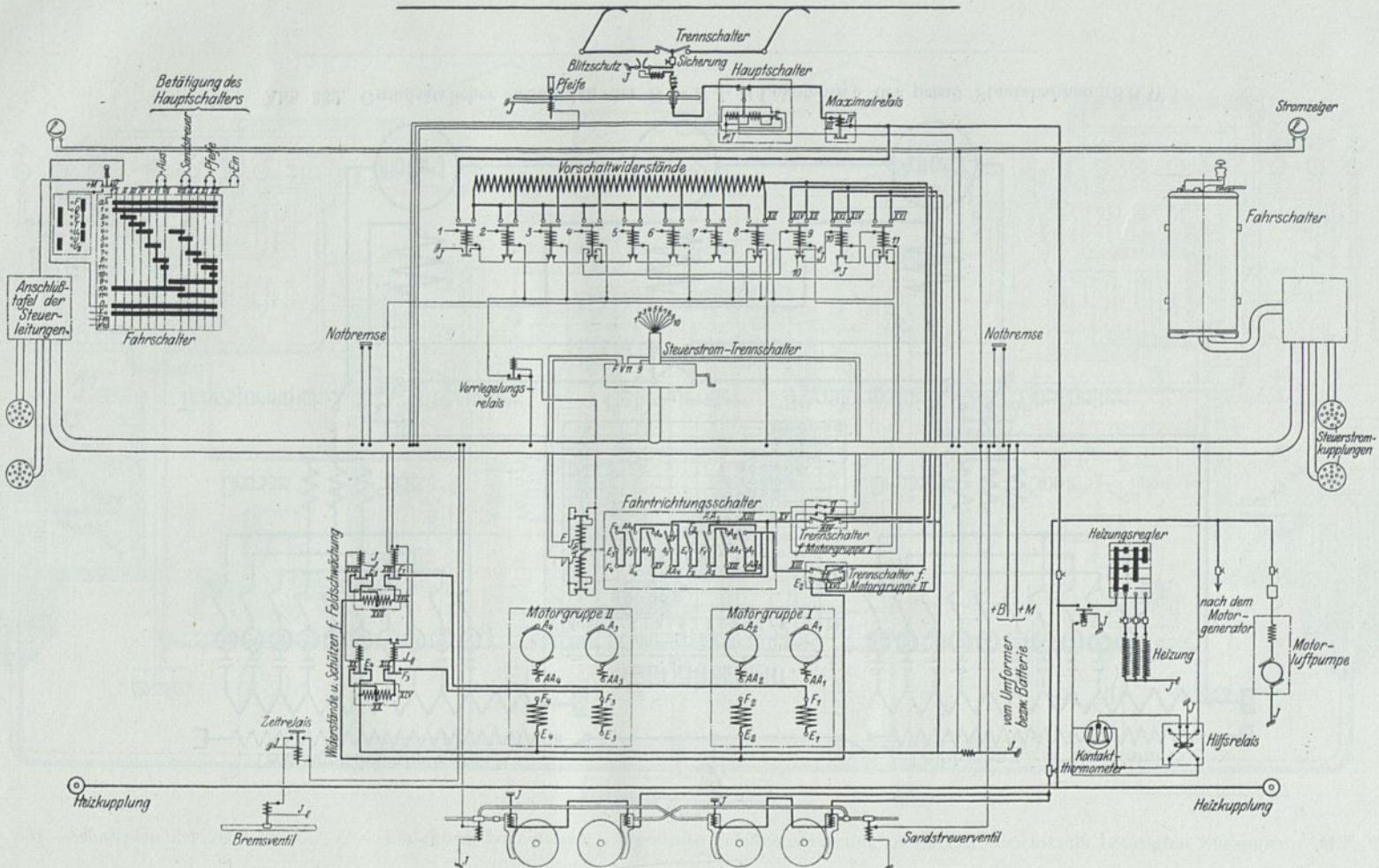


Abb. 335. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Saltsjöbahn. G.S., 1200 V, 4 Motoren je 150 PS, elektromagnetische Schützensteuerung.

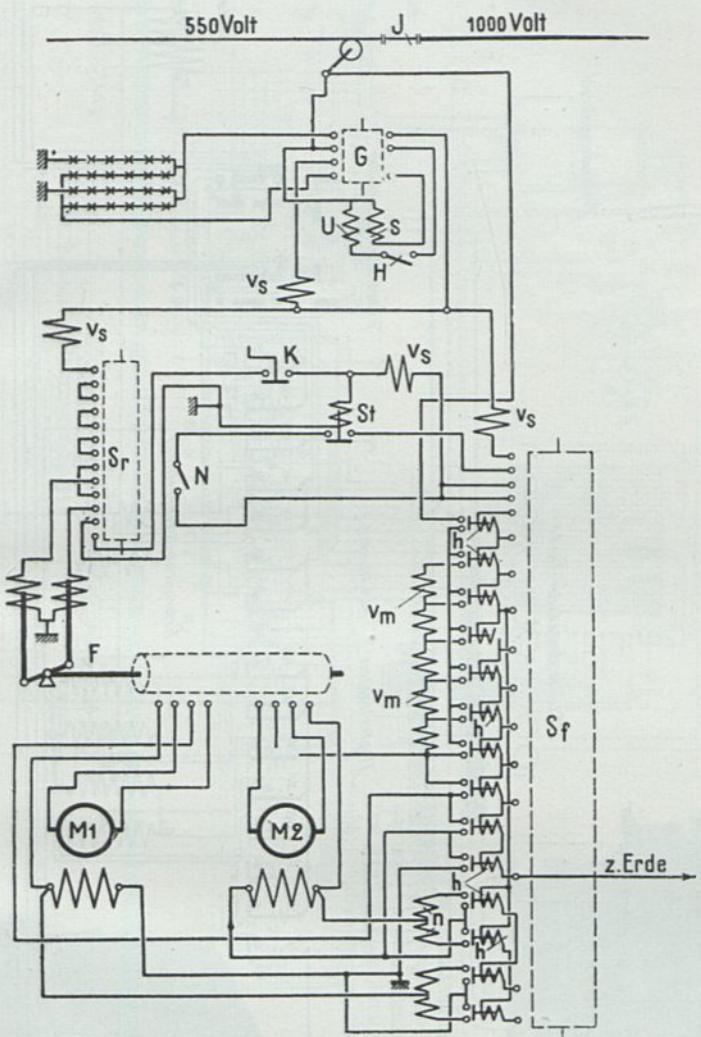
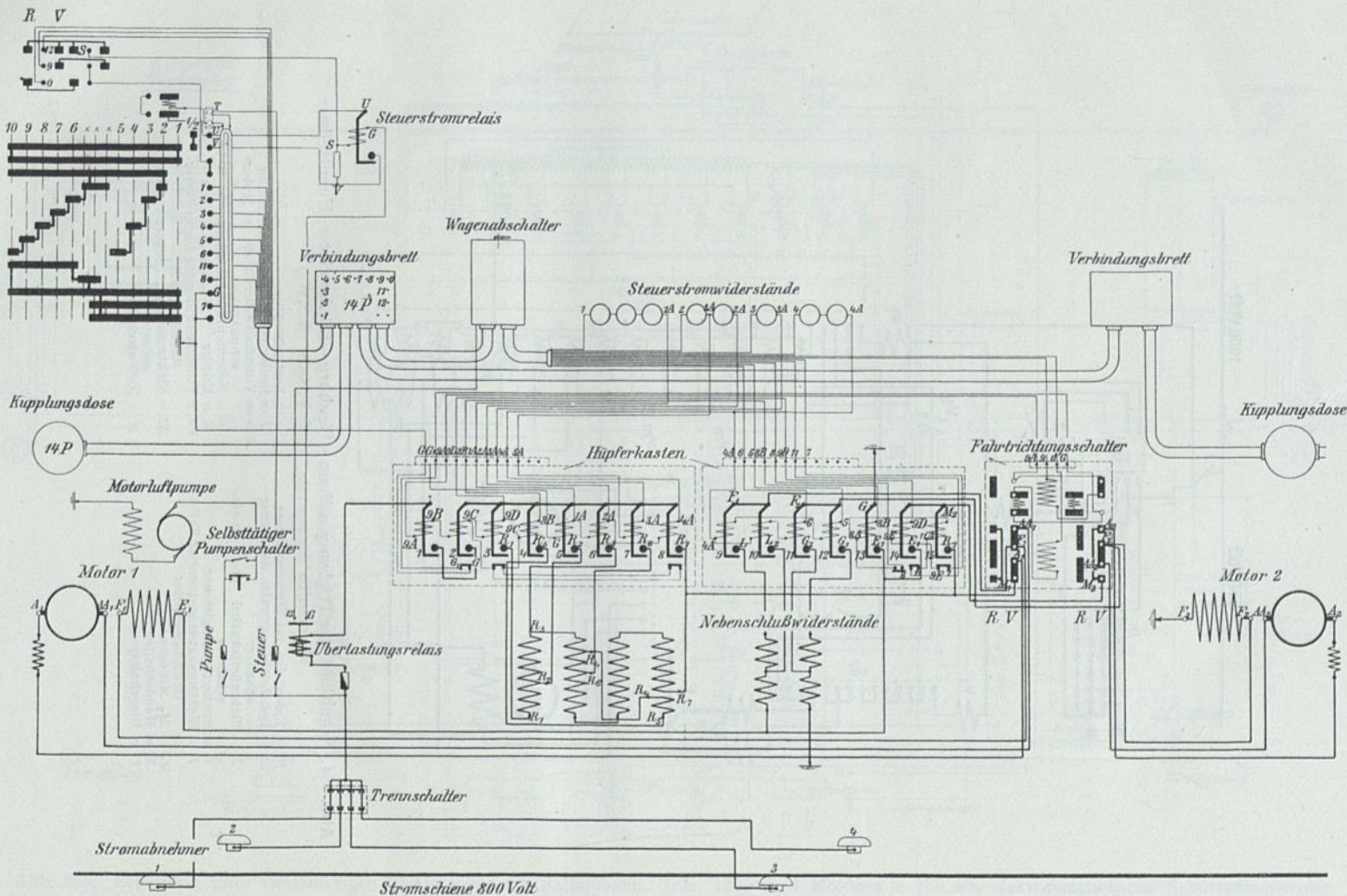


Abb. 334. Schaltbild der Triebwagen Bonn—Siegburg—Königswinter. Unmittelbare abgestufte Steuerung. 1000 V, G.S. (S.S.W.)

S_f = Fahrwalze des Steuerschalters
 S_r = Fahrrichtungswalze des Steuer-
schalters
 K = Sicherheitskurbel des Steuer-
schalters
 G = Spannungsausgleicher
 F = Elektromagnet gesteuerter Fahrt-
richtungsschalter
 M_1 = M_2 Motoren
 H = Hand-schalter
 U = Umschaltspule

s = Festhaltespule
 J = Isolierter Teil der Fahrleitung
 V_m = Vorschaltwiderstände im Motorstromkreise
 n = Nebenschlußwiderstände
 h = Hüpfer
 V_s = Vorschaltwiderstände im Steuerstromkreise
 St = Elektromagnet. Steuerstromeinschalter
 N = Notausschalter



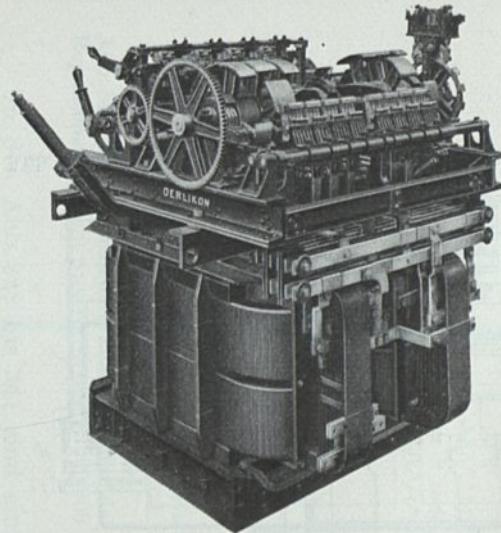


Abb. 337. Lokomotiv-Kontroller für Einphasen-Wechselstrom. 3000 Amp., 600 Volt, 12 Stufen. Liegende Anordnung zum Aufbau auf Transformator oder stehende neben dem Transformator. Antrieb durch Elektromotor oder Luftzylinder vermittelst elektrischer, pneumatischer od. elektropneumatischer Fernsteuerung. (M.F.O.)

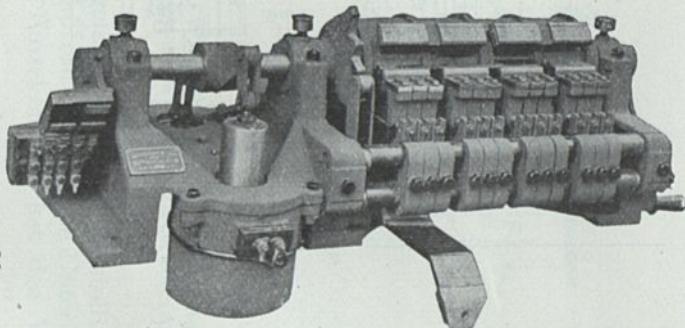


Abb. 337a. Elektromagnetisch betätigter Fahrtwender der 1 — E — 1-Lokomotive der Lötschbergbahn. (M.F.O.)

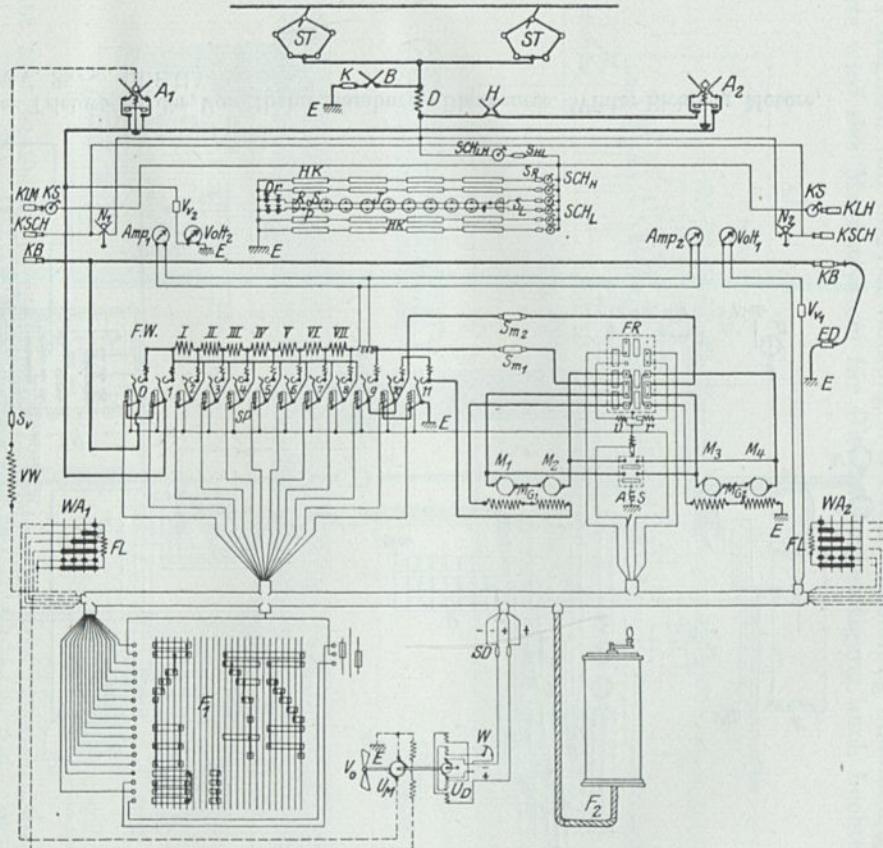


Abb. 336. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Tátrabahn. (S.S.W.)

Leistung 4×60 PS/h
Stromart Gleichstrom
Spannung 1650 V. = (2×825)

Steuerung: indirekt, elektromagnet. Einzelschalter.
Bremsen: Kurzschluß-, Elektromagn. Schienen-, Druckluft.

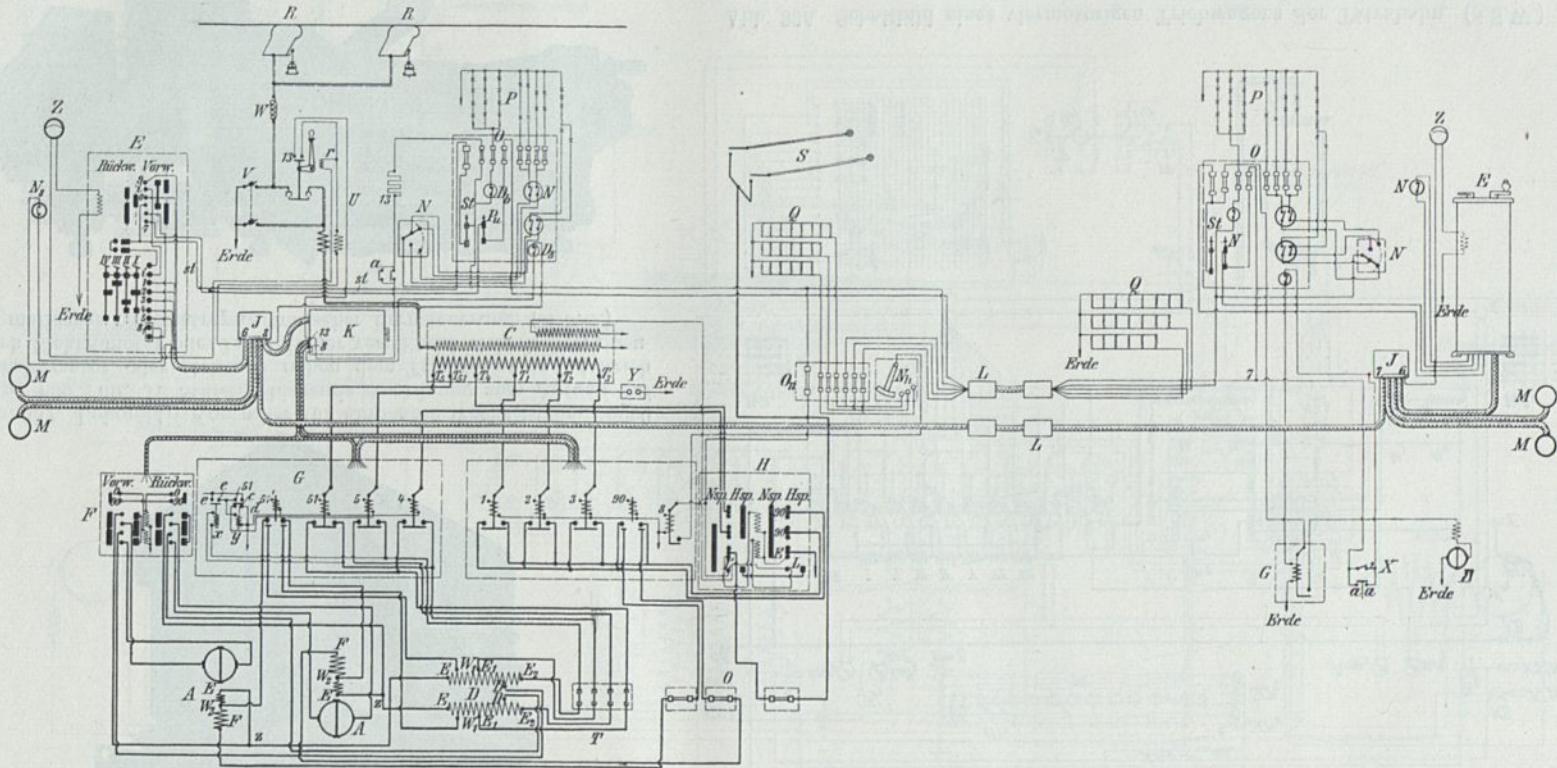


Abb. 338. Abgestufte Vielfachsteuerung mit Einzelschaltern der Triebwagen der Vorortbahn Hamburg—Blankenese. Winter-Eichberg Motore, 6000 V, 25 ~. (A.E.G.)

der Magnete von den Schwankungen der Linienspannung unabhängig wird, andererseits wird das Magnetsystem für Gleichstrombetätigung auch leichter.

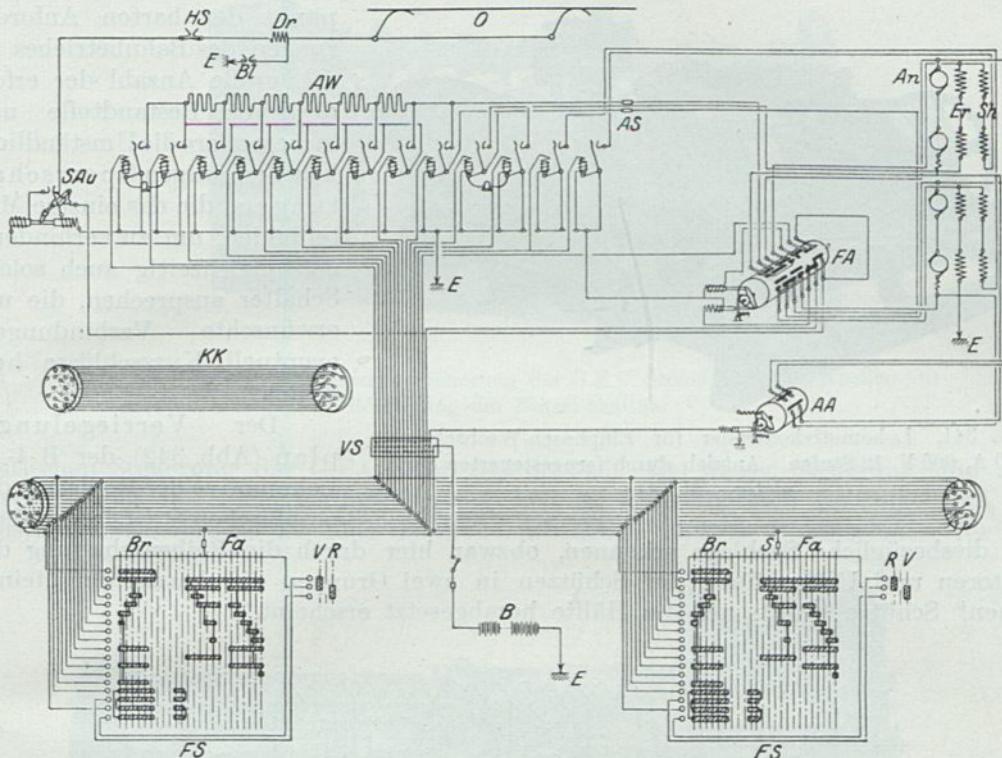


Abb. 339. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Bahn Bellinzona—Mesocco G.S., 1500 V.
Steuerung mit Einzelschaltern zwei Motoren dauernd in Reihe. (M.F.O.)

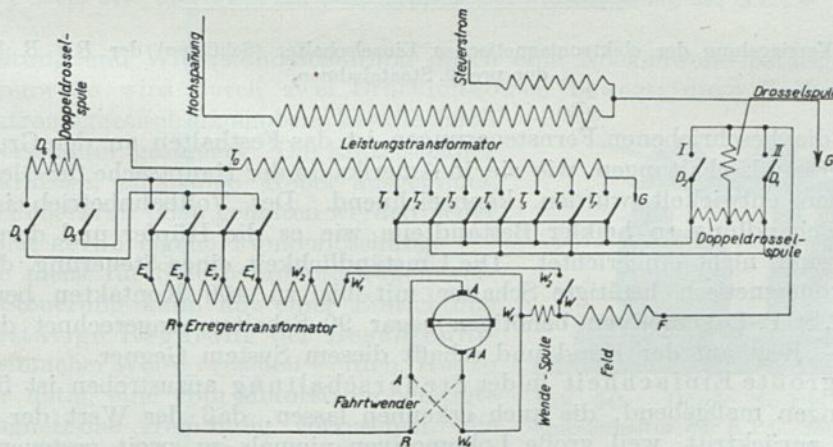


Abb. 340. Schaltprinzip der Fahrstromkreise der 800 PS — 1 — C W.S.-Lokomotive der Mittenwaldbahn, Repulsionsmotor mit Ankererregung 15000/800 Volt, elektromagnetische Schützensteuerung. (A.E.G.U.)

In den Abb. 328 bis 341 sind einige Schaltungen dieser Art dargestellt.

Die bei der mittelbaren Steuerung mittelst Schützen vorhandene Unterteilung der Schaltvorgänge auf eine entsprechende Anzahl Einzelschalter hat den Vorteil,

daß im Betrieb auftretende Schäden auf die betroffenen Schalter beschränkt bleiben, so daß ein schadhafter Schalter die Steuerung noch nicht behindert.

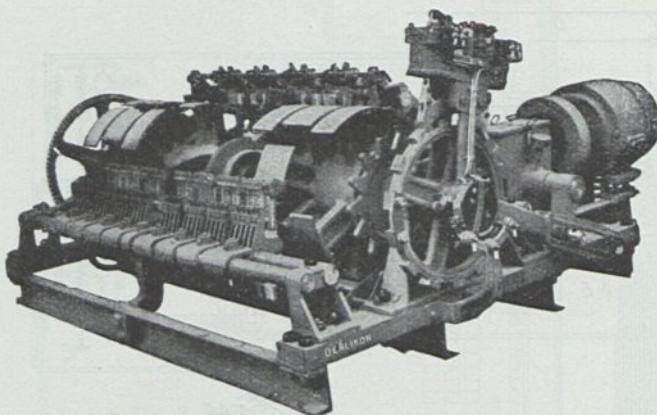


Abb. 341. Lokomotivkontroller für Einphasen-Wechselstrom. 3000 A, 600 V, 12 Stufen. Antrieb durch ferngesteuerten Servomotor. (M.F.O.)

die diesbezügliche Sachlage erkennen, obzwar hier durch die Reihenschaltung der Motoren und Unterteilung der Schützen in zwei Gruppen die Anzahl der „feindlichen“ Schütze bereits auf die Hälfte herabgesetzt erscheint.

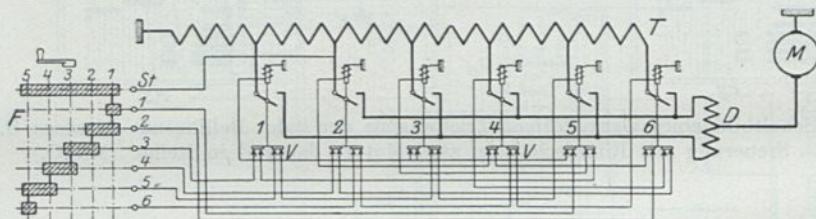


Abb. 342. Verriegelung der elektromagnetischen Einzelschalter (Schützen) der B+B Lokomotive der preuß. Staatsbahnen.

Für die beschriebenen Fernsteuerungen ist das Festhalten an den Grundsätzen der Widerstandsschaltungen, wie sie in Amerika in der Hauptsache für Gleichstromstadtbahnen entwickelt wurden, kennzeichnend. Der Vollbahnbetrieb ist jedoch auf die Behandlung so heikler Bestandteile wie es die Hüpfer und deren Sperrkontakte sind, nicht eingerichtet. Die Umständlichkeit einer Steuerung, die bis zu 38 elektromagnetisch betätigten Schalter mit bis zu 400 Kontakten benötigt — die Ch. M. St. P.-Lokomotiven benötigen sogar 90 Schalter, ungerechnet die Fahrtwender — liegt auf der Hand und schafft diesem System Gegner.

Die größte Einfachheit in der Steuerschaltung anzustreben ist für neuere Ausführungen maßgebend, die auch erkennen lassen, daß der Wert der Vielfachsteuerung zurücktritt, weil große Lokomotiven niemals zu zweit gesteuert werden müssen. Kommt dieser Ausnahmefall vor, so ist eine getrennte Steuerung unbedenklich durchführbar.

Wenn trotzdem an dieser Steuerungsart vielfach mit gutem Erfolg festgehalten wird, so liegt dies daran, daß deren Bestandteile durch die jahrelange Erprobung im Betriebe mit einem sehr hohen Grad der Vollkommenheit und Betriebssicherheit erzeugt werden können.

Unerwünscht vom Standpunkt der harten Anforderungen des Bahnbetriebes ist die große Anzahl der erforderlichen Bestandteile und insbesondere die Umständlichkeit der nötigen Sperrschaltungen, die das einzige Mittel bilden, um zu verhindern, daß gleichzeitig auch solche Schalter ansprechen, die unerwünschte Verbindungen, eventuell Kurzschlüsse herstellen.

Der Verriegelungsplan (Abb. 342) der B+B-Lokomotive der Reihe 551 der preußischen Staatsbahnen läßt

9. Die P.C.-Zugsteuerung der General-Electric-Co. Die Vereinfachung des Systems ohne Preisgabe der Vorteile der Einzelschalter ist das Ziel der elektropneumatischen Steuerung der G.E.C.

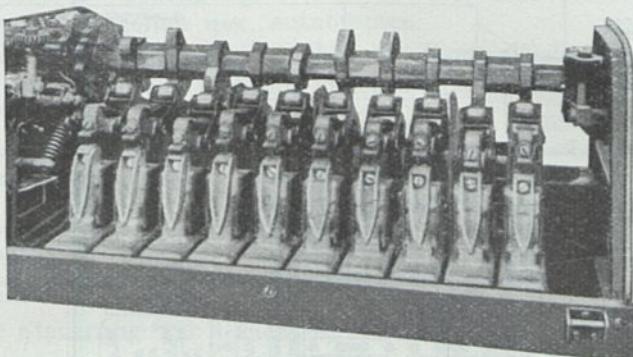


Abb. 343. Elektropneumatische Steuerung der G.E.C. Steuerwelle mit Nocken zur Betätigung der Einzelschalter.

matischen Steuerung der G.E.C. (Abb. 343 bis 346). Bei dieser Steuerung sind alle Steuerbehelfe in einem verhältnismäßig kleinen Rahmengestell vereinigt und die umständliche Schutzverriegelung dadurch entbehrlich, daß die Einzelschalter für die

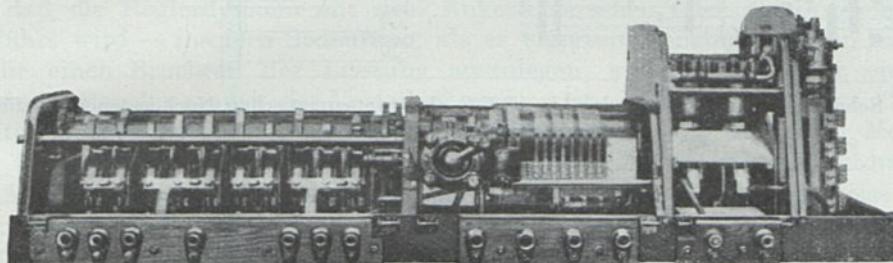


Abb. 344. Sperrwalze mit Schaltzylinder der P.C.-Steuerung der G.E.C.

R.P.-Schaltung und Widerstandsschaltung durch eine Nockenwelle betätigt werden. Die Nockenwelle wird durch zwei Druckluftkolben bewegt; diese Kolben werden durch elektromagnetisch angehobene Ventile durch den Führerschalter gesteuert. Die Einzelschalter sind als kräftige, einarmige Hebel ausgebildet, die durch Federkraft offen gehalten werden; jeder Schalter hat seine eigene Funkenlöschung.

Diese meist für Stadtbahnmotorwagen verwendete Steuerung kann mit einer Einrichtung für selbsttätige Regelung der Beschleunigung in einfacher Weise versehen werden. Hierzu ist es nur nötig, eine vom Motorstrom betätigtes elektromagnetische Hemmung vorzusehen, die das Weiterschalten der Nockenwelle insolange verhindert, bis der Motorstrom auf den vorgeschriebenen Wert gesunken ist. Es ist einzusehen, daß es hierzu genügt, das angehobene Steuerventil für den Druckluftzylinder der Nockenwelle wieder zu sperren.

Nachdem es im Betrieb andererseits vorkommen kann, daß es zwecks Bewältigung einer nicht vorgesehenen Last nötig wird, die solcherart begrenzte Zug-

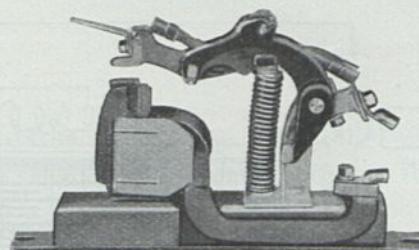


Abb. 345. Durch Nocken betätigter Einzelschalter der E.P.C. Steuerung der G.E.C.

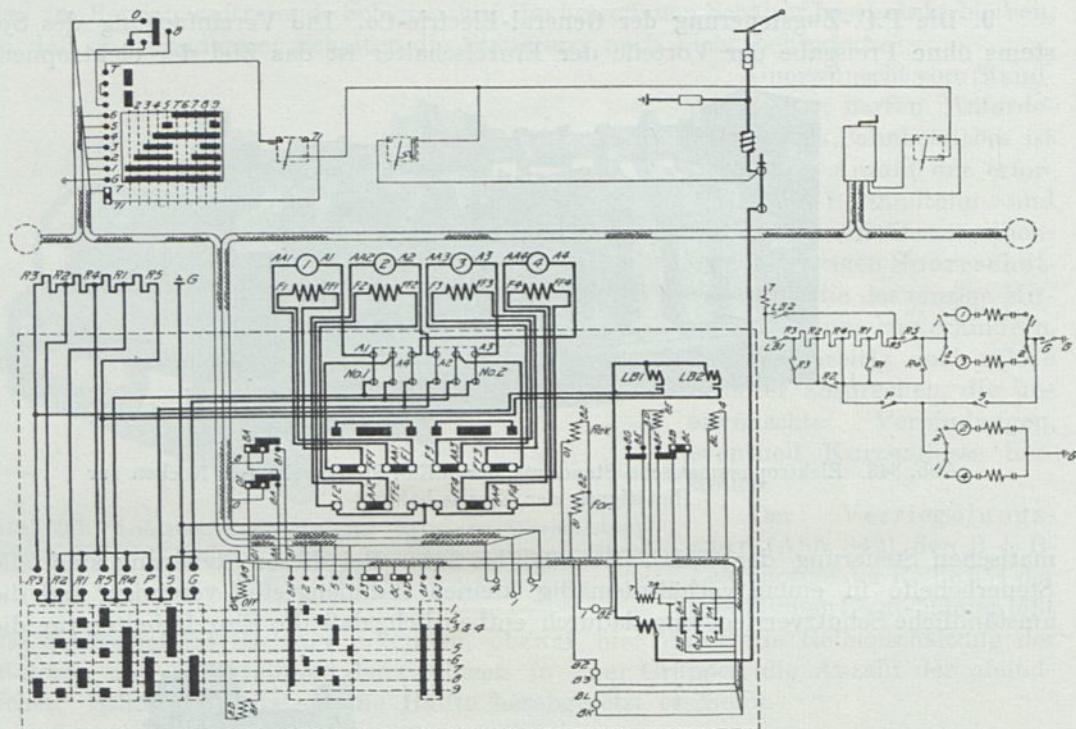


Abb. 346. Schaltprinzip und Schaltplan der G.E.C.-elektropneumatischen Nockensteuerung für einen viermotorigen Triebwagen.

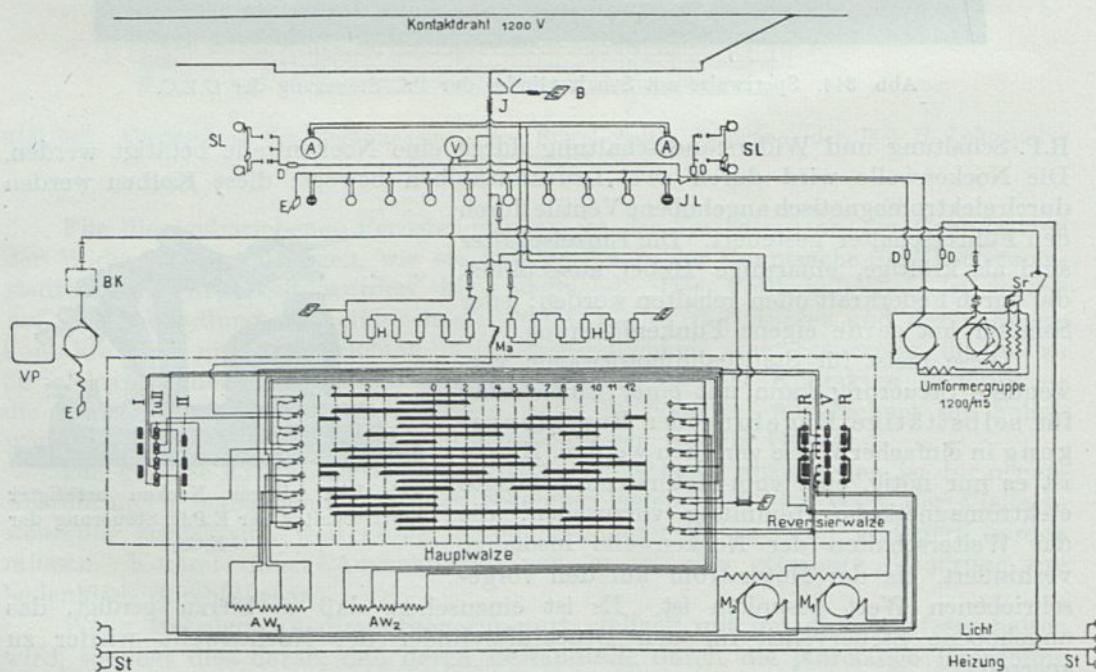


Abb. 347. Fahrtschalter mit Nockensteuerung der Einzelschalter. Bahn Biasca—Acquarossa. G.S. 1200 V. (B.B.C.)

kraft zu überschreiten, wird ein Schalter vorgesehen, durch welchen die erwähnte Hemmungsspule durch den Fahrer vorübergehend kurzgeschlossen werden kann.

Die Druckluft für die Betätigung dieser Steuerung wird der stets vorhandenen Anlage für das Bremsen, Pfeifen usw. entnommen.

Durch eine auf der Nockenwelle angebrachte Kontrollschaltung wird der verlangte Schritt der Schaltung für mehrere gleichzeitig gesteuerte Fahrzeuge erzielt.

Zur Verbindung der gemeinsam gesteuerten Fahrzeuge sind siebenadrige Steuerkabel nötig. Diese Steuerung wird gebaut für Fahrzeuge, die mit zwei 250 PS-600 Volt-Motoren oder mit vier 150 PS-600 Volt-Motoren ausgerüstet sind, schließlich ist auch eine Type für vier 70 PS-Motoren entwickelt worden.

Diese Steuerung wird auch für die Betriebsspannung von 1500 Volt mit entsprechend verstärkter Isolation erzeugt.

Eine andere Form der Nockensteuerung ist in Abb. 347 dargestellt.

10. Stufenlose Steuerung für Gleichstrom. Eine stetig veränderliche Geschwindigkeitsregelung kann gegebenenfalls durch Vorschaltung eines Motor-generators, dessen Dynamo fremd erregt wird, erzielt werden.

Diese Lösung erscheint zunächst unwirtschaftlich, weil die Motorleistung am Fahrzeug dreimal vorhanden sein muß, indem bei Stillstand die volle Leistung abzudrosseln ist.

In Verbindung mit der hier beschriebenen Vielfach-Reiheneinbauschaltung gewinnt diese Schaltung — insbesondere wenn der Kunstgriff vorgesehen wird, daß die Reglerdynamo mit zwei Ankern versehen oder als Doppelmaschine ausgeführt wird — insofern Bedeutung, als es einerseits möglich ist, den Umformer nur für einen Bruchteil der Leistung auszulegen, andererseits außer einer rein stufenlosen Regelung auch der Vorteil zu erzielen ist, daß man z. B. statt 12 Motor-einheiten nur deren 6 bzw. bei der vollen Betriebsspannung an jedem Motor nur deren 4 vorzusehen braucht. Nachdem die Empfindlichkeit der Kollektorapparate beim Anfahren mit Widerständen eine große Stufenzahl und vergleichsweise schwere Widerstände erfordert, wird es trotz Umformung eines Teiles der zugeführten Arbeit möglich sein ohne Mehrgewicht auszukommen und eine höhere Stromwirtschaft zu erzielen.

Die vom Verfasser angegebene Schaltung Abb. 348 zeichnet sich weiterhin durch äußerste Einfachheit der Steuereinrichtung aus, indem der Fahrschalter für ein Triebfahrzeug mit sechs Motoren nur sechs Stufen aufweist und zur Herstellung des Stromlaufes ohne Unterbrechung der Leistung bei rein stetiger Geschwindigkeitsregelung nur 17 Einzelschalter nötig sind.

Die Leistung des Fahrzeuges sei

$$L = (2E)(3J),$$

wo E und J die Motorspannung bzw. Motorstromstärke bezeichnen. Der Umformer wird mit $\frac{1}{8}$ der Fahrzeugleistung bemessen und erhält zwei Dynamos, die je für $1\frac{1}{2}$ Motorstromstärken und $\frac{1}{4}$ Motorspannung bemessen sind.

Vom Stillstand bis $\frac{1}{4}$ der Fahrgeschwindigkeit speist je eine Reglerdynamo drei nebeneinander geschaltete Motore. In bezug auf die Stromstärke ist die Reglerdynamo in diesem im allgemeinen vergleichsweise kurzen Zeitraum 100% überlastet. Die verlangte Stromstärke festhaltend, wird die Spannung der Regler-dynamo bis auf ihren Vollwert $\frac{E}{4}$ gesteigert, wobei $\frac{1}{4}$ der Fahrgeschwindigkeit, die der Eigencharakteristik der Motore bei voller Spannung entspricht, erreicht wird.

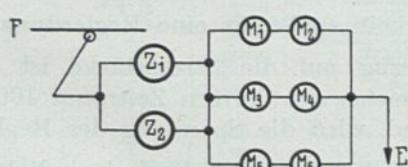
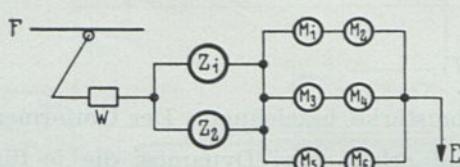
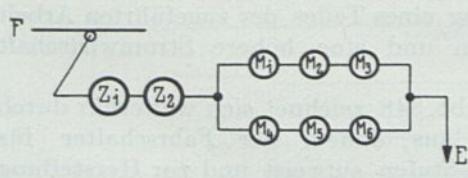
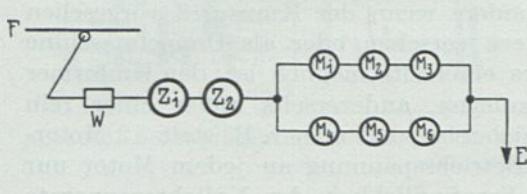
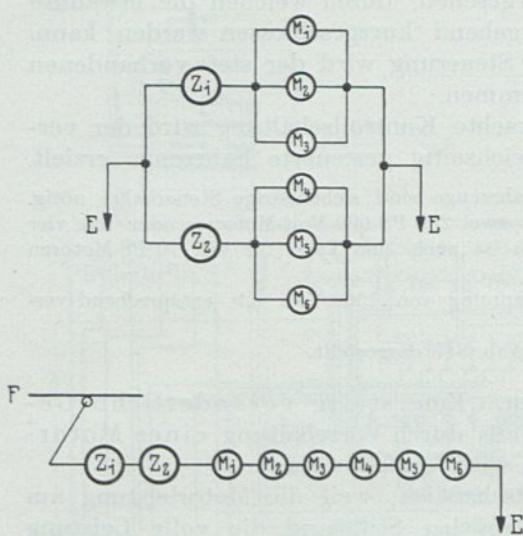
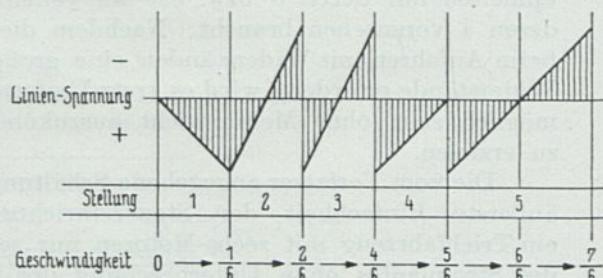


Abb. 348. Charakteristische Stellungen einer Schaltung für stetige und verlustlose Geschwindigkeitsregelung für ein Triebfahrzeug mit sechs Motoren. Z_1 , Z_2 Zusatzmaschinen, M_1 bis M_6 Motoren. (System des Verfassers.)

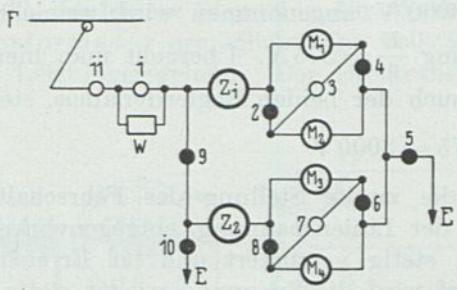
Stellung	Schalter										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	○	●	○	●	●	●	○	●	●	●	○
2	●	○	●	○	○	○	●	●	●	●	○
3	●	●	○	●	○	●	●	○	●	●	●
4	○	●	○	●	●	●	○	●	●	●	●
5	●	●	○	●	●	●	○	●	●	●	●

○ Schalter geöffnet
● " geschlossen

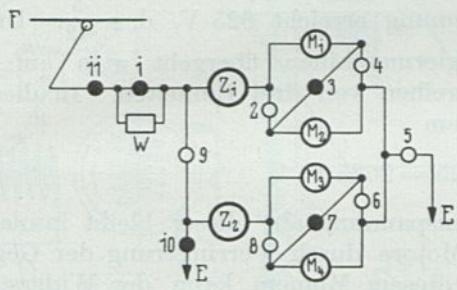
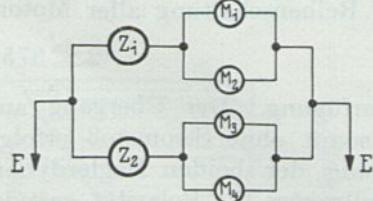
Zu Abb. 349.
Schaltschnitt.



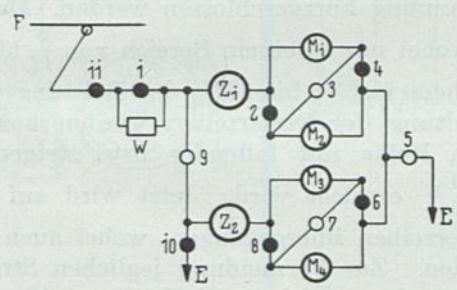
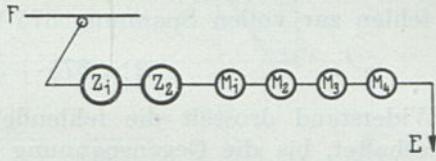
Zu Abb. 349.
Regelung der Zusatzspannung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und den Schalterstellungen.



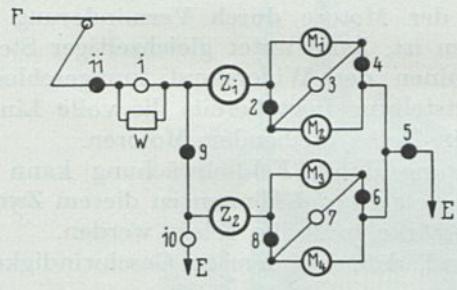
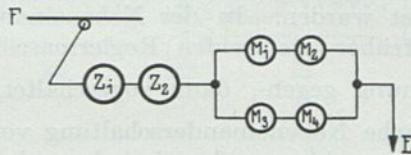
Anfahren: Geschwindigkeit
0 bis $\frac{V}{6}$



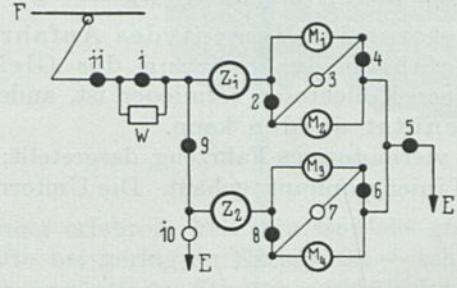
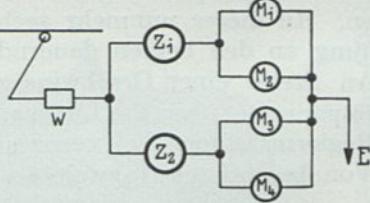
Geschwindigkeit
 $\frac{V}{6}$ bis $\frac{V}{3}$



Geschwindigkeit
 $\frac{V}{3}$ bis $\frac{2V}{3}$



Geschwindigkeit
 $\frac{2V}{3}$ bis $\frac{2.5V}{3}$



Geschwindigkeit
 $\frac{2.5V}{3}$ bis $\frac{3V}{3}$

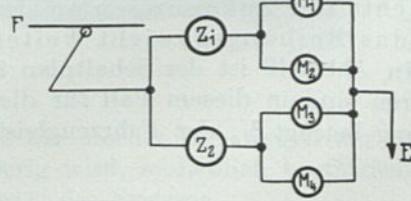


Abb. 349. Schaltprinzip einer stetigen Geschwindigkeitsreglung für ein Triebfahrzeug mit vier Motoren. Z_1, Z_2 Zusatzmaschinen, M_1 bis M_4 Motoren. (System des Verfassers)

Wenn die Linienspannung z. B. mit 3000 V angenommen wird, erreicht in dieser ersten Schaltstellung die Motorspannung $\frac{E}{4} = 375$ V. Übergeht man hierauf in die Reihenschaltung aller Motoren und auch der beiden Reglerdynamos, stehen

$$2 \times 375 + 6 \times 375 = 3000 \text{ V}$$

zur Verfügung. Der Übergang auf diese, die zweite Stellung des Fahrschalters, kann somit ohne Stromstoß erfolgen. Die der Linienspannung entgegenwirkende Spannung der beiden Reglerdynamos wird stetig verringert und bei Erreichung des Nullwertes die Polarität geändert, hierauf wird die Spannung wieder stetig bis zum Höchstwert gesteigert. Die Motorspannung erreicht 625 V, d. s. $\frac{5}{12}$. Unter Beibehaltung der Reihenschaltung der Reglermaschinen übergeht man auf die Nebeneinanderschaltung von je zwei Motorreihen von drei Einheiten. In diesem Fall fehlen zur vollen Spannung 375 V indem

$$2 \times 375 + 3 \times 625 = 2625 \text{ V.}$$

Ein Widerstand drosselt die fehlende Gegenspannung ab; dieser bleibt insolange eingeschaltet, bis die Gegenspannung der Motore durch Verringerung der Gegen- spannung um 375 V gesteigert wurde. In diesem Moment kann der Widerstand unter gleichzeitiger Erhöhung der Reglerspannung kurzgeschlossen werden. Damit ist die Hälfte der Geschwindigkeit erreicht, wobei nur in einem Bereich von $\frac{5}{12}$ bis $\frac{6}{12}$ ein Widerstand vorgeschaltet war, in welchem 12,5% bis 10% der Leistung vernichtet wurden. In der Nebeneinanderschaltung der Dreierreihen werden hierauf wie früher die beiden Reglermaschinen in Reihe mit fallender bzw. steigender Spannung gegen-, dann zugeschaltet, bis $\frac{10}{12}$ V erreicht wird. Jetzt wird auf die dreifache Nebeneinanderschaltung von Zweierreihen übergegangen, wobei auch die Reglermaschinen nebeneinander gelegt werden. Zur Vermeidung jeglichen Stromstoßes muß ein Widerstand vorgeschaltet werden, welcher 125 V, d. s. 2,4% der Leistung, verzehrt. Bis die Gegen-EMK der Motore durch Verminderung der Gegenspannung um diesen Betrag gewachsen ist, kann unter gleichzeitiger Steigerung der Gegenspannung der Reglermaschinen der Widerstand kurzgeschlossen werden. In dieser nunmehr sechsten Schaltstellung liegt bereits die volle Linienspannung an den beiden dauernd zu weit in Reihe bleibenden Motoren.

An Stelle einer Geschwindigkeitssteigerung durch Feldschwächung kann die Zusatzspannung über die Linienspannung gesteigert und können zu diesem Zwecke die Reglermaschinen bei verringrigerter Stromstärke in Reihe gelegt werden.

Von besonderer Tragweite ist der Umstand, daß, nachdem im Geschwindigkeitsbereich vom Stillstand bis $\frac{v}{4}$ die Motoren nur mit $\frac{1}{4}$ der Betriebsspannung arbeiten, die Notwendigkeit entfällt die Motoren im Moment des Anfahrens in Reihe zu schalten, wodurch die Gefahren der Störung des Gleichgewichts der Spannungen an den einzelnen Kollektoren vermieden ist, andererseits das Reibungsgewicht weiter ausgenutzt werden kann.

In Abb. 349 ist der Schaltplan für ein viermotoriges Fahrzeug dargestellt; die Motoren sind in diesem Fall für die volle Linienspannung gebaut. Die Umformerleistung beträgt $\frac{1}{6}$ der Fahrzeugleistung.

11. Stufenlose Steuerung für Wechselstrom. Die Steuerung mittelst Drehtransformator ermöglicht eine vollständige allmähliche Spannungs- (Abb. 350) bzw. Leistungsregelung. Der Drehtransformator hat jedoch keine allgemeine Ein-

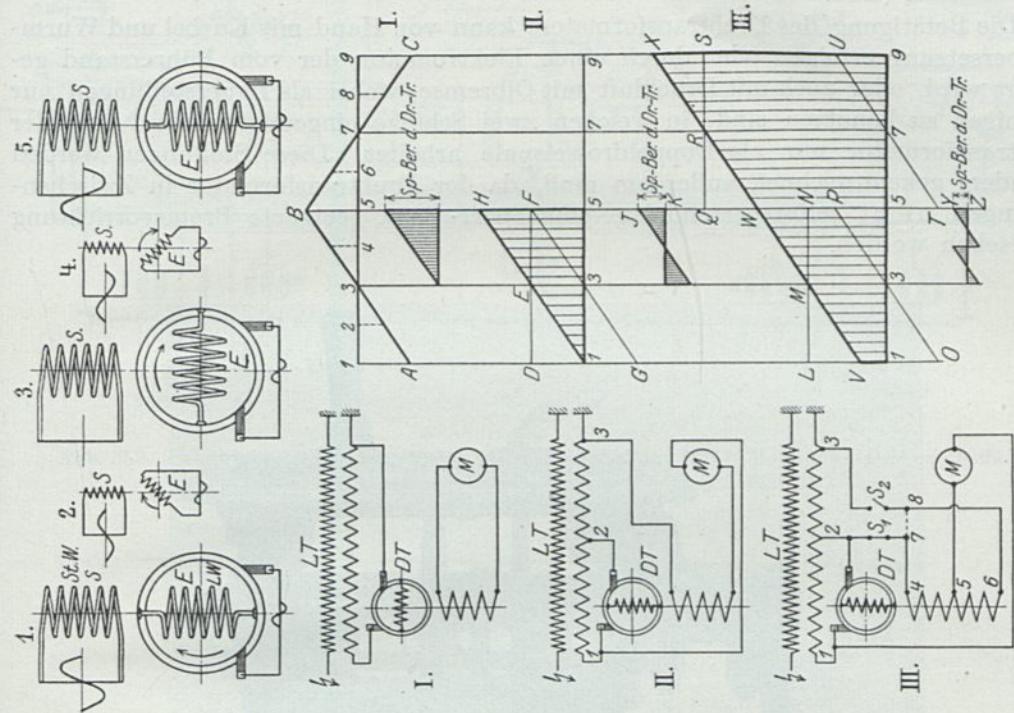


Abb. 351. Stufenlose Geschwindigkeitsregelung mit Drehtransformator.
(Wachsmuth).

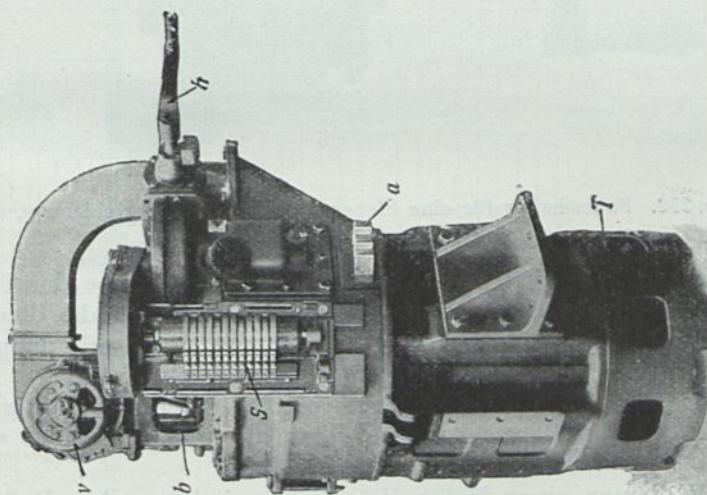


Abb. 350. Drehstromtransformator d. D-Güterzuglokomotive
— E.G. 505 — der preuß. Staatsbahn für stetige Geschwin-
digkeitsregelung. (S.S.W.)

führung erfahren, weil sein Gewicht groß wird, die Mechanik — wegen der großen Kräfte bei geringster Exzentrizität — sehr schwierig wird, schließlich beeinträchtigen seine ungünstigen Streuungsverhältnisse den $\cos \varphi$ des Systems.

In seiner einfachsten Form müßte derselbe überhaupt die volle Leistung der gesteuerten Motoren umformen, woraus seine Unbrauchbarkeit ohne weiteres folgt.

In Verbindung mit dem Stufentransformator kann die vollständig stufenlose Regelung erzielt werden, wobei man aus praktischen Gründen bis auf $\frac{1}{6}$ Leistung kommen und eine Spannungsregelung in den Grenzen von etwa 70 bis 460 Volt erzielen kann (Abb. 351).

Die Betätigung des Drehtransformators kann von Hand mit Kurbel und Wurmräderübersetzung erfolgen oder durch einen Elektromotor, der vom Führerstand gesteuert wird, oder auch mit Druckluft mit Ölremse, wobei als Dauerstellungen nur diejenigen zu benützen sind, in welchen zwei Schütze eingeschaltet sind und der Drehtransformator nur als Doppeldrosselpule arbeitet. Diese Stellungen werden besonders gekennzeichnet, außerdem muß, da der Drehtransformator in Zwischenstellungen nicht selbstsperrend ist, eine Sperr- bzw. geeignete Bremsvorrichtung vorgesehen werden.

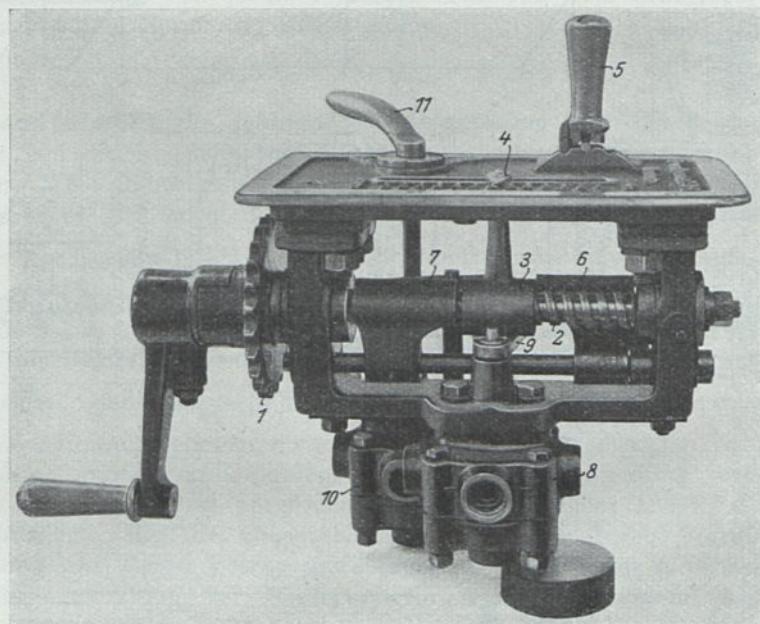


Abb. 352. Fahrshalter für eine Steuerung mit Bürstenverschiebung. (B.B.C.)

12. Steuerung mit Bürstenverschiebung. In der Gruppe der Steuerungen mit vollständig allmählicher Geschwindigkeitsänderung gehört die Steuerung mittelst Bürstenverschiebung, die bei den Repulsionsmotoren mit doppeltem Bürstensystem, System Déri von B.B.C., ausgeführt wird (Abb. 352, 353). Da der Repulsionsmotor für zukünftige Ausführungen zufolge seiner ungünstigen elektrischen Eigenschaften kaum in Betracht kommt, hat diese Regelmethode mehr geschichtliches Interesse.

Die B.E.W. bauen einen Motor, der als Vermischung eines Reihenschlußmotors mit einem Induktionsmotor angesehen werden kann; zu seiner Geschwindigkeitsregelung können zweierlei Methoden herangezogen werden. Der Transformator bekommt vergleichsweise wenige Stufen, innerhalb welchen eine beschränkte Bürstenverschiebung erfolgt.

Die B.E.W.-Steuerung (Abb. 354) bedient sich eines Transformatoren, der in ähnlicher Weise geschaltet wird, wie es beim Drehtransformator gezeigt wurde. Dieses System benötigt für eine 16stufige Schaltung nur mehr 13 Schütze.

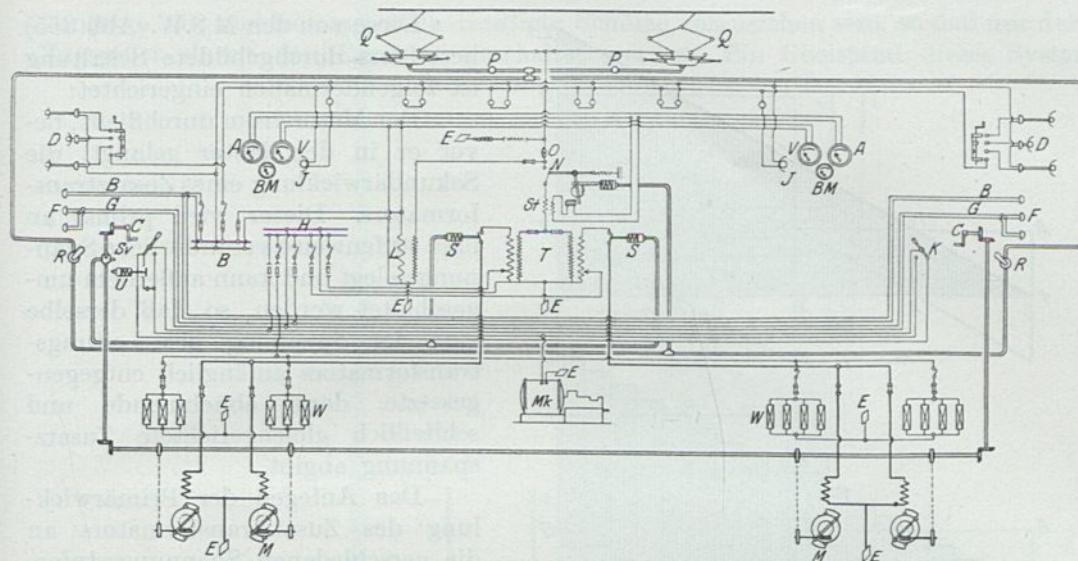


Abb. 353. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Bahn Martigny—Orsière, 5000 V, W.S., Steuerung mit Bürstenverschiebung. (B.B.C.)

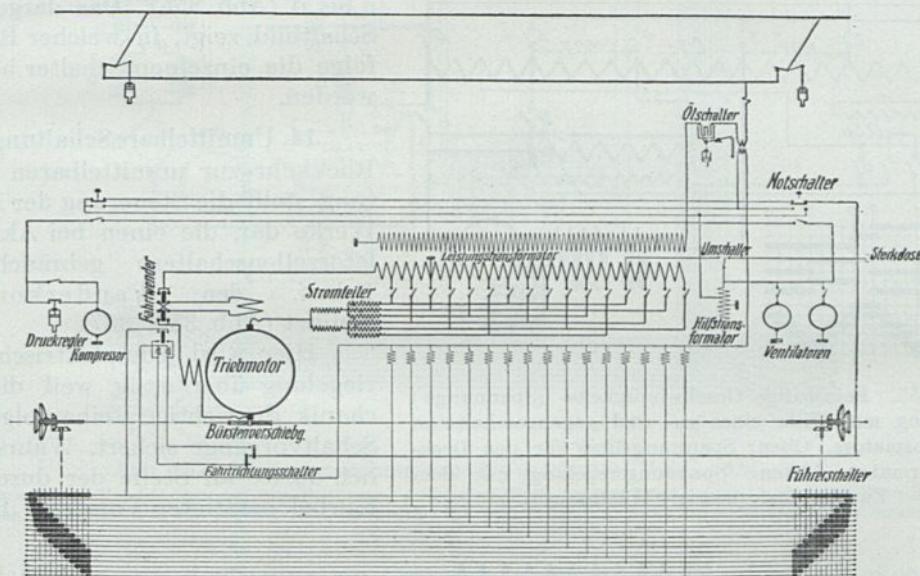


Abb. 354. Schaltbild der 1—D—2—3000 PS-Lokomotive, Reihe 235 der preuß. Staatsbahnen. Stufentransformator und Bürstenverschiebung. (B.E.W.)

Linienspannung 15000 V.

Stromart W.S. 16.2/3 Per.

Motorspannung 350 V.

13. Steuerung mit Zusatztransformator. Eine fein abgestufte Steuerung, die sich an den Grundsatz der rein allmählichen Steuerung mit gegen- und zusätzlich geschaltetem Drehtransformator anlehnt, erhält man, wenn man von einer entsprechenden Anzahl Grundspannungen ausgehend, durch Gegen- und Zuschaltung einer Zusatzspannung von einer Mindestspannung nicht gleich Null bis zu einer Höchstspannung die Betriebsspannung des Motors in regelmäßigen, verhältnismäßig zahlreichen Spannungsstufen erhöht.

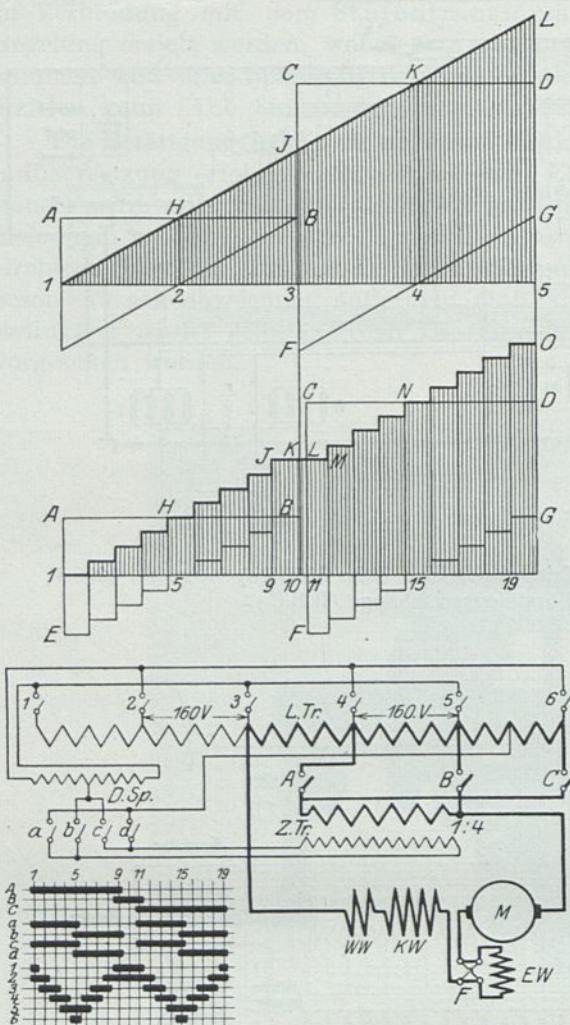


Abb. 355. Feinstufige Geschwindigkeits- (Spannungs-) Regelung mit Hilfe eines zu- und gegengeschalteten Transformators. Oben: Spannungslinie für den Drehtransformator. Unten: Spannungsregelung mit dem Zusatztransformator. (Wachsmuth).

Diese von den M.S.W. (Abb. 355) besonders durchgebildete Schaltung ist folgendermaßen eingerichtet:

Der Motorstrom durchfließt, bevor er in den Motor gelangt, die Sekundärwicklung eines Zusatztransformators. Dieser wird primär an eine stufenweise veränderliche Spannung gelegt und kann außerdem umgeschaltet werden, so daß derselbe eine der Spannung des Leistungstransformators anfänglich entgegengesetzte, dann abnehmende und schließlich gleichgerichtete Zusatzspannung abgibt.

Das Anlegen der Primärwicklung des Zusatztransformators an die verschiedenen Spannungsstufen, sowie die Umschaltung von Gegenspannung auf Zusatzspannung erfolgt durch die Schalter 1 bis 6, bzw. a bis d (Abb. 355). Das dargestellte Schaltbild zeigt, in welcher Reihenfolge die einzelnen Schalter betätigt werden.

14. Unmittelbare Schaltung. Eine Rückkehr zur unmittelbaren Schaltung stellt die Steuerung der B.B.C.-Werke dar, die einen bei Akkumulatorzellenschaltern gebräuchlichen Behelf, den Wanderkontakt, benutzt (Abb. 356, 357).

Hier wird jede elektrische Verriegelung überflüssig, weil die Mechanik die richtige Reihenfolge aller Schaltvorgänge sichert. Wahrscheinlich dürfte an Stelle der durch eine Kurbel betätigten Vor- und Haupt-

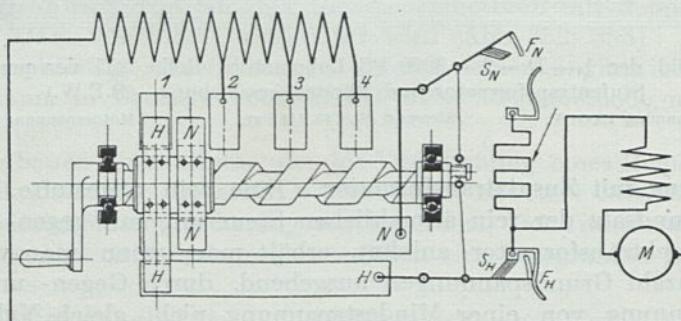


Abb. 356. Schematische Darstellung der unmittelbaren Steuerung mit Zellenschalter. C+C-Lokomotiven, Reihe 551 der preuß. Staatsbahnen. (B.B.C.)

kontakte der elektromagnetisch betätigten Schütze vorzuziehen sein, so daß nur deren Zugspulen durch den Exzenter geschaltet werden. Ein Übelstand dieses Systems

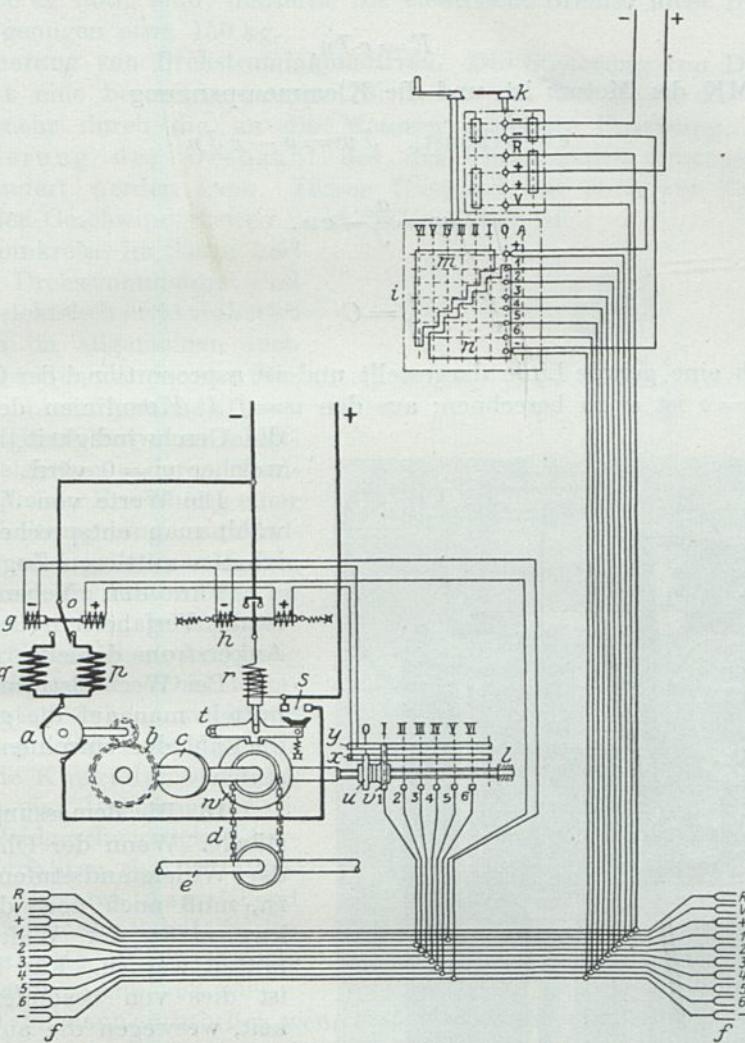


Abb. 357. Vielfachsteuerung mit Stufenschalter (B.B.C., Abb. 356).

a Steuermotor, f Kuppelungen der Steuerleitungen, i Steuerschalter, darüber Fahrtwender, s Sperrscheibe mit Rutsch-Kupplung, V Steuerleitung für Vorwärtsfahrt, R dasselbe für Rückwärtsfahrt, 0—VI Schaltstellungen, 1—6 Steuerleitungen.

ist, daß man zur Betätigung ein Gestänge benötigt, das bei langen Lokomotiven ziemlich umständlich ausfallen kann.

15. Die Zahl der Stufen. Im Vorstehenden sind die Grundsätze der Steuerungseinrichtung erörtert worden, die Frage der erforderlichen Stufenzahl blieb unberührt. Es ist klar, je geringer die Stufenzahl, desto größer werden die Schwankungen der Zugkraft während der Leistungsregelung, wodurch die Ausnutzung des Reibungsgewichts beeinträchtigt wird und die Lastspitzen der Triebmaschinen gesteigert werden.

Man findet sich damit ab, vom Mittelwert gerechnet, Stromschwankungen bis etwa 10% auf und ab zuzulassen, wobei man keine unbequeme Stufenzahl in den Schaltapparaten bekommt. Zu beachten ist, daß die Steilheit der Kennlinien $v = f(J)$ die Verhältnisse verschlechtert; daher benötigt man bei Wechselstrom im allgemeinen für den gleichen Ungleichförmigkeitsgrad weniger Schaltstufen als bei Gleichstrom.

Zur Berechnung der Schaltstufen dient die Beziehung

$$Jw = e - E$$

und da

$$E = c J n,$$

die Gegen-EMK des Motors ist, und die Klemmenspannung

$$e = a \text{ (konst)}, \quad Jw = a - c J n$$

wird

$$w = \frac{a}{J} - c n.$$

Da

$$\frac{a}{J} = C$$

wird w durch eine gerade Linie dargestellt und ist w proportional der Geschwindigkeit. Für $n=0$ ist w zu berechnen; aus den $n=f(J)$ Kennlinien des Motors ist die Geschwindigkeit bekannt, bei welcher $w=0$ wird.

Die Werte von J_{\max} und J_{\min} wählt man entsprechend der verlangten mittleren Zugkraft.

Für den Nebenschlußmotor ist das Verfahren in bezug auf den Ankerstrom dasselbe.

Bei Wechselstrommotoren ermittelt man auf die gleiche Weise die Zahl der einzelnen Spannungsstufen.

16. Die Bemessung der Widerstände. Wenn der Ohmsche Wert der Widerstandsstufen festgestellt ist, muß auch noch die Wärmekapazität der Widerstände ermittelt werden. Für Stadtbahnen ist dies von besonderer Wichtigkeit, weswegen die auf Grund der für die mittlere Haltestellenentfernung gewonnenen Fahrlinien zur Auswertung der Stromwärme in ein Kreisdiagramm übertragen werden müssen, um das geometrische Mittel der Strombelastungen festzusetzen. Sind Erwärmungs- und Abkühlungskurven für die Widerstände vorhanden, kann der genaue Verlauf der Erwärmung festgestellt werden.

Bei Straßenbahnen ist es nicht mehr nötig die Rechnung durchzuführen, weil auf Grund der Unzahl vorhandener Ausführungen bekannt ist, daß bei Verwendung von

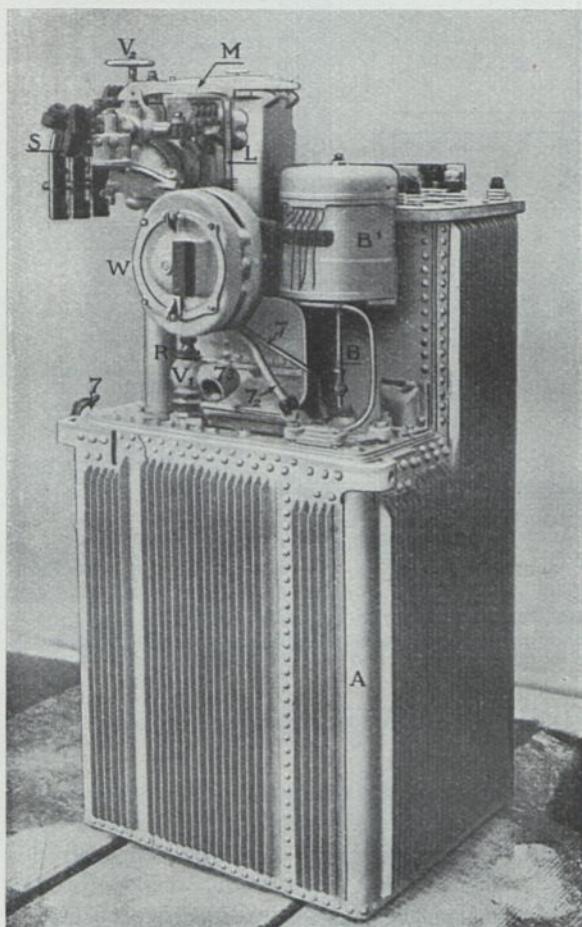


Abb. 358. Anlaßvorrichtung mit Flüssigkeitswiderstand der Drehstromlokomotiven Reihe 50 der italienischen Staatsbahnen (West.).

A Windkessel, A_1 Flüssigkeitsbehälter, R Druckrohr, B Umlaufpumpe, B_1 Motor für jede Umlaufpumpe, t Füllstutzen, W Regler für die Begrenzung der Leistung beim Anfahren.

Nickelin als Widerstandsmaterial und eingebauten eisernen Kühlrippen für eine 2×50 bis 60 PS-Einrichtung bei elektrischer Bremsung Widerstände im Gewichte von etwa 200 kg nötig sind; insoferne die elektrische Bremse nicht regelmäßig benützt wird, genügen etwa 150 kg.

17. Steuerung von Drehstromlokomotiven. Die Steuerung von Drehstromfahrzeugen bildet eine besondere Gruppe für sich, weil bei diesen die Geschwindigkeit nicht mehr durch die an die Motoren angelegte Spannung, sondern nur durch Änderung der Drehzahl des das Drehmoment erzeugenden Drehfeldes verändert werden kann. Dieser Umstand hat auch zur Folge, daß die Stufenzahl der Geschwindigkeiten nicht frei wählbar ist.

Die Stromkreise im Stator und Rotor eines Drehstrommotors sind miteinander elektrisch nicht verkettet und insofern im allgemeinen auch ganz anders geartet, als man den Stator für die Linienspannung baut, den Rotor dagegen mit einer schalttechnisch geeigneten anderen Spannung. Auch die zur Erreichung einer Geschwindigkeitsregelung anwendbaren Mittel sind ganz verschieden, je nachdem sie im Stator oder im Rotor zur Anwendung gelangen.

Zur wirtschaftlichen Änderung der Geschwindigkeit eines Drehstrominduktionsmotors stehen zwei Mittel zur Verfügung. Die Polumschaltung und die Kaskadenschaltung, beide führen eine Änderung der relativen Drehfeldgeschwindigkeit herbei. Beide Verfahren sind im allgemeinen zum Anfahren unzureichend und müssen zu diesem Behufe in den Rotorstromkreis Widerstände geschaltet werden (Abb. 358, 359).

Letztere sind dann entbehrlich, wenn die Polumschaltung so weitgetrieben wird, daß man in Verbindung mit einem Spartransformator die Motoren bei kurzgeschlossenem Anker an die Linie legen kann, ohne zur Erzielung eines ausreichenden Drehmomentes zu hohe Anfahrströme bei schlechtem $\cos \varphi$ befürchten zu müssen (Abb. 360).

An Stelle der immerhin verwinkelten Polumschaltung sind Drehstromlokomotiven mit zwei Motoren verschiedener Polzahl ausgeführt worden, die mechanisch gekuppelt oder überhaupt auf einer Achse zusammengebaut sind. Im regelmäßigen Betrieb arbeitet immer nur ein Motor; eine Zwischenstufe entsteht durch Kaskadenschaltung der beiden Motoren (Abb. 361).

Diese Anordnung hat den mechanischen Nachteil, daß der eine Motor zeitweilig leer mitgeschleppt werden muß. Im Hinblick auf die großen Massen, das starre und geschlossene Getriebe ist dies als Erreger bedenklicher Resonanzerscheinungen ein nicht zu unterschätzender Übelstand.

Zur Vereinfachung der Steuerschaltung kann man die Statoren mit zwei vollständig unabhängigen Wicklungen versehen, von denen jede durch eine Dreieck-Sternumschaltung von der vollen Polzahl auf die halbe Polzahl gebracht werden kann. Der Rotor wird mit Käfigwicklung versehen, wodurch eine Polumschaltung im

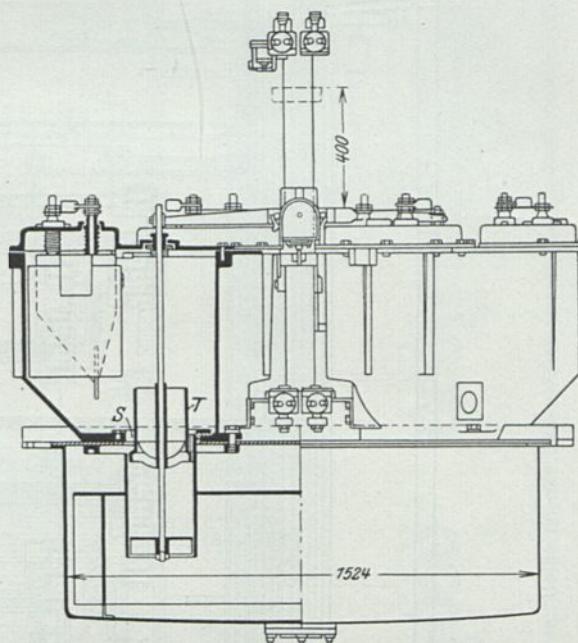


Abb. 359. Flüssigkeitsanlasser der Lokomotiven der Norfolk & Western-Bahn. (West.)

Anker vermieden wird. Auf diesem Wege hat man vier wirtschaftliche Fahrstufen erzielt.

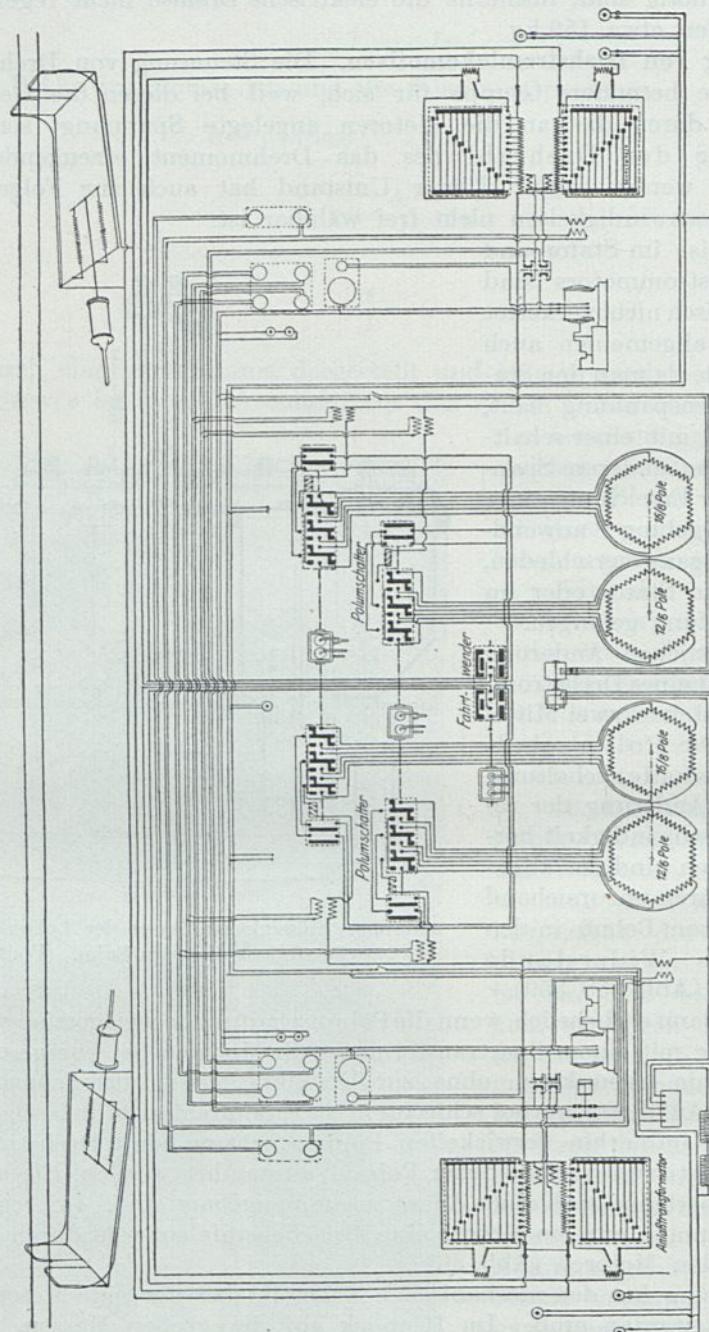


Abb. 360. Schaltbild der D-Lokomotive der Simplonbahn, Reihe 367, mit vier Kurschlußmotoren, Polumschaltung für vier Geschwindigkeiten. (B.B.C.)

Zur Polumschaltung und gegebenenfalls Kaskadenschaltung werden Schaltwalzen vorgesehen, die im Hinblick darauf, daß jeder Schaltvorgang dreimal durchzuführen ist, ziemlich verwickelt werden. Diese Schaltwalzen, meist durch Druckluft betätigt, werden für stromloses Schalten gebaut. Durch entsprechende Verriegelung wird dafür gesorgt, daß sie nur bei offenem Linienschalter betätigt werden können.

Die etwa vorhandenen Anfahrwiderstände müssen dreipolig gebaut werden. Zur Vermeidung der hiermit verbundenen umständlichen Bauart verwendet man zu

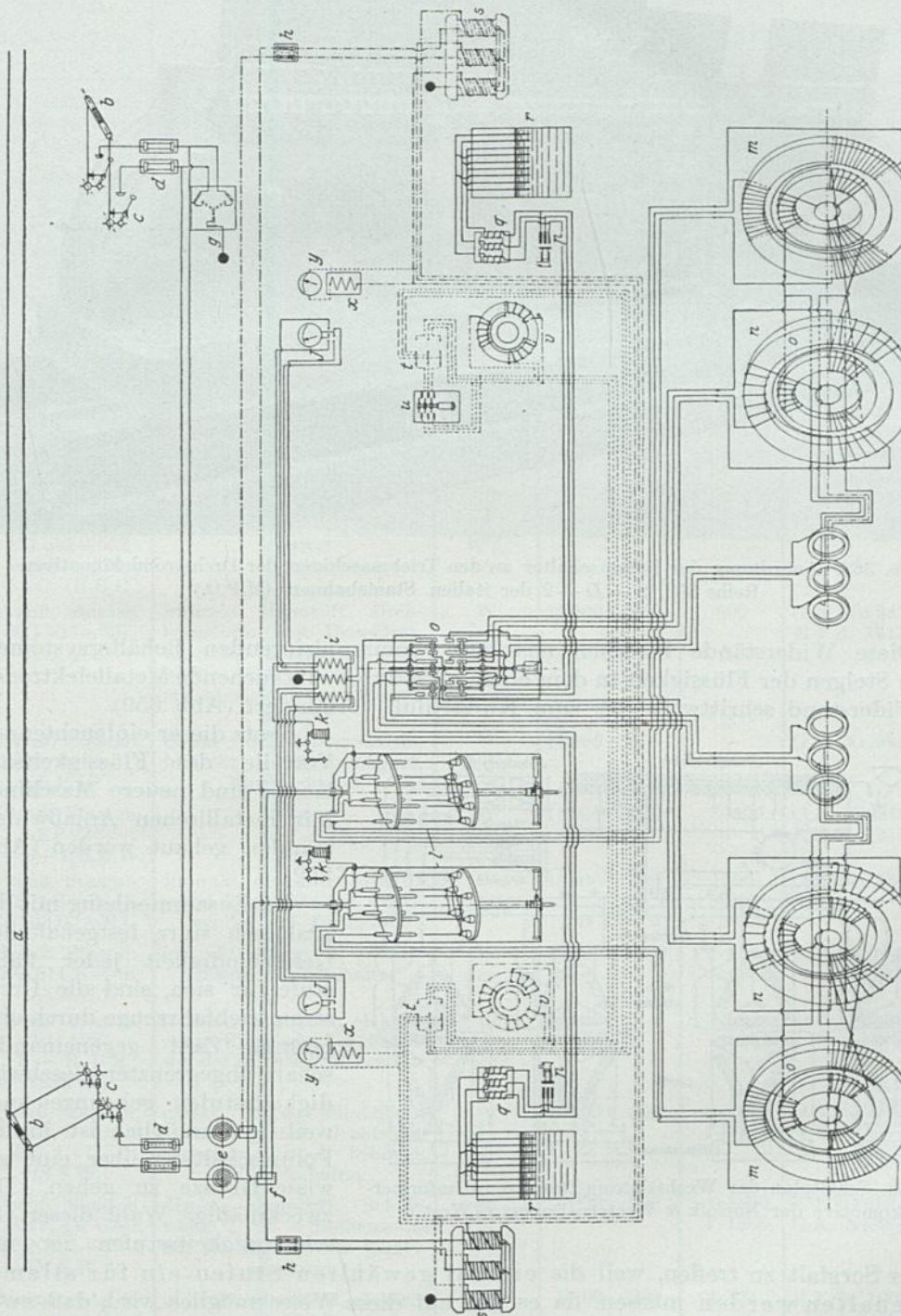


Abb. 361. Schaltbild der Drehstromlokomotiven, Reihe 36 der italienischen Staatsbahnen, zwei Geschwindigkeiten. (Ganz.)

diesem Zweck pneumatisch betätigtes Flüssigkeitswiderstände (Abb. 358), die nebenbei eine in diesem Falle besonders erwünschte stufenlose Anfahrregelung ermöglichen.

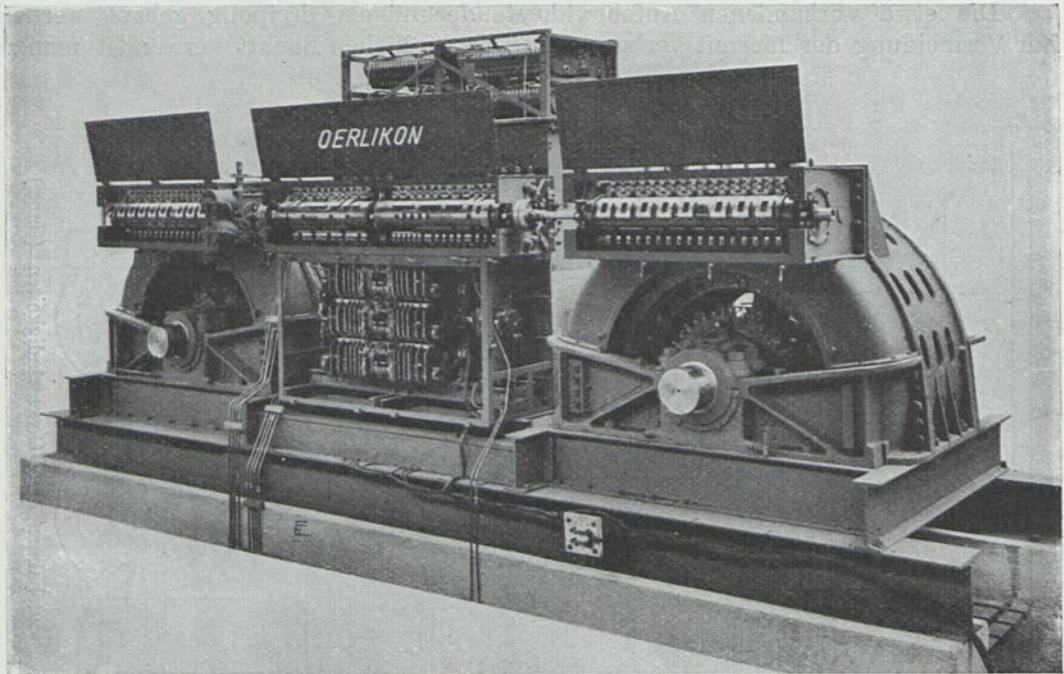


Abb. 362. Anordnung der Polumschalter an den Triebmaschinen der Drehstromlokomotiven Reihe 332, 2 — D — 2 der italien. Staatsbahnen. (M.F.O.)

Diese Widerstände bestehen aus zwei kommunizierenden Behältersystemen. Durch Steigen der Flüssigkeit in dem einen wird durch eintauchende Metallelektroden der Widerstand schrittweise bis zum Kurzschluß vermindert (Abb. 359).

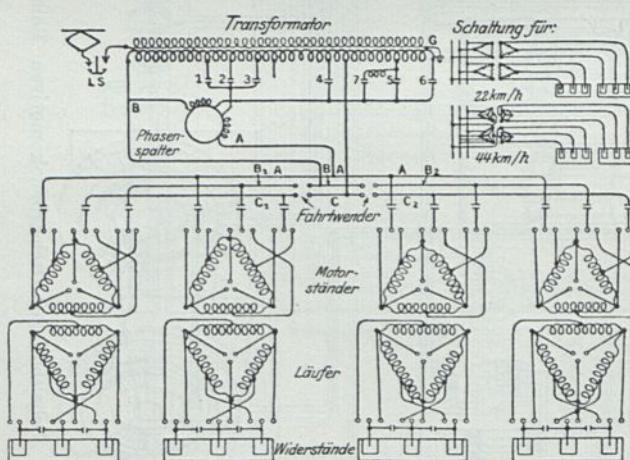


Abb. 363. Schaltplan der Wechselstrom-Drehstrom-Umformer-Lokomotive der Norfolk & Western-Bahnen. (West.)

Trotz dieser einleuchtenden Vorteile des Flüssigkeitsanlassers sind neuere Maschinen mit metallischen Anlaßwiderständen gebaut worden (Abb. 362).

Im Zusammenhang mit der praktisch starr festgehaltenen Geschwindigkeit jeder Fahrstufe für sich, sind die Drehstromtriebfahrzeuge durch eine geringe Zahl gegeneinander scharf abgegrenzter Geschwindigkeitsstufen gekennzeichnet, weil es unmöglich ist in der Polumschaltung über eine gewisse Grenze zu gehen. Die zweckmäßige Wahl dieser Geschwindigkeitsstufen ist mit

größter Sorgfalt zu treffen, weil die einmal gewählten Stufen ein für allemal festgehalten werden müssen, da es nur auf diese Weise möglich wird, daß zwei Maschinen verschiedener Bauart in einem Zuge fahren. Die Steuerung der Fahrzeuge übergreift somit beim Drehstromsystem auch auf die Bestimmung der Polzahlen der Triebmotoren und die Bemessung des Raddurchmessers.

18. Angaben über ausgeführte Steuerungen.

Lokomotiven (Wechselstrombetrieb [Drehstrom]).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Stromart, Perioden- zahl	Spannung V Linie Steue- rung	Leistung PS	Beschreibung Schaltbildung
Norfolk- und Westernbahn- (West.)	Pneumatisch betätigter An- laßwiderstand, Polumschal- tung	W-D 25	10000 —	8.450	E.R.J. Feb. 1916. Proc. 1916. S. 154.
Lötschberg, C + C, (M.F.O.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Einzelschalter, Gleich- stromzugspulen	W 15	15000 420	2.1000	Sch.B.Z. Bd. 57. Nr. 7.
Simplon, D, (B.B.C.)	Druckluftbetäigte Schalt- walzen für Polumschaltung, Stufenschaltung zum An- lassen	D 15	3000 3000	2.850	Sch.E.T.Z. 1909. S. 405. Sch.B.Z. 1909. S. 237.
Felten & Guillaume. Lahmeyer.	indirekt, elektromagn. Aus- lösung, pneum. Einzel- schalter	—	— —	—	E.T.Z. 1908. S. 204.
Preuß. Staatsb. ES-1 2-B-1, ES-6 1-C-1, EG-505 D. (S.S.W.)	stufenlos, indirekt, Dreh- transformator, elektromagn. Einzelschalter für die Spannungsstufen u. Fahrtwender	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 460 — 315	1.1600 1.1800 1.1800	Z.V.D.I. 1911. S. 1926.— G.A. Nr. 947 S. 177.— E.K.B. 1912. S. 468 u. 491.
Preuß. Staatsb. EG 551—552 u. 567—570, C+C, (B.B.C.)	indirekt, abgestuft, Stufen- schalter	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 —	—	G.A. Nr. 950. S. 27.
Preuß. Staatsb. EG 506—507 —508, —D—	indirekt, abgestuft, Dreh- transform. mit Druckluft- antrieb, Drehransf. mit elektr. Antr. Spannungs- stufen, elektromagn. Einzel- schalter	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 456	600	G.A. Nr. 947. S. 183. E.T.Z. 1913. H. 31.
Preuß. Staatsb. ES 3, 2-B-1, (B.E.W.)	direkt, Bürstenverschieb., indirekt, elektromagnet. Einzelschalter	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 —	—	G.A. Nr. 948. S. 196.
Preuß. Staatsb. EP 235 2-D—1(B.E.W.)	wie vor	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 350	3000	G.A. Nr. 948. S. 198. E.K.B. 1918. S. 140.
Preuß. Staatsb. ES 2, 2-B-1, EG503 D (A.E.G.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Einzelschalter, Fahrt- wender mit Druckluft	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 570 800	1200 800	G.A. Nr. 948. S. 202.
Preuß. Staatsb. EG 511 B + B (A.E.G.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Einzelschalter	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 1100	2.600	G.A. Nr. 949. S. 3.
Preuß. Staatsb. EG 528, B + B + B (S.S.W.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Einzelschalter. Fahrt- wender m. Druckluftbetrieb.	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 —	3.500	G.A. Nr. 949. S. 7.
Preuß. Staatsb., EB201, 1—D—1, ES5 1—C—1, (S.S.W.)	direkt, teilw. allmählich, teilw. abgestuft Drehtrans- formator, Hand betätigt, Einzelschalter	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 320 1.1900	2.1300 1.1900	G.A. Nr. 947. S. 180.— Z.V.D.I. 1915. A. 562.
Preuß. Staatsb. ES 9, 1—C—1 EP 201, 1—C—1 (M.S.W.)	direkt, abgestuft, Schalt- walze mit Nockenwalze zur Betätigung von Einzel- schaltern	W $\frac{1}{16^{2/3}}$	15000 640	1.1800 1.1800	E.T.Z. 1919. H. 31.— G.A. Nr. 950. S. 22.
Murnau—Ober- ammergau, 2-A.	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W 16	5500 280	2.175	E.K.B. 1909. H. 28. S. 535.
New Haven Rd. Reihe 1—41 (West.)	indirekt, abgestuft, elektro- pneumatisch	W-G 25	11000 2.300 600	4.250	E.K.B. 1908. S.— E.R.J. Aug. 1907.

Lokomotiven (Wechselstrombetrieb [Drehstrom]).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Stromart. Perioden- zahl	Spannung V Linie	V Steue- rung	Leistung PS	Beschreibung Schaltbildung
Ch. d. F. du Midi, 1—3 A—1, Atelier du Nord.	indirekt, Drehtransfor- mator	W	12000	230	3.500	I. E. 1913. S. 184.
Rjukan, 2A+2A, (A.E.G.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schütze	W 16	10000	220	4.125	E.K.B. 1912. S. 722.
Mariazell, C+C. (S.S.W.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schütze	W 25	6000	220	2.300	E.K.B. 1912. H. 4.
Mittenwaldba h, 1—C. (A.E.G.U.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schütze	W 15	15000	840	1.800	E.u.M. 1913. S. 386.
Italienische Staatsb., 1—C—1 (West.)	pneum. Flüssigkeitssteue- rung. Handbetätigte Pol- umschaltung	D 15	3300	3300	2.1390	E.R.J. 1915. S. 284.
Italienische Staatsb., E(West.)	pneum. Flüssigkeitssteue- rung. Handbetätigte Pol- umschaltung	D 15	3300	3300	2.1000	R. T. 1914. Taf. 32.
Italienische Staatsb. 2—C—2 (West.)	pneum. gesteuerte Walzen- schalter mit Hammerkon- takten	D 15	3300	3300	2.1100	BBC-Mitt. 1918. S. 90.
Valle Maggia, B (M.F.O.)	direkt, abgestuft	W 20	5000 800	800	1.250	Sch.B.Z. 1911. Bd. 58. S. 31
Preuß. Staatsb. Versuchslok. Oranienburg 2A+1-A. (A.E.G.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W 25	5000	1000	3.350	E.T.Z. 1908. H. 17.
Ch. d. F. du Midi, 1—C—1, (T.H.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen, Nutz- bremsung	W 16	12000	720	2.750	Th.H. 1912. H. 7—13.
Ch. d. F. du Midi, 1—C—1. (West.)	indirekt, abgestuft, elektro- pneumatisch	W 15	12000	420	2.750	G.C. 1912. S. 167. L. E. 1912. S. 1075.
Ch. d. F. du Midi, 1—3 A—1. (Jeumont)	elektr. betätigter Dreh- transformator	W 15	12000	230	3.550	E.T.Z. 1912. S. 1075.
Italienische Staatsb., Gr. 38, 1—C—1 (Ganz)	Handbetätigtes Kaskaden- schaltung, pneum. Flüssig- keitsanlasser	D 15	3300	3300	2.750	E.K.B. 1907. S. 103.
Italienische Staatsb., Gr. 36, 1—C—1 (Ganz)	dasselbe	D 15	3300	3300	2.600	Sch.E.T.Z. 1905. S. 703. Z.f.E. 1905 S. 239.
Riksgränsen- bahn, 2—B—2. (S.S.W.)	elektromagn. Schützensteue- rung, druckluftbetätigter Fahrtwender	W 15	1500	—	1.1000	E.K.B. 1915. S. 235.
Riksgränsenbahn 1—C+C—1. (S.S.W.)	dasselbe	W 15	1500	—	2.850	E.K.B. 1915. S. 234.
Lötschbergbahn 1—E—1. (M.F.O.)	Stufenschalter durch Elektro- motor betätigt	W 15	15000	500	2.1250	E.T.Z. 1913. S. 1342.
Simplon, 1—C—1. (B.B.C.)	Pneum. betätigtes Schalt- walzen	D 15	3300	3300	2.550	Sch.B.Z. 1909. S. 236.
Rhätische Bahn, 1—D—1. (M.F.O.)	elektromagn. (Gl.-Str.) be- tätigtes Schaltwalzen	W 15	11000	390	2.300	Sch.E.T.Z. 1916. S. 116.
S.B.B., 1—B+B—1, (B.B.C.)	elektromotorisch betätigter Zellenschalter. Vielfach- steuerung	W 16 ^{2/3}	15000	—	4.550	B.B.C.-Mitt. Apr. 1919. Taf. III.
Burgdorf-Thun, Nr. 4, B+B, (B.B.C.)	direkt, abgestuft	D 40	750	750	2.260	B.B.C.-Mitt. 1919. S. 99.
New Haven Rd. Nr. 69. (West.)	elektropneumatisch	G—W 25	11000 600	500	8.212	E.R.J. 1912. S. 274.

Lokomotiven (Wechselstrombetrieb [Drehstrom]).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Stromart. Perioden- zahl	Spannung V Linie	Steue- rung	Leistung PS	Beschreibung Schaltbildung
Zahnbahnen.						
Brunnen-Morschach.	direkt abgestuft	D 50	750	750	2.100	Z.V.D.I. 1906.
Coreovado.	direkt abgestuft	D 50	750	750	2.155	E.K.B. 1910. S. 607.
Jungfraubahn Lok. Nr. 8—11.	direkt, abgestuft. Nutz- bremsung. Schienenbremse	D 40	750	750	2.165	B.B.C. 1917. S. 33.
Jungfraubahn Lok. Nr. 4, 6.	direkt, abgestuft	D 40	750	750	2.150	Z.V.D.I. 1904. S. 1813.

Triebwagen (Wechselstrombetrieb).

Anlage	Art der Steuerung	Stromart. Perioden- zahl	Spannung V Linie	Steue- rung	Leistung PS	Beschreibung Schaltbildung
Midlandbahn. (S.S.W.)	indirekt, abgestuft. Druck- luft-Einzelschalter. Elektro- magn. Auslösung	W 25	6600	— 300	2.150 2.200	E.T.Z. 1909. S. 944.
New Haven-Bahn New Canaan- Branch. (West.)	indirekt, abgestuft. Elektro- magn. Schützen	W 25	11000	2.300	2.125	E.R.J. Mai 1909.
Ch. d. F. du Sud.	indirekt, abgestuft. Elektro- magn. Einzelschalter	W 25	6000	350	2.55	E.K.B. 1912. S. 399.— G.C. 1911. S. 68.
Ch. d. F. départ. de la Haute- Vienne.	direkt, abgestuft	W	10000	600	4.70	E.K.B. 1913. S. 466.
Bloomington Peoria. (West.)	indirekt, abgestuft Schützensteuerung	W 25	3300	250	4.75	E.T.Z. 1908. H. 5.
London- Brighton.(A.E.G.)	indirekt, abgestuft, vielfach, elektromagn. Schützen	W 25	6000	750	4.115 4.180	E.K.B. 1911. S. 345.
Lyoner Omni- bus-u. Straßenb.- Gesellschaft.	direkt, abgestuft	G—W 15	600	2.300	2.45	E.K.B. 1909. S. 593.
Locarno—Pon- telrolla—Bi- gnasco.	direkt, abgestuft	W 20	5000	750	4.40	Sch.E.T.Z. 1907. S. 747.
Martigny-Or- sières.	direkt, allmählich, Bürsten- verschiebung	W 15	8000	500	4.90	Sch.B.Z. 1911.
Richmond—Che- sapeake—Bay.	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schütze	W 25	6600	—	—	Z.V.D.I. 1908. S. 1389.
Haute—Rhin.	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schütze mit mecha- nischer Verriegelung	W	6600	550	4.35	E.T.Z. 1914. S. 979.
St. Avold. (B.E.W.)	direkt, abgestuft	W 50	750	750	2.60	E.T.Z. 1911. S. 14.
Blankenese— Ohlsdorf.(A.E.G.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schütze	W 25	6000	750	3.100	E.K.B. 1909. S. 600. E.T.Z. 1909. S. 1043.
Sohles. Gebirgs- bahn. (S.S.W.)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W 16 ² / ₃	15000	—	2.250	E.K.B. 1915. S. 99.
Pamplona—San- guesa. (A.E.G.)	direkt, abgestuft	W 25	6000	600	4.60	E.K.B. 1913. S. 350.— E.T.Z. 1913. S. 28.
Parma. (S.S.W.)	direkt, abgestuft	W 25	4000	400	2.70	E.K.B. 1911. S. 49.

Triebwagen (Wechselstrombetrieb.)

Anlage. Type	Art der Steuerung	Stromart. Perioden- zahl	Spannung V Linie	Spannung V Steue- rung	Leistung PS	Beschreibung Schaltbildung
Pittsburg — Buttler.	indirekt, abgestuft, elektromagnetisch	G—W 25	6600 600	2·300	4·100	R.J. 1907. S. 262.
Rotterdam — Haag.	indirekt, abgestuft. Elektro- magn. Schützen	W 25	10000	340	2·180	E.T.Z. 1909. S. 444.
Padua — Fusina.	direkt, abgestuft	W 25	6000	600	2·80	E.K.B. 1910. S. 245.

Lokomotiven (Gleichstrombetrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Spannung V	Leistung PS	Beschreibung Schaltbildung
Reibungsbahnen.				
Wiener Stadtbahn Probe. (Krizik)	direkt, abgestuft	3000	4·130	E.T.Z. 1906. S. 1069.
Berninabahn, C+C, (B.B.C.)	Handbetätigte Nockensteuerung und pneum. betätigter Fahrt- wender.	750	4·200	B.B.C.-M. Sept 1917.
Paris — Orleans, 2A+2A. (T.H.)	direkt, abgestuft	650	4·250	G.A. 1901. Nr. 586.
Chicago — Milw.— St. Paul-Ry. (G.E.C.)	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen	3000	8·450	E.K.B. 1919. S. 80.
Zahnradbahnen.				
Arth — Rigi.	direkt, abgestuft.	800	2·130	Sch.E.T.Z. 1907. S. 212. E.K.B. 1907. S. 251.
Barmer Bergbahn.	direkt, abgestuft.	550	2·60	Z.V.D.I. 1902. S. 15.
Usui — Toge.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schütze, Zugspulen für 80 V.	650	2·350	A.E.G.-Z. 1914. Nr. 9. S. 514.
Montreux — Glion.	direkt, abgestuft	750	2·110	Sch.B.Z. 1909. S. 69.
Rittnerbahn.	direkt, abgestuft	750	2·150	E.K.B. 1908. H. 31.
Schöllenbahn.	direkt, abgestuft, Nockensteue- rung.	1200	2·160	B.B.C.-M. 1918. S. 74.
Wengernalpbahn.	direkt, abgestuft	1650	2·150	Z.O.I.A.V. 1919. S. 133. Sch.D.Z. 1910.
Triest — Opcina.	direkt, abgestuft	550	2·100	E.B. 1904. H. 15.
Wendelsteinbahn.	direkt, abgestuft, Nocken- schalter	1500	2·100	E.T.Z. 1914. S. 911.

Triebwagen (Gleichstrombetrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Spannung V	Leistung PS	Beschreibung Schaltbildung
Bellinzona — Me- socco.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen	1500	4·66	E. u. M. 1907. S. 950. E.K.B. 1909. S. 84.
Berninabahn.	direkt, abgestuft	750	4·75	E. u. M. 1910. S. 767.
Frankfurt — Hom- burg.	direkt, abgestuft	1000	2·25	L.Ry. & Tr J. 1910. S. 357.
Lugano — Tesserete.	direkt, abgestuft	1000	4·45	Sch.B.Z. 1910.
Michigan U. T. Co.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Einzelschalter, 150 V. Batterie	5000	4·100	E.R.J. 1915. S. 661. E.T.Z. 1916. S. 2.
Berner Oberland.	direkt, abgestuft	650	4·65	Allioth.
Pittsburg — Buttler.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schütze, Dynamotor 600 V.	1200	4·100	G.E.B. Jan. 1914.
Rhein — Haardt.	direkt, abgestuft	1200	2·D.97	E.K.B. 1914. S. 410.
Schlesische Landesbahnen.	direkt, abgestuft	800	4·35	E. u. M. 1919. S. 323.

Triebwagen (Gleichstrombetrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Spannung V	Leistung PS	Beschreibung Schaltbildung
Tabor—Bechyne.	direkt, abgestuft	1400	4·30	Krizik. 1904.
Stockholm—Salt-jöbaden.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen, 65 V. Hilfst	1200	4·150	E.T.Z. 1914. S. 231.
Tatrabahn. (S.S.W.)	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schütze, Dynamotoren	1650	4·60	E.K.B. 1914. S. 596.
Trent—Malé. (A.E.G.U.)	direkt, abgestuft	800	4·66	Z.O.I. A.V. 1909. Abb. 29.
Bourg—Madame. (T.—H.)	indirekt, Schützensteuerung	850	4·50	R.G.C.F. 1912. S. 303.
Cöln—Bonn. (S.S.W.)	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen	1000	2·130	G.A. 1908. S. 31.
Mailand—Monza. (B.B.C.)	direkt, abgestuft, Vielfach-steuerung	550	4·52	B.B.C.-M. 1919. S. 115.
Biasca—Aquarossa.	direkt, Nockenschalter	1200	2·75	Z.O.I. A.V. 1912. S. 134.
New York. Stadt-bahn.	indirekt, abgestuft, elektro-pneum. Einzelschalter	650	—	E.T.Z. 1907. H. 8.
Zahnradbahnen.				
Filderbahn.	direkt, abgestuft	600	2·150	E.K.B. 1906. H. 16.
Martigny—Chate-lard.	direkt, abgestuft, Vielfach-steuerung	750	4·60	Sch.E.T.Z. 1908. S. 552.
Monthey—Cham-péry.	direkt, abgestuft	750	4·75	Sch.B.Z. 1909.
Münster—Schlucht.	direkt, abgestuft	750	4·85	Sch.E.T.Z. 1908. S. 255.

VIII. Stromabnehmer.

Literatur:

- Albert. Von der Rolle zum Kohlenschleifbügel. V.T. 1921 Mai/Juni.
- B.B.C. Die Lebensdauer der Schleifstücke von Stromabnehmern. B.B.C.-M. Bd. 4. S. 115 und E.T.Z. 1918. H. 12.
- Scherenstromabnehmer für elektrische Fahrzeuge der B.B.C.-M. 1916. H. 51.—B.B.C.M. 1916. H. 6.
- Case. Current collection G.E.R. Nov. 1914.
- Cremer. Der Bügelstromabnehmer für elektrische Bahnen. E.K.B. 1906. H. 5.
- Ewing. What happens at the trolley contact. E.R.J. 1920. Bd. 56. Nr. 17.
- Hixson. Contact conductors and collectors for electric railways. Proc. Juli 1915.
- Moellendorf. Modernisierung der Elemente zur Stromabnahme bei elektrischen Bahnen. E.T.Z. 1913. H. 48.
- Stocker. Die Druckverhältnisse bei Bügelstromabnehmern. E.T.Z. 1916. H. 31. Sch.B.Z. 1916. S. 58.
- Storjehann. Kohlenschleifstücke für elektrische Bahnen. E.K.B. 1918. H. 24.
- Zur Rollen- und Bügelstromabnehmerfrage. E.K.B. 1920. H. 26.

1. Allgemeines. Die Zuverlässigkeit des elektrischen Betriebes ist letzten Endes die Frage der klaglosen Arbeitsweise des Stromabnehmers, der solcherart zu einem Behelf besonderer Tragweite wird. Es kann auch füglich behauptet werden, daß die allgemeine Einführung des elektrischen Betriebes einwandfreie Stromabnehmerbauarten zur Voraussetzung hat. Der Stromabnehmer hat die leitende Verbindung zwischen dem in Bewegung befindlichen Fahrzeug und der ortsfesten Fahrleitung herzustellen. Es liegt in der Natur der Sache, daß die Lage der Leitung zur Bahnachse verhältnismäßig beträchtlichen Schwankungen unterworfen ist. Alle Stromabnehmer sind daher gefedert gebaut, d. h. so eingerichtet, daß sie den jeweils vor kommenden Abweichungen der Lage der Leitung von der Bahnachse ohne Stromunterbrechung folgen können.

Diese Abweichungen sind im allgemeinen von beträchtlicherer Größenordnung bei Oberleitungen als bei der Stromzuführung mit Strohmschiene und Unterleitung. Weiter sind die Stromabnehmer für Oberleitung und die beiden letztgenannten Stromabnehmersysteme insofern grundsätzlich verschieden, als die neuzeitlichen Oberleitungsbauarten durchweg elastisch gebaut sind. Die Strohmschiene und die Leiter der Unterleitung sind dagegen vollständig starr und unnachgiebig.

Eine starre Arbeitsleitung und geringe Abweichungen von der Regellage stellen ganz andere Anforderungen an den Typ eines Stromabnehmers als große Abweichungen und ein elastischer Leiter.

Nach diesen wesentlich verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet, bilden die Stromabnehmer

- a) für Oberleitung,
- b) für Strohmschiene und
- c) für Unterleitung

je Sondergruppen ganz verschiedener Bauart für sich. Diese Unterschiede verschärfen sich zwischen der Gruppe a und b noch insofern, als die abgenommenen Stromstärken im Falle b das Vielfache derjenigen von a zu betragen pflegen, weil man zur Stromzuführung mit Strohmschiene übergeht, wenn die Stromstärken mit einer Fahrleitung nicht zu bewältigen sind.

2. Stromabnehmerarten für Oberleitung. Vom Standpunkt desjenigen Maschinenelements betrachtet, welches unmittelbar mit dem Fahrdrift in Berührung steht, sind im allgemeinen drei Bauarten in Gebrauch, wobei auf versuchte oder verlassene Zwischenformen hier nicht weiter eingegangen werden soll:

- a) die Rolle,
- b) die Schleifbügel,
- c) die Walze.

Faßt man die Bauarten der gefederten Gestelle ins Auge, die die Stromabnehmer tragen, so findet man bei allen drei Stromabnehmerarten:

- a) die Stange,
- b) die Leier (Lyra),
- c) die Schere

vertreten, obzwar bestimmte Anordnungen bevorzugt sind.

Die Rolle hat nur ausnahmsweise einen anderen Träger als die Stange.

Für mäßige Geschwindigkeiten ist der Schleifbügel mit dem leierförmigen Gestell die Regel.

Auf Fahrzeugen, die für Geschwindigkeiten über 30 bis 40 km/h bestimmt sind, wo die Fahrleitung großen Höhenschwankungen unterworfen ist und mit wiederholtem Fahrtrichtungswechsel zu rechnen ist, finden Schleifbügel und Walze mit dem Scherengestell überwiegend Verwendung.

Abarten, die sich der einen oder anderen Form nähern, sind, wenn Sonderverhältnisse vorliegen, in großer Zahl anzutreffen.

3. Der Rollenstromabnehmer mit Stange ist für amerikanische Bahnen selbst bei Geschwindigkeiten von 80 bis 90 km/h und darüber und Betriebsspannungen bis etwa 750 Volt allgemein gebräuchlich. (Abb. 364.)

Die Rolle ist dadurch gekennzeichnet, daß ihr Durchmesser größer ist, als ihre Breite. Der äußerste Durchmesser beträgt meist 110 bis 150 mm, der innere Durchmesser der Hohlkehle 70 bis 110 mm, die Breite 40 bis 45 mm.

Die Rolle wird meist aus Messing oder Bronze hergestellt. Solche aus geprästem Messing oder Stahlblech mit Aluminiumeinlage sind mit gutem Erfolg erprobt worden. Letztere Ausführung hat den Vorteil geringeren Gewichtes für sich.

Für die Zusammensetzung ist folgende Legierung gebräuchlich

90% Cu, 8% Sn, 2% Zn.

Die große Bronzerolle ($\varnothing 150$ mm) wiegt 2,0 kg; die kleine für Straßenbahnen und mäßige Geschwindigkeiten gebräuchliche ($\varnothing 110$ mm) ist 1,0 kg schwer.

Die Stromstärke, die mit einer Rolle anstandslos abgenommen werden kann, ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Amerikanische Bahnbetriebe lassen nachstehende Werte zu:

Geschwindigkeit km/h .	10	20	40	60	80	100
Stromstärke A	950	800	540	420	300	190

Soweit die Rolle in Europa überhaupt verwendet wird, pflegt man höchstens 400 A mit einer Rolle abzunehmen.

Zur klaglosen Stromabnahme ist ein Berührungsdruck von 8 bis 20 kg notwendig, wo der niedrigste Wert für Straßenbahnbetriebe mit geringer Geschwindigkeit gebräuchlich ist. Mit Zunahme der Geschwindigkeit werden größere Drücke nötig. In Anlagen mit ungünstigen Richtungsverhältnissen braucht man die stärkeren Drücke.

Die Rolle läuft in einer aus gepreßtem Blech oder Temperguß erzeugten Gabel — dem Kontaktkopf — und ist meist für Graphitschmierung eingerichtet (Abb. 364). Zur Verbesserung des Stromüberganges von der Rolle zur Stange drücken zwei Messingfedern an die Nabe der Rolle im Kontaktkopf. Am Kontaktkopf befindet sich auch die Schnuröse zur Anbringung der Leine, die zum Niederhalten und zur Führung der Stange beim Fahrtrichtungswechsel und Anlegen an die Leitung dient.

Als Träger für die Rolle dient fast ausschließlich eine aus nahtlosem Stahlrohr erzeugte Stange, die in einem um eine senkrechte Achse drehbaren Gestell sitzt und ihrerseits um eine wägrechte Achse drehbar ist. Den verlangten Berührungsdruck erzeugen im Gestell angeordnete Spiralfedern (Abb. 365).

Für die Bemessung der Länge der Kontaktstange sind mehrere Umstände maßgebend. Zunächst ist es klar, daß die Rolle um so weniger zum Entgleisen neigen wird, je kleiner das Gewicht und damit zugleich die Trägheit des ganzen Systems in bezug auf die senkrechte Drehachse gehalten

wird und weiters je geringer die der Lenkung der Stange entgegenwirkenden Widerstände sind. Diese Anforderungen widersprechen sich zum Teil, denn der Stromabnehmer wird um so leichter lenkbar, je länger die Stange wird, andererseits wird das ganze System wieder schwerer, wenn die Länge der Stange vergrößert wird.



Abb. 364. Stangenkopf mit Stromabnehmerrolle

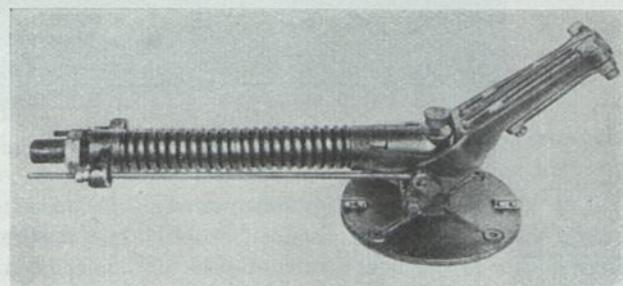


Abb. 365. Drehbarer Federbock für Rollenstromabnehmer.
(A.E.G.)

Die Erfahrung hat dazu geführt, diesen Umständen bis zu einem gewissen Grade weniger Beachtung zu schenken, vielmehr die Länge der Stange so zu bemessen, daß bei Anordnung des Ständers in der Wagenmitte der Kontaktkopf noch über den äußersten Rand der Wagenecke hinwegragt, so daß der Schaffner die entgleiste Rolle sehen kann um sie wieder an den Fahrdräht anzulegen. Unter Berücksichtigung der vorkommenden Wagenlängen werden die Stangen 3,75 bis



Abb. 366. Rollenstromabnehmer für große Höhenunterschiede der Fahrleitung (S.S.W.).

4,0 m lang. Größere Wagenlängen und Drahthöhen verlangen zwei Stromabnehmer, einen für jede Fahrtrichtung, wobei als Grundsatz gilt, daß die Stangen in einer gegen die Wagerechte mit 35 bis 40° geneigten Lage am besten arbeiten.

Der ganze Stromabnehmer wiegt mit kurzer Stange (3,75 m) etwa 57 kg, mit langer (4,4 m) Stange und großer Rolle (\varnothing 140 mm) 94 kg.

Der Rollenstromabnehmer wird ausschließlich bei Betriebsspannungen bis 750 Volt verwendet, weil sich die Isolation der Leine mit Rücksicht auf das Wiedereinlegen nach erfolgter Entgleisung für höhere Spannungen nicht gut anbringen läßt.

Man ist lediglich auf die Isolation der Kontaktleine, die aus gewachstem oder paraffiniertem Hanf hergestellt wird, angewiesen. In trockenem Zustand würden keine Bedenken zu hegen sein, in nassem Zustand ist die Oberflächenisolation schon bei etwa 1000 Volt an der Grenze des Zulässigen.

Für Grubenbetriebe mit geringer Stollenhöhe wählt man oft den Rollenstromabnehmer, weil dieser die Anbringung eines seitlichen Schutzes der Fahrleitung gegen Berührung ermöglicht (Abb. 63).

Einen Nachteil bildet dagegen die Unmöglichkeit, die Stange wegen ihrer Länge beim Fahrtrichtungswechsel umzulegen. Es müssen daher zwei Stromabnehmer vorgesehen oder sehr vorsichtig mit nach vorne liegender Stange gefahren werden. Zum letzteren eignet sich die Stange nicht. Eine Entgleisung führt unbedingt zu schweren Beschädigungen von Stromabnehmer und Leitung. Für derartige Zwecke baut man Rollenstromabnehmer mit kurzer Gelenkstange oder einem Scheren-gestell (Abb. 366). Diese Bauarten sind nur für ganz mäßige Geschwindigkeiten bis etwa 10 km/h brauchbar.

Um die Schäden und Störungen, welche die Entgleisung der Rolle verursachen, möglichst einzuschränken, sind vielfach Fangvorrichtungen in Benutzung. Dieselben beruhen auf dem Grundsatz, daß beim Entgleisen der Rolle die Stange unter dem Einfluß der Federkraft hochschnellt und die Leine plötzlich spannt. Die Leine ist mit einer in einer Dose untergebrachten Feder verbunden, die mit einer Fliehkrafthemmung versehen ist. Das verhältnismäßig langsame Spiel der Rolle entsprechend der Lagenänderung der Leitung wird nicht gehemmt, nur die Leine leicht gespannt. Bei einem heftigen Stoß tritt die Sperrwirkung auf. Bei manchen Ausführungen wird unter einem eine Rückzugfeder ausgelöst, die die Stange niederzieht.

Eine Abart der Rolle bildet der in Abb. 367 dargestellte drehbare Schleifschuh, eine amerikanische Abart dieser in Europa früher vereinzelt verwendeten Stromabnehmertype.

Die Rolle erleidet im Betriebe eine Abnutzung, durch welche ihre Verwendungsdauer begrenzt wird. Es ist naheliegend, daß verhältnismäßig große Stromstärken und hohe Fahrgeschwindigkeiten die Lebensdauer ungünstig beeinflussen. Tatsächlich findet man im schweren Überlandbahnbetrieb (4×90 PS, 40 t, 96 km/h) Laufzeiten von nur etwa 6000 km gegen Ergebnisse von 35000 km im Stadtbetrieb mit 18 t schweren Wagen (2×60 PS, 45 km/h Höchstgeschwindigkeit). In Betrieben mit günstigen Verhältnissen: gut instand gehaltener Fahrleitung, sorgfältig gewarteten Stromabnehmern kann man mit Leistungen bis 50000 km rechnen.

4. Der Schleifbügelstromabnehmer. Die Stromabnahme durch die Rolle ist dadurch gekennzeichnet, daß sich die Berührungsstelle an der Leitung synchron abwälzt. In der Folge kommen daher stets andere Stellen der Rolle mit der Leitung in Berührung. Aus der gleichen Ursache findet wenigstens an den theoretischen Berührungsstellen kein Gleiten zwischen Rolle und Leitung statt. Tatsächlich läßt sich ein Gleiten nicht vermeiden, weil der Draht je nach der zufälligen Lage auch seitlich an der Rolle anläuft.

Beim Schleifbügel gleitet ein geeignet gestaltetes Gleitstück am Fahrdräht, welcher behufs gleichmäßiger Abnutzung des Schleifstückes in Zickzack verlegt sein muß.

Die europäische Praxis verwendet zu diesem Zweck überwiegend Gleitstücke aus Aluminium mit geringem (etwa 6%) Kupferzusatz. Das Aluminium eignet sich zu diesem Zwecke, weil es die Kupferfahrleitung am wenigsten angreift, insbesondere



Abb. 367. Stromabnehmer mit drehbarem Schleifschuh.

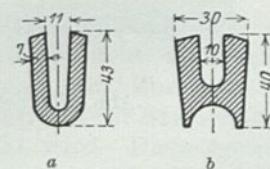


Abb. 368. Regelquerschnitte für Aluminium-Schleifstücke; a ohne, b mit durchgehendem Stahlrohr.

wenn das Schleifstück mit Schmierrille versehen ist. Außerdem ist das geringe Gewicht von Belang (Abb. 368).

Wenn besondere Anforderungen, namentlich in bezug auf die Größe der abzunehmenden Stromstärke vorliegen, verwendet man als Gleitstücke auch Kupfer- oder Messingrohre, drehbare Dreiecksröhre, Kohlenschleifstücke und dergl. (Abb. 369).

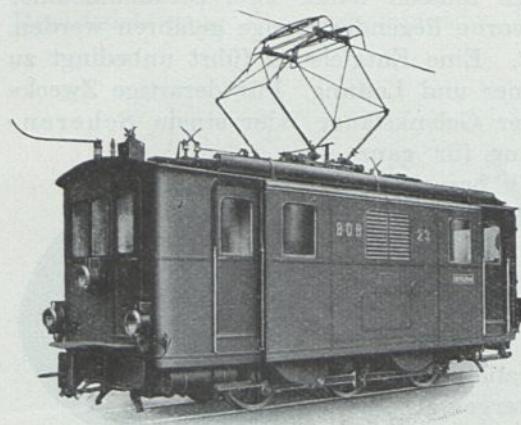


Abb. 369. C/b-Lokomotive der Berner Oberland-Bahn, 800/500 PS., 1500 V. Doppelscherenstromabnehmer mit doppelten Vierkantbügeln. (M.F.O.)

trieb mit nicht über 160 bis 180 A beansprucht wird, obzwar man ausnahmsweise auch Betriebe findet, in welchen einem Schleifstücke Stromabnahmen bis zu 500 A zugemutet werden.

Im allgemeinen sind Bügel gegen übermäßige Strombeanspruchung viel empfindlicher als gegen die Steigerung der Geschwindigkeit. Hierauf ist es zurückzuführen, daß man bei Vollbahnen mit Hochspannungsbetrieb die gleich guten Laufleistungen erzielt wie bei langsam fahrenden Straßenbahn-Triebwagen.

In Straßenbahnbetrieben (Niederspannung) findet man Fahrleistungen von 2000 bis 100000 km verzeichnet, im Mittel wird man mit einer Lebensdauer von 30000 km rechnen dürfen.

Bei Hochspannungsbahnen werden Laufleistungen von nicht unter 5000 und über 55000 km, im Mittel etwa 40000 km erzielt.

In Amerika hat der Schleifbügel erst durch die Erhöhung der Betriebsspannung bei Überlandbahnen auf 1200 Volt und darüber Eingang gefunden. Die Typen sind

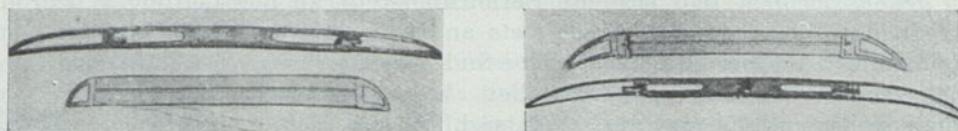


Abb. 370. Schleifstück aus Stahl amerikanischer Wechselstrombahnen.

noch wenig „standardisiert“. In Abb. 370 sind Ober- und Unterseite der aus galvanisiertem Stahl hergestellten Schleifstücke der 11000 Volt Wechselstrom-Bahn der Denver & Interurban-Ry. dargestellt. Die kürzere (ältere) Bauart soll 16000 km, die neuere Bauart 48000 km laufen. Die letztere Ausführung hat eine nutzbare Breite von nur 1016 mm, wogegen europäische Vollbahnen mit Schleifstücken bis zu 1600 mm Länge arbeiten, wozu an beiden Enden noch je 20 cm Sicherheitsdeckung

hinzukommen. Die Schleifstücke aus galvanisiertem Stahl der Lokomotiven im St. Clair-Tunnel und der Grand Trunk-Bahn laufen nur 4800 km trotz geringer Geschwindigkeit (40 km/h) und geringem Bügeldruck (Sommer 2,2, Winter 3,8 kg). Versuche mit Kupferbügeln sollen noch kürzere Laufzeiten ergeben und auch den Fahrdräht angegriffen haben, was beim stählernen Schleifstück nicht der Fall ist.

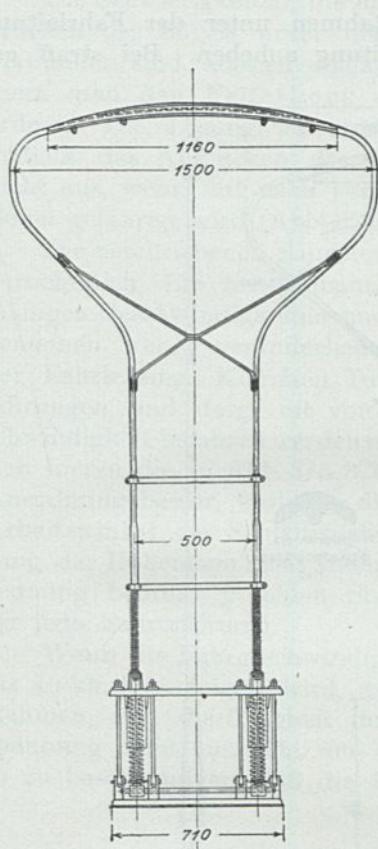


Abb. 371. Schleifbügelstromabnehmer mit teleskopischem Rohrsystem und unter dem Schleifstück geschlossenem Rohr. (A.E.G.)

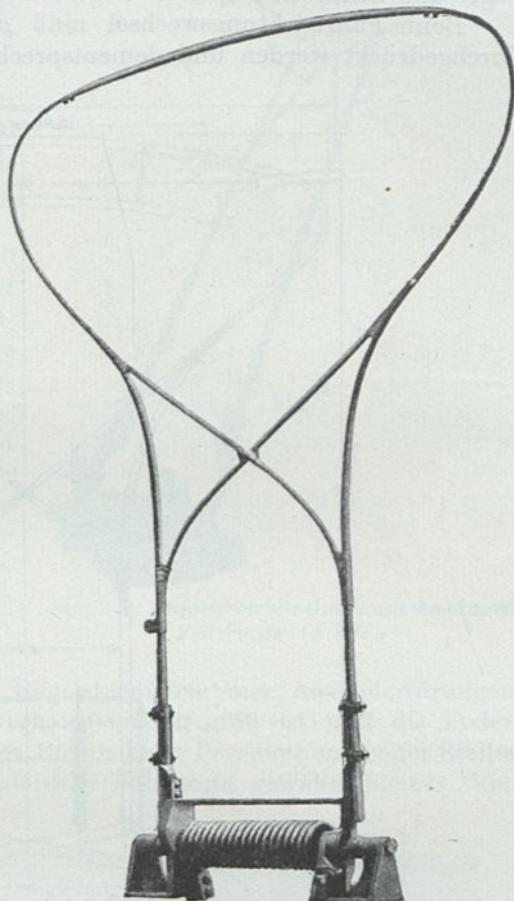


Abb. 372. Schleifbügel-Stromabnehmer. (S.S.W.)

Die New York, Westchester & Boston Ry. verwendet auch stählerne Schleifstücke, die nur 2,5 mm stark sind. Diese laufen bei 4,5 bis 7 kg Druck auch nur 4200 km.

Das Schleifstück wird zwischen die zwei Enden eines Rahmens eingesetzt; es ist in dieser Anordnung selbsttragend und darf die Abnutzung nicht über eine gewisse Grenze getrieben werden, sonst knickt das Schleifstück ein. Zur Vermeidung dieses Übelstandes baut man den Rahmen mit durchgehendem Stahlrohr, auf welches das Schleifstück in seiner ganzen Länge aufgesetzt wird. Diese Anordnung lässt eine weitgehende Abnutzung des Schleifstückes zu; es ist überdies möglich, die der stärksten Abnutzung unterworfenen Teile stückweise nach Bedarf zu ersetzen. Der Bügel wird etwas schwerer (Abb. 371).

Rahmen und Gestell des Schleifbügels weisen dem jeweiligen Zweck entsprechend mannigfaltige Ausführungen auf.

Die Grundform bildet der leierförmige Rahmen von Siemens-Halske (Abb. 372).

Den Berührungsdruck erzeugt eine auf Drehung beanspruchte Spiralfeder. Der oben zur Aufnahme des Schleifstückes offene Rahmen ist sehr stabil aus dünnwandigen Stahlrohren hergestellt und kann auf entsprechende Stützen des Federbockes aufgesteckt werden. Diese Bauart ist durch große Einfachheit und Betriebssicherheit gekennzeichnet; sie arbeitet am besten, wenn der Rahmen mit etwa 25° gegen die Senkrechte geneigt liegt.

Beim Fahrtrichtungswechsel muß der starre Rahmen unter der Fahrleitung durchgedrückt werden und dementsprechend die Leitung anheben. Bei straff ge-

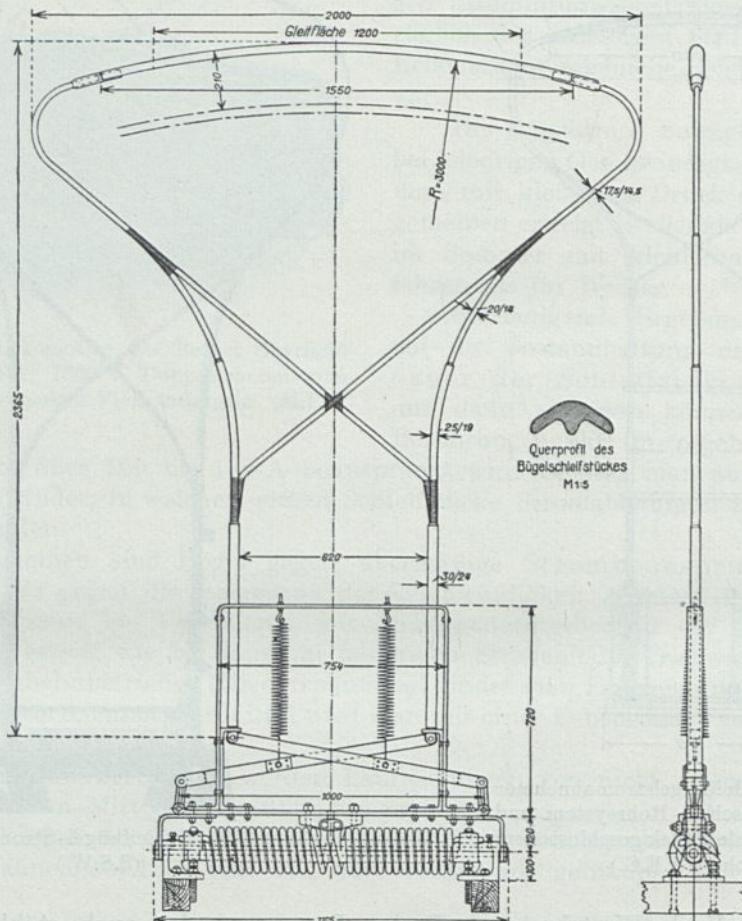


Abb. 373. Schleifbügel-Stromabnehmer mit durchdrückbarem Gestell.
(Züricher Straßenbahn.)

spannter Leitung ist hierzu ein nicht geringer Kraftaufwand an der Bügelleine nötig; oft ist das Umlegen überhaupt nur in der Mitte des Spannfeldes möglich, unter Umständen, z. B. bei steilen Zahnradbahnen, überhaupt undurchführbar.

Diesen Eigenheiten dieser Bauart Rechnung tragend zieht man in Endstationen, wie überhaupt an Stellen wo regelmäßig umgewechselt wird, die Fahrleitung etwas höher, so daß die Pfeilhöhe des Sektors des vom Bügel beim Umlegen beschriebenen Kreises verringert wird.

Diese Schwierigkeit trachtet man mit einem Bügelsystem zu umgehen, bei welchem die geraden Seiten der Leier teleskopartig ausgestaltet sind, so daß sich der Rahmen beim Durchdrücken etwas kürzt. Diese Bauart hat wesentlich mehr

Bestandteile als der vorbeschriebene Bügel, erfordert daher im Betrieb sorgfältige Wartung (Abb. 371).

Eine Vermischung der beiden beschriebenen Bauarten verwenden die Straßenbahnen in Zürich (Abb. 373).

Die Schwierigkeiten, die mit den Durchdrücken des Bügels unter der Fahrleitung verbunden sind, können umgangen werden, wenn man den Federbock drehbar anordnet. Die Lösung ist umständlich und schließt das Abknicken des Bügelrahmens nicht aus, wenn mit nach vorne liegendem Bügel gefahren wird (Abb. 374).

Die beschriebenen Bauarten eignen sich vornehmlich für Straßenbahnbetriebe mit mäßigen Geschwindigkeiten und mit im allgemeinen wenig veränderlicher Höhenlage der Fahrleitung. Kommen Tunnels, Unterfahrungen und dergl. oft vor, die mit Geschwindigkeit befahren werden müssen, eignet sich hierzu die in Abb. 375, 376 dargestellte Anordnung besser, weil bei dieser sich der Arbeitswinkel des Schleifstückes mit Änderung der Höhenlage nicht ändert. Diese Anordnung bedingt je einen Stromabnehmer für jede Fahrtrichtung.

Wenn die Fahrgeschwindigkeit über 30 bis 40 km/h gesteigert wird, versagen die Bügelstromabnehmer mit leierförmigem Rahmen, weil die Trägheit des Systems verhältnismäßig groß ist und die Federspannung nicht ausreicht um die Masse des Bügels beim Passieren unebener Stellen so zu beschleunigen, daß die Berührung mit dem Fahrdräht gewahrt bleibt. Ver-



Abb. 374. Bügelstromabnehmer mit drehbarem Federbock. (A.E.G.)

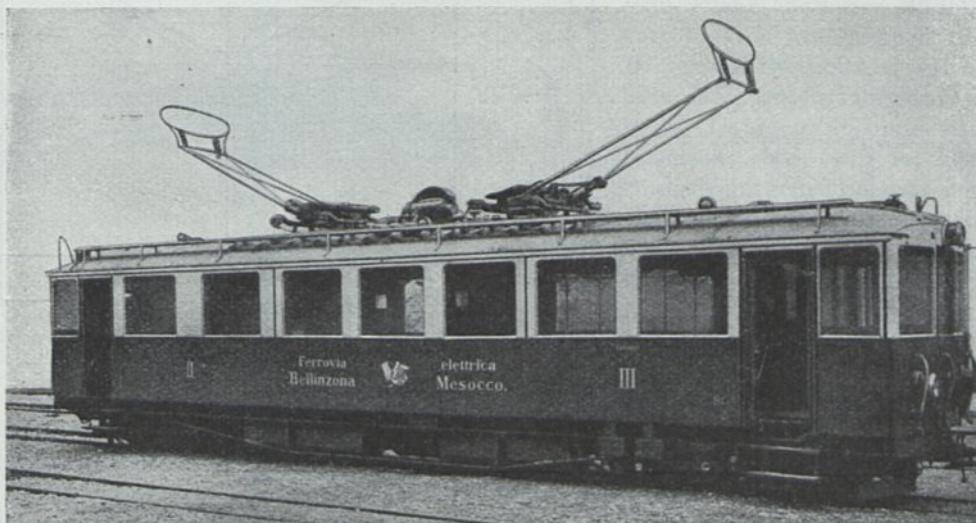


Abb. 375. Bügelstromabnehmer für große Höhenunterschiede.

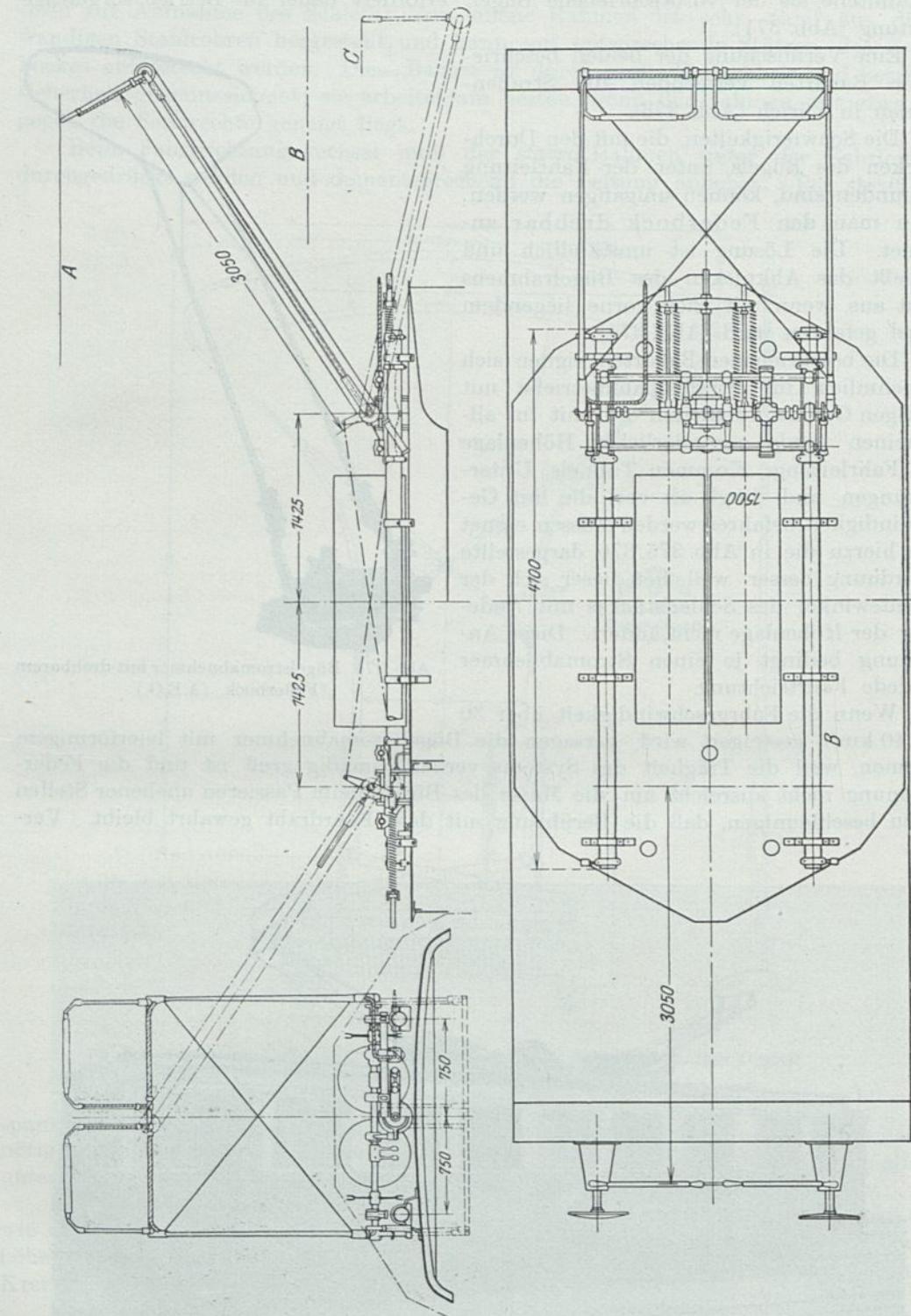
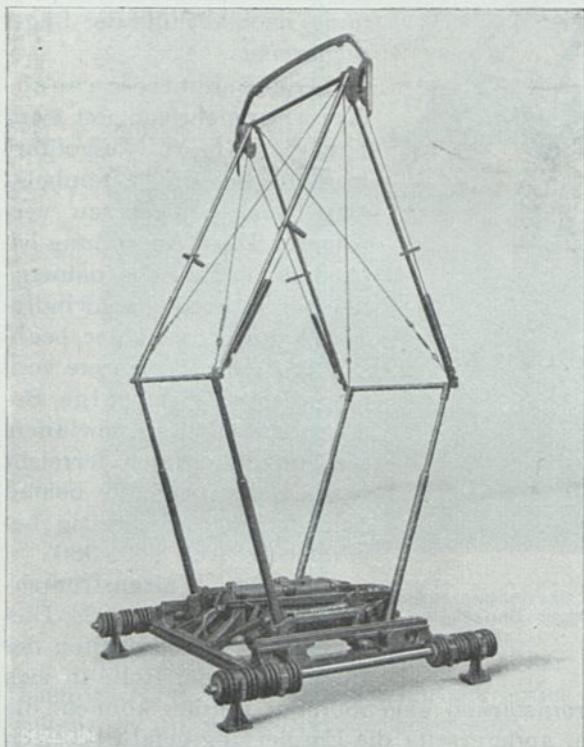


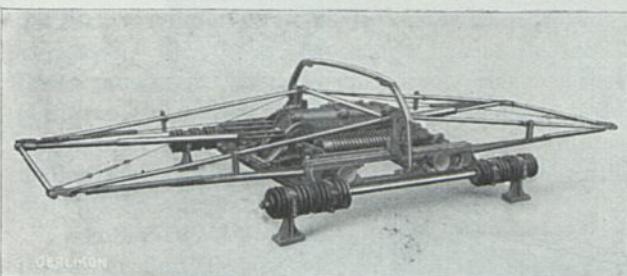
Abb. 376. Doppelbügelstromabnehmer für Drehstrombetrieb. Italien. Staatsb. Betriebsspannung 3000 V. (West.)

mehr wird dieser Übelstand noch durch die verhältnismäßig große, dem Winddruck ausgesetzte Fläche des Bügelsystems.

Unbequem ist namentlich beim Hochspannungsbetrieb das Umlegen des Bügels. Für Vollbahnen, wo diese Eigenschaften des leierförmigen Gestelles nicht in den Kauf genommen werden können, ist daher der Scherenstromabnehmer mit pendelndem Schleifstück zur Regel geworden (Abb. 377, 378, 379).



a



b

Abb. 377. Scherenstromabnehmer für Fahrleitungshöhen von 4—7 m; a hochgezogen, b niedergelassen. Bügedruck 2—4 kg (M.F.O.).

Unebenheiten der Fahrleitung, zur Regel geworden, diese Bauart, die meist für Hochspannungsbetriebe gebräuchlich ist, zu zweit auf einem Fahrzeug anzutordnen.

Der Bügelstromabnehmer mit Leiergestell wiegt in der für Straßenbahnen üblichen Bauart etwa 60 bis 65 kg, wogegen ein Scherenstromabnehmer für Vollbahnbetriebe ein Baugewicht von 500 kg beansprucht. Hierin ist der Druckluftbetätigungszyylinder inbegriffen. Die Druckluftbetätigung wird benötigt, um

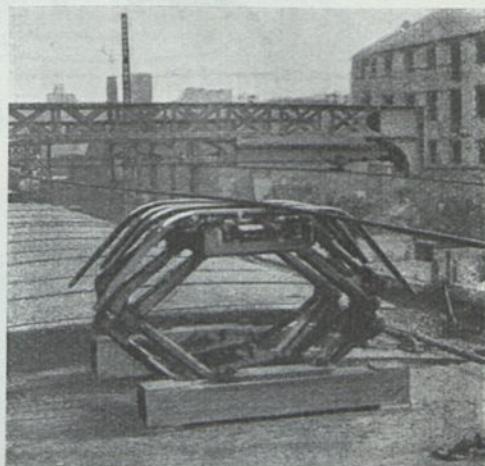


Abb. 378. Bügelscherenstromabnehmer niedriger Bauart der Nord-Süd-Untergrundbahn, Paris.

Der Scherenstromabnehmer in der in Abb. 377 dargestellten Bauart — von welcher andere Ausführungen nicht grundsätzlich verschieden sind — legt sich bei Fahrtrichtungswechsel selbsttätig um. Die Gewichtsverteilung und die Federcharakteristik ist eine solche, daß der Bügel unvermittelten Änderungen in der Höhenlage der Leitung selbst bei hoher Fahrgeschwindigkeit folgen kann. Dabei ist es ohne weiters erzielbar, daß sich der Berührungsdruck selbst bei sehr großen Höhenunterschieden der Fahr drahlage nicht viel ändert. Nichtsdestoweniger ist es zur Vermeidung von Überspannungen, verursacht durch Störungen am Bügel bei hoher Fahrgeschwindigkeit oder unvorhergesehenen

den Bügel jederzeit rasch und gefahrlos herablassen zu können. Zu diesem Zwecke werden die Widerlager der Spannfedern mit einem durch Druckluft betätigten Hebel- system in Verbindung gebracht, so daß durch Ablassen der Druckluft die Federspannung nachläßt und der Bügel niedergeht.

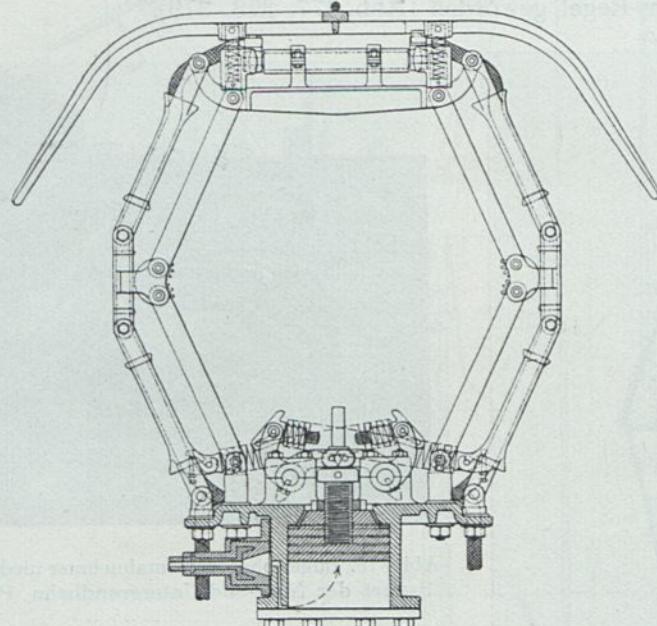


Abb. 379. Bügel-Scherenstromabnehmer niedriger Bauart der Pariser Nord-Süd U.G.

vereinigen, indem mit der Walze Stromstärken abgenommen werden können, die denjenigen^r der Rolle nicht nachstehen, andererseits die Entgleisungsgefahr beseitigt ist. Im größeren Maßstabe und für technisch hochwertige Aufgaben ist die Walze

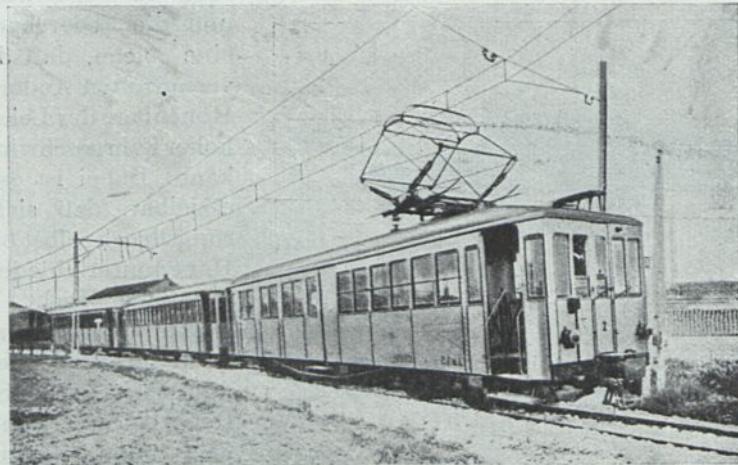


Abb. 380. Scherenstromabnehmer mit zwei Schleifstücken (Neapel-Piedimonte, 6000 V).

mit Parallelogramm-Rahmen für den Betrieb der italienischen Drehstrombahnen ausgebildet worden. Sie wurde in Amerika für schweren Vollbahnbetrieb mit hoch-

Scherenstromabnehmer sind mehrfach mit zwei Schleifstücken ausgeführt worden, um die Strombelastung eines Bügels zu verringern. Diese Anordnung befriedigt im Betriebe namentlich bei höheren Geschwindigkeiten nicht, weil der beabsichtigte Zweck, mehrere von einander unabhängige Berührungsstellen zu gewinnen, nur unvollkommen erreicht wird, indem sich die beiden Schleifstücke gegenseitig beeinflussen (Abb. 369, 380).

5. Der Walzenstromabnehmer. (Abb. 381, 382.) Dieser soll die Eigenschaften des Bügels und der Rolle in sich

gespanntem Gleichstrombetrieb bis Stromstärken von 600 A versucht, ist dann durch Schleifbügel, die die Abnahme bis zu 3000 A gestatten, ersetzt worden.

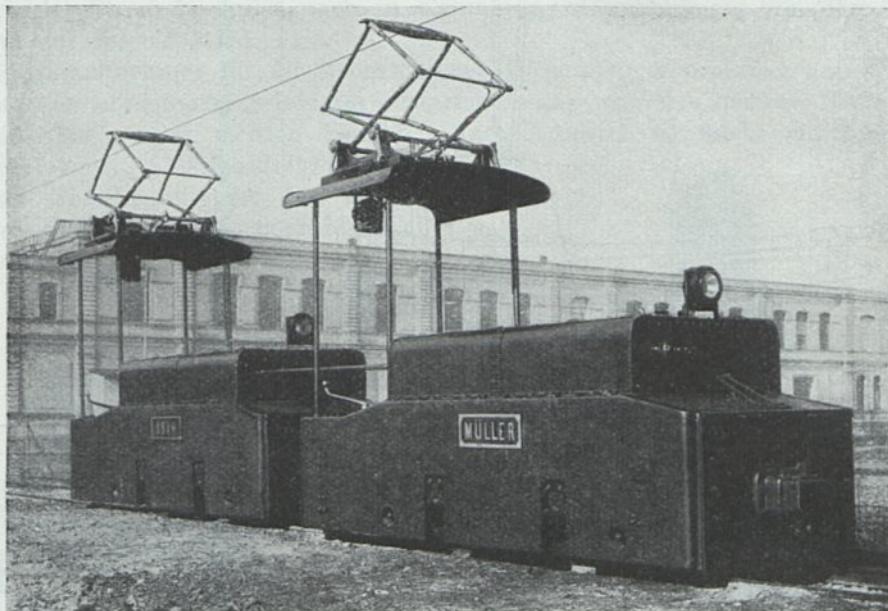


Abb. 381. Walzenstromabnehmer mit Scherengestell. (S.S.W.)

Die befriedigende Stromabnahme der Walze wird durch ihr hohes Gewicht beeinträchtigt, ihre Betriebssicherheit leidet unter den zahlreichen heiklen Bestandteilen, die zu ihrem Aufbau nötig sind.

Die Walzenstromabnehmer arbeiten mit 15 bis 18 kg Druck. Die Leistung einer Walze der Butte-Anaconda-Bahn erreicht 90000 km.

Tatsächlich scheint die Walze noch bei keiner Anlage, bei welcher sie eingeführt wurde, voll befriedigt zu haben, denn man hat sie bei Neuausführung meist verlassen. Die Butte-Anaconda-Bahn, die mit 2400 Volt Gleichstrom betrieben wird, hatte noch die Walze; die nach ihrem Muster mit 3000 Volt Gleichstrom ausgeführte Chicago-Milwaukee- und St. Paul-Bahn ist dagegen schon auf den Schleifbügel übergegangen. Das Gleiche sieht man bei den Drehstromlokomotiven der italienischen Staatsbahnen; die ersten Lieferungen waren mit Walzen ausgerüstet, um später auf den Bügel überzugehen.

Außer der feinmechanischen Herstellung der Walze liegt der Hauptnachteil in ihrem großen Trägheitsmoment. Die Federkraft reicht infolgedessen nicht aus, um dem System die zur ungestörten Stromabnahme bei Unebenheiten der Leitung nötige Beschleunigung zu erteilen. Dies gilt insbesondere für die Bauart der Valtellina-Lokomotiven (Abb. 382); das scherenförmige Gestell, das meistens verwendet wird, arbeitet in dieser Hinsicht besser.

6. Stromabnehmer für Unterleitung. Die in einem bis auf einen schmalen Schlitz geschlossenen Kanal angeordnete Unterleitung ist nur durch den genannten Schlitz zugänglich. Dieser darf höchstens 28 bis 32 mm lichte Weite haben, sonst klemmen sich in denselben die Räder der Straßenfuhrwerke.

Es ist naturgemäß eine schwierige Aufgabe einen Stromabnehmer, der mechanisch widerstandsfähig ist und elektrisch betriebssichere Isolierungen aufweist, mit den durch den schmalen Schlitzkanal bedingten Dimensionen zu bauen, insbesondere

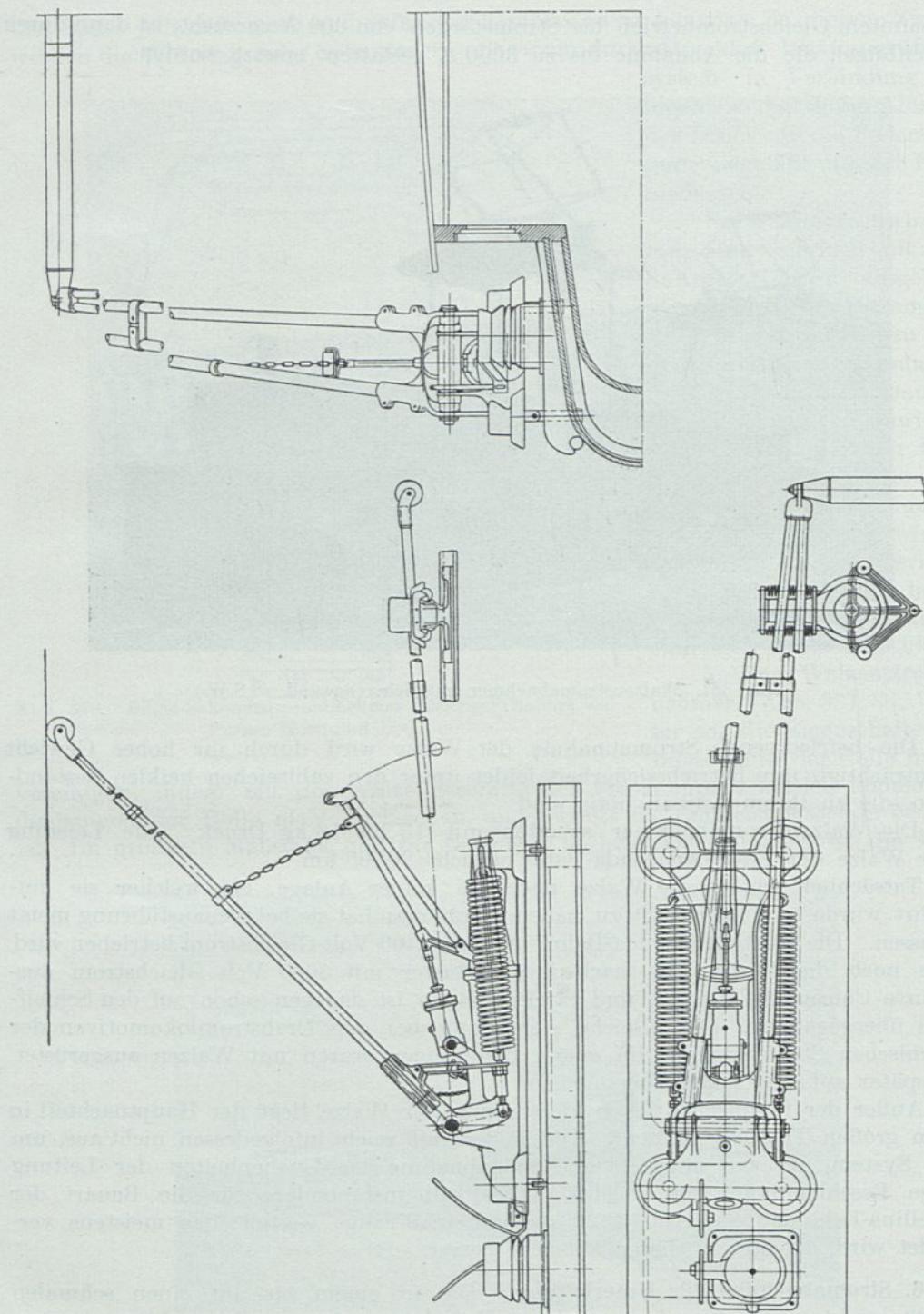


Abb. 382. Doppelwalzen-Stromabnehmer mit Rahmengestell der Valtellinabahn. (Ganz.)

wenn man bedenkt, daß derselbe, um nach Bedarf hochgezogen zu werden, mit zusammenklappbaren Schleifstücken versehen sein muß. Diese Aufgabe ist tatsächlich nicht befriedigend gelöst worden und daher haben die meisten Unternehmungen Gelegenheit gesucht um dieses Stromzuführungssystem zu verlassen.

Verhältnismäßig gut arbeitet der bei den Straßenbahnen in Wien und Budapest gebräuchliche Schlitzkanalstromabnehmer (Abb. 113). In Budapest ruht der selbe auf einem in den Schlitz geführten Schleifschuh unmittelbar auf der Schiene, wodurch der Stromabnehmer auch in Krümmungen unabhängig von dem Wagenradstand gut gelenkt wird.

7. Stromabnehmer für die Stromschiene. Diese können praktisch unbeschränkte Stromstärken abnehmen, indem im Bedarfsfall ohne weiteres mehrere Schleifstücke nebeneinander gesetzt werden können. Nach Armstrong reicht ein Schleifstück der Regelbauart — Länge 230 mm — bei 55 km/h Geschwindigkeit für 2000 A aus. Bei 120 km/h können noch 500 A abgenommen werden.



Abb. 383. Stromabnehmer für Stromschiene, Berührungsdruck durch Eigengewicht erzeugt.

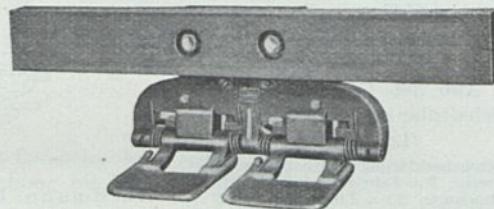


Abb. 384. Stromabnehmer für Stromschiene mit Federdruck.

Die Schleifstücke sind meistens aus Gußeisen hergestellt und erhalten zuweilen Einsätze aus weichem Stahl.

Der Berührungsdruck beträgt 4 bis 5 kg. Dieser wird durch Eigengewicht des Schuhes (Abb. 383), oder durch Federdruck erzeugt (Abb. 384). Die Anordnung ist für obere oder untere Bestreichung (Abb. 385) ziemlich gleich.

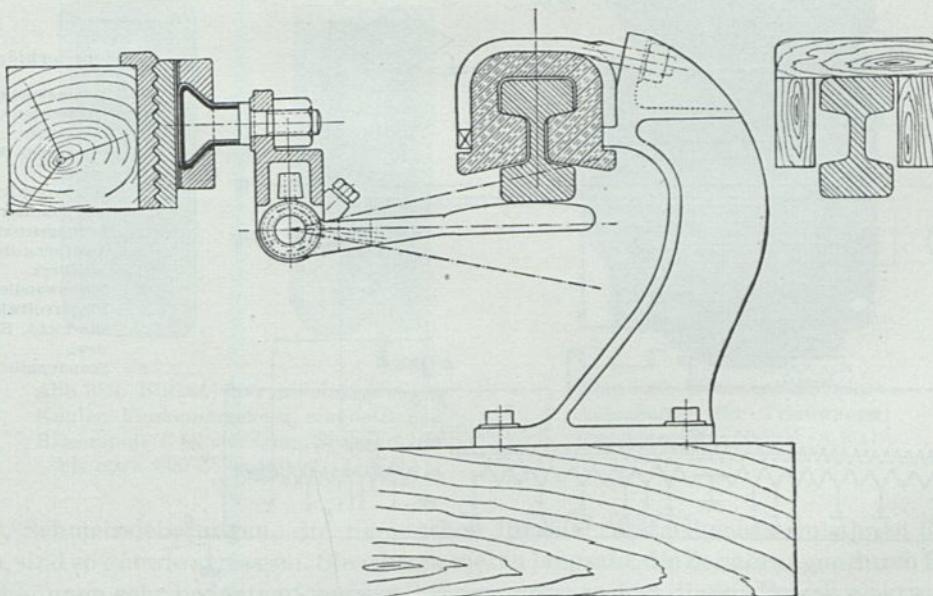


Abb. 385. Stromabnehmer für die Stromschiene, untere Berührung.

Die Lebensdauer der Schleifstücke wird sehr verschieden angegeben. Auf der New-York-Zentralbahn (untere Stromabnahme) läuft ein Schuh nur etwa 5700 km, wogegen die Aurora-Elgin-Bahn eine Lebensdauer von 160000 km angibt; im Mittel darf mit etwa 50000 km gerechnet werden.

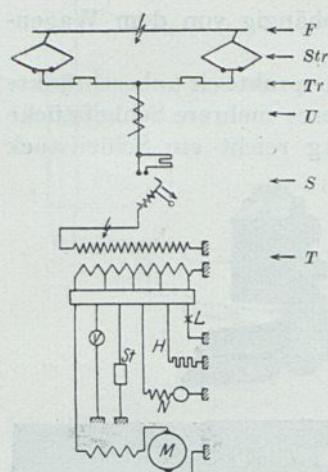


Abb. 386. Grundsätzlicher Schaltplan einer Wechselstrom-Lokomotive.

Zeichenerklärung: F = Hochspannungs-kreise; F = Fahrleitung, Str = Strom-abnehmer, Tr = Trennschalter, U = Ueberspannungsschutz, S = Oelschalter mit elektromagnetischer Auslösung und Schutzwiderstand, T = Haupt-transformator.

Niederspannungskreise: M = Haupt-Triebmaschinen, N = Hilfsmotoren, St = Steuerstrom, V = Meßapparate, H = Heizung, L = Beleuchtung.

8. Isolation der Stromabnehmer. Für Betriebsspannungen bis etwa 800 Volt können die Stromabnehmer auf Bohlen aus gutem, trockenen Holz gesetzt werden. Diese Isolation reicht im allgemeinen auch dann aus, wenn das Wagendach selbst nicht aus isolierendem Stoff besteht. In Gruben- und Hüttenbetrieben wie überhaupt dort, wo mit einer starken Beschmutzung, mit mehr oder weniger leitendem Staub zu rechnen ist, sind besondere Porzellanisolationen vorzusehen.

In Hochspannungsbetrieben ist eine doppelte Isolation üblich.

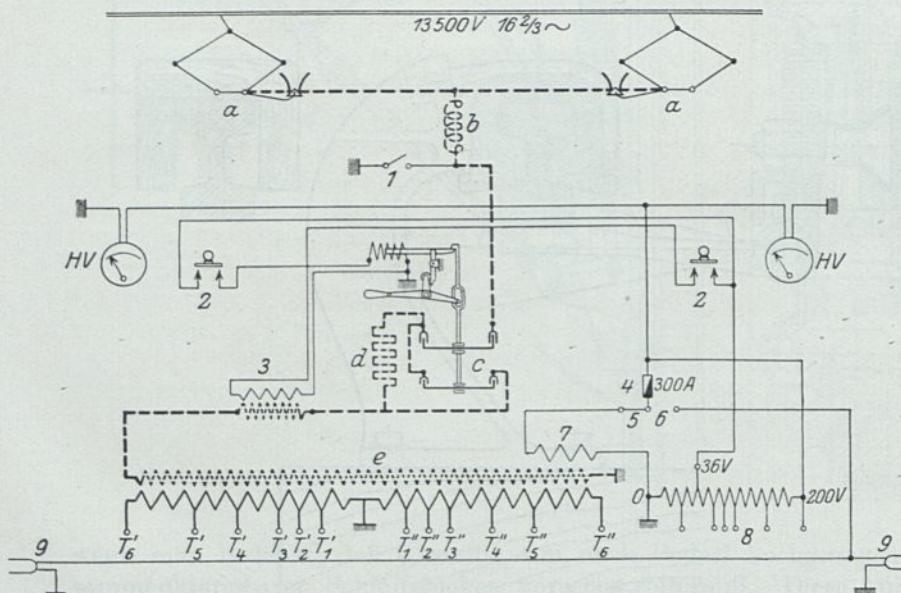
IX. Nebeneinrichtungen.

Literatur:

Nordmann. Die Zugheizung auf elektr. Vollbahnen. V.T. 1921. H. 3.
Rosenberger. Steam heating electr. trains. E.R.J. 1921. Bd. 58. Nr. 6.
Whittaker. Layont of apparatus in the cab of the Ch.M. & St.P. Locomotives. E. J. 1920. S. 249.

* * * Niederspannungsbeleuchtung elektrisch betriebener Überlandbahnen. Sch.E.T.Z. 1919. S. 35.

Dem Stromlauf vom Stromabnehmer zum Steuerapparat folgend, sind verschiedene Behelfe (Abb. 386, 387) zur Wahrung der Betriebs sicherheit nötig:



Zeichenerklärung:

- a = Stromabnehmer,
- l = Drosselpule,
- c = Ölschalter,
- d = Überschalt-Widerstand,
- e = Hochvoltwicklung des Transformators,
- 1 = Erdungsschalter,
- 2 = Auslösung des Ölschalters,
- 3 = Stromwandler,
- 7 = Niedervoltwicklung für Licht, Heizung usw.,
- 8 = Spannungsleiter.

Abb. 387. Schaltbild für den Hochspannungskreis einer Wechselstrom-Lokomotive. Preuß. Staatsbahnen. Reihe 511, 15000 V Betriebsspannung.

1. In keinem Falle darf eine Drosselpule als Blitzschutz fehlen. Etwa zehn Windungen aus blankem Kupferdraht der jeweiligen Betriebsspannung entsprechend isoliert genügen.

Hochspannungsfahrzeuge erhalten keine Funkenableitung, weil diese meist die Quelle der gefürchteten Überspannungen sind. Man verläßt sich vielmehr auf die Blitzschutzeinrichtungen der Strecke und der Unterwerke.

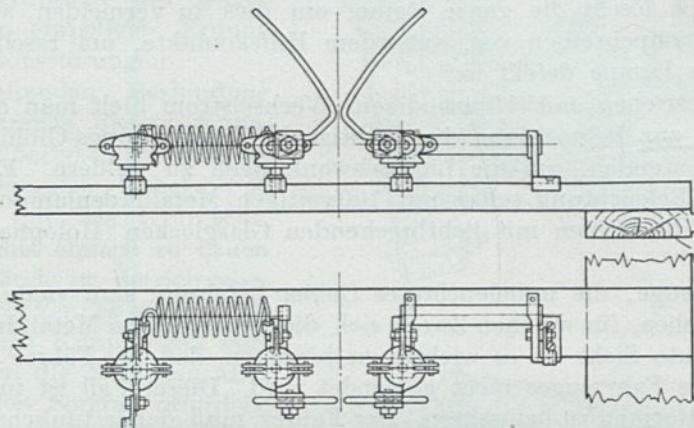


Abb. 388. Hörnerblitzableiter mit Drosselpule, Triebwagen; Dachanordnung für Betriebsspannung bis 1000 V. (S.S.W.)

Bei Gleichstrombahnen sind Hörnerblitzableiter (Abb. 388) oder Funkenstrecken (Abb. 389), beide mit magnetischer Funkenlöschung und Dämpfungswiderständen in Gebrauch.

In Gleichstrombetrieben hat es sich vielfach als zweckmäßig erwiesen, während der Gewitter die Wagenbeleuchtung einzuschalten, um auf diesem Wege die statischen Ladungen abzuleiten.

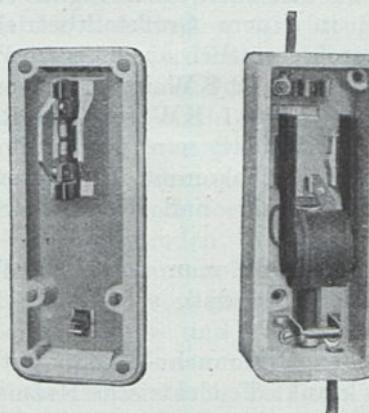


Abb. 389. Blitzableiter mit einstellbarer Kohlen-Funkenstrecke u. magnetischer Bläserspule f. Gleichstrom, Spannungen bis etwa 800 V geeignet. (G.E.C.)

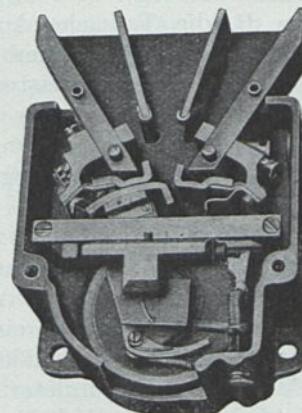


Abb. 390. Höchststrom-Selbst-Ausschalter für Triebwagen; Gleichstrom bis 1000 V. (A.E.G.)

2. Schmelzsicherungen, die namentlich für 500 Volt Gleichstrombahnen üblich waren, sind so gut wie verlassen. Sie wirken viel zu langsam, die Zerstörungen durch Kurzschluß können sehr bedeutend werden. Besser entsprechen diesem Zweck elektromagnetische selbstdurchtretende Höchststromausschalter, die für Gleichstrom mit elektro-

magnetischer Funkenlöschung versehen sind (Abb. 390). Für Hochspannungsbetriebe sieht man die in ortsfesten Anlagen gebräuchlichen Ölschalter vor. Der Bedienungshebel oder -griff dieses Schalters ist stets in der Nähe des Fahrers von diesem leicht erreichbar anzutragen.

3. Die Beleuchtung wird soweit irgendmöglich von der Fahrleitung gespeist. Bei 500 bis 1000 Volt sind dann 5 bis 10 Lampen in Reihe zu schalten. Ein Defekt an einer Lampe löscht die ganze Reihe; um dies zu vermeiden, sieht man mindestens zwei Lampenreihen vor, außerdem Hilfskontakte, um rasch feststellen zu können, welche Lampe defekt ist.

In Bahnbetrieben mit 15 periodigem Wechselstrom hält man es ursprünglich für notwendig, zur Beleuchtung dickdrähtige Niederspannungs-Glühlampen (10 bis 30 Volt) zu verwenden, um die Lichtschwankungen zu mildern. Es hat sich gezeigt, daß die Beleuchtung selbst mit 100voltigen Metallfadenlampen ganz erträglich ist, wenn die Birnen mit lichtbrechenden Glasglocken (Holophanglas) umhüllt werden.

Für Fahrzeuge, die unbeleuchtetes Gebiet befahren, sind vielkerzige Scheinwerfer vorzusehen, für welchen Zweck sich die neuzeitlichen Metalldrahtlampen gut eignen. Für gute Sicht ist es wichtig zu beachten, daß der Fahrer von der Eigenbeleuchtung des Fahrzeuges nicht geblendet wird. Dieser Fall ist insbesondere bei verglasten Plattformen zu befürchten. Der Fahrer muß daher tunlichst im Finsternen stehen und muß das Licht vom Wageninneren abgeblendet werden.

Von 1000 Volt Betriebsspannung aufwärts ist es untnlich, die Beleuchtung unmittelbar anzuschließen. Zur Speisung der Lichtstromkreise und gegebenenfalls nötiger anderer Nebenbetriebe sieht man kleine Motorgeneratoren (Dynamotoren) zur Umformung der Spannung vor. Fallweise können für diesen Zweck auch Zugsbeleuchtungsmaschinen, wie sie bei Dampfbahnen gebräuchlich sind und die von einer Laufachse angetrieben werden, verwendet werden.

4. Die Heizung der Fahrzeuge elektrischer Bahnen kann nur dort mit elektrischem Strom besorgt werden, wo die Kosten desselben erschwinglich sind. Hierüber gibt z. B. die Tatsache Aufschluß, daß in einem Großstadtbetrieb für die Fortbewegung eines Wagenzuges bestehend durchschnittlich aus 2 bis 2,5 Wagen von je etwa 10 m Länge eine Leistung von etwa 10 bis 12 KW im Mittel erforderlich ist. Für die Heizung dieses Zuges — nur mit 0,1 KW für das Raumometer gerechnet — würde eine Leistung von etwa 15 KW nötig sein, was somit etwa einer Verdoppelung der Beanspruchung des Kraftwerkes gleichkommt. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, ordnet man im Winter die Anfahr- und Bremswiderstände im Wageninnern an.

In Betrieben mit Pauschalbezug des Stromes hilft man sich in der Weise, daß man am Steuerschalter einen Anschluß vorsieht, so daß, sobald der Fahrstrom ausgeschaltet ist, die Heizung eingeschaltet wird.

Abgesehen von dem verhältnismäßig großen Verbrauch — man hat mit 0,25 bis 0,1 KW für das Raumometer zu rechnen, krankt die elektrische Heizung an dem Übelstand, daß eine ziemlich lange Zeit verstreicht, bis die gewünschte Temperatur erreicht wird.

Die Rhätische Bahn sieht für Abteile mit einer Außenwand 190 W/m³, mit zwei Außenwänden 210 W/m³ und für Abteile mit 3 bis 4 Außenwänden 250 W/m³ vor.

Mit Rücksicht auf die Freizügigkeit der Fahrzeuge wird man bei Vollbahnen vorläufig mit der bisherigen Dampfheizung zu rechnen haben.

Als Heizkörper kommen nur mechanisch widerstandsfähige Typen in Betracht, weil die Erschütterungen der Fahrzeuge hohe Beanspruchungen darstellen.

In elektrotechnischer Hinsicht ist zu beachten, daß Heizkörper für Bahnen mit verhältnismäßig geringer Strombeanspruchung in bezug auf die mittlere Spannung verwendet werden dürfen, weil beträchtliche Spannungsschwankungen die Regel sind und die Heizkörper bei Spannungserhöhung quadratisch mehr beansprucht werden.

Weiter verursacht die Nichtbeachtung der einpoligen Erdung vielfach Isolationsstörungen.

5. Zur leitenden Verbindung mehrerer Fahrzeuge dienen **Kupplungen**. Diese bestehen aus Stecker, Dose und biegsamem Kabel. Für diese Behelfe gilt als Grundsatz, daß sie möglichst einfach zu bauen sind, um Anstände im Betrieb möglichst einzuschränken: es sind grundsätzlich einpolige Kupplungen vorzuziehen, sofern die Schaltung dies zuläßt. Besondere Sorgfalt erfordern die Bremskupplungsdosen (Abb. 391), weil das Herausfallen einer Kupplung die Bremswirkung aufheben kann.

Man sichert die Bremskupplungen durch besondere Deckelhaken gegen das Herausfallen. Außerdem schaltet man einen Widerstand parallel, um dieser Gefahr vorzubeugen.

6. Zur Herstellung der leitenden Verbindungen zwischen den einzelnen Bestandteilen der elektrischen Ausrüstung eines Fahrzeuges bedarf man einer Reihe **Kabel**, die je nach den ihnen obliegenden besonderen Aufgaben strangweise in Schläuche aus Hanf mit Gummieinlage, Holz- oder Isolierrohre verlegt werden. Es ist anzustreben, die Anzahl der Leitungen möglichst zu verringern.

Die einzelnen Stromzweige können hier der Natur der Sache nach nicht besonders gesichert werden, es ist daher in jeder Beziehung auf sorgfältigste Herstellung der Leiter und der Isolation zu achten. Für die Leiter sei es Regel feinlitige Kabel zu verwenden, denn nur diese vertragen auf die Dauer Erschütterungen ohne Schaden und nur bei diesen ist man sicher, daß die Isolation bei scharfen Krümmungen nicht von innen heraus beschädigt wird.

Doppelte Gummi- und Papierisolation mit imprägnierter Umspinnung ist unerlässlich. An den Enden und Speisestellen ist die Isolation sorgfältig abzubinden und die Kabelenden durch Verlöten zu einem stiftartigen Ende auszubilden.

Eine sorgfältige Verzinnung der Drähte ist mit Rücksicht auf die Rostgefahr in Fahrzeugen von besonderer Wichtigkeit.

Bei Vollbahnhafenfahrzeugen führt man die Verbindungen zwischen Steuerung und Transformator als blanke Schienen aus, was konstruktiver aussieht, doch ist auch hier auf genügende Elastizität der Verbindungen zu achten.

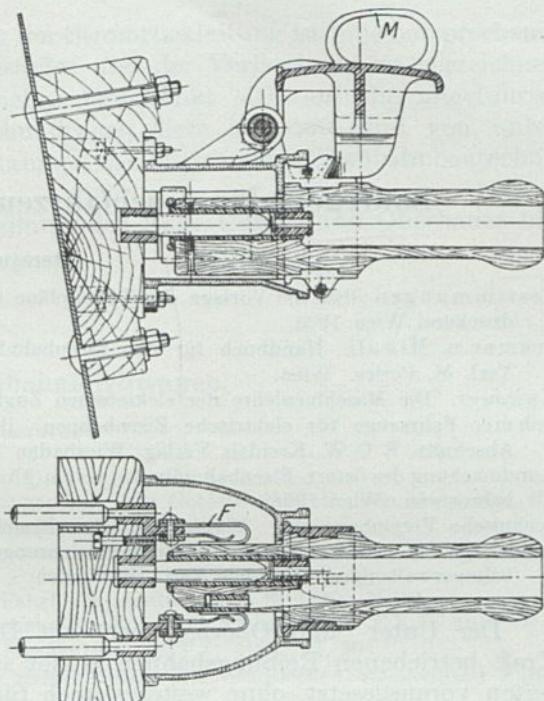


Abb. 391. Bremskupplungsdose mit Deckelsicherung für das Bremskabel. (S.S.W.)

Bauregeln für Triebfahrzeuge mit Reibungsbetrieb.

Literatur:

- Bestimmungen über die Vorlage der Typenpläne und die Bauart von Fahrbetriebsmitteln. Staatsdruckerei Wien 1900.
- Cramer u. Mikuli. Handbuch für den Eisenbahnbau-, Bahnerhaltungs- und Bahnaufsichtsdienst. Verl. M. Perles. Wien.
- Kummer. Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung. Verl. Julius Springer, Berlin 1915.
- Zehme. Fahrzeuge für elektrische Eisenbahnen. Die Eisenbahntechnik der Gegenwart. IV. Band. Abschnitt E C. W. Kreidels Verlag. Wiesbaden 1914.
- Kundmachung des österr. Eisenbahnministers vom 15. Juni 1908 betr. die technische Einheit im Eisenbahnwesen. Wien 1908.
- Technische Vereinbarungen. Verein Deutscher Eisenbahnverwaltungen. Kreidels Verl. Wiesbaden.
- Grundzüge für den Bau und die Betriebeinrichtungen der Lokalbahnen. Verein Deutscher Eisenbahnverwaltungen. Kreidels Verl. Wiesbaden.

Der Unter- und Oberbau von mit Dampf oder einer anderen maschinellen Kraft betriebenen Reibungsbahnen eignet sich, gleiche Achslasten und Geschwindigkeiten vorausgesetzt, ohne weiteres auch für den elektrischen Betrieb. Der Ober- und Unterbau bedarf im Zusammenhang mit dieser Betriebsart keiner besonderen Erörterung; dieser Gegenstand gehört vielmehr in das Gebiet der allgemeinen Eisenbahnbautechnik, wenn auch im Zusammenhang mit dem elektrischen Betrieb, namentlich der Straßenbahnen, sich bestimmte Oberbausysteme und Bettungsarten entwickelt haben und einzelne Anordnungen möglich geworden sind — wie die Anlage von Rasenflächen in der Spur — die bei keiner anderen Zugkraft in Frage kommen. Es wird beim Entwurf einer vorweg mit elektrischer Kraft zu betreibenden Bahnanlage vor Augen zu halten sein, daß verhältnismäßig große Steigungen im Betrieb noch wirtschaftlich sein werden, als es beim Dampfbetrieb der Fall wäre.

In der Anlage des Höhenplanes entfällt die Notwendigkeit Strecken mit geringerer Steigung einzuschalten, um die für den Heizer nötigen Pausen vorzusehen. Die Verminderung der Steigungen in den Gleiskrümmungen kann namentlich bei Gebirgsbahnen mit verhältnismäßig großen Steigungen entfallen.

Mit Rücksicht darauf, daß die Anzahl der Triebachsen weit geringeren Einschränkungen unterliegt als bei Dampflokomotiven, können Schmalspurbahnen mit elektrischer Zugkraft für verhältnismäßig viel größere Leistungen gebaut werden als bei Dampfbetrieb. In dieser Hinsicht besteht auch zwischen der Wahl der Spurweite und dem elektrischen Betrieb ein Zusammenhang.

Weiter bedarf es keines näheren Beweises, daß bei Neuanlagen die Wahl der Spurweite insbesondere dann mit Rücksicht auf die von einer Achse abzugebenden Zugkraft bzw. Leistung letzten Endes auf den Achsdruck zu erfolgen hat, wenn Untergestellmotoren, deren Leistung durch die Spurweite begrenzt ist, verwendet werden müssen.

Betrachtet man die Wirkungsweise der Fahrzeuge, so steht dem Vorteil, daß die „störenden Bewegungen“ der Dampflokomotive fehlen, der Nachteil gegenüber, daß der elektrische Antrieb an sich starrer ist, in demselben größere Massen-

wirkungen zur Geltung kommen und bei Untergestellmotoren außerdem ein Teil des Motorgewichts die Achsen ungefedert belastet. Es kann daher dem elektrischen Betrieb mit sachlicher Begründung keine geringere Inanspruchnahme des Oberbaues nachgerühmt werden.

Vom Standpunkt der Verbesserung der Stromrückleitung ist eine entsprechende Entwicklung der Technik des Schienenstoßes und der Verlaschung zu verzeichnen.

Der Einfluß des elektrischen Betriebes beschränkt sich auf die angeführten Momente in der Ausgestaltung des Bahnkörpers; diese Momente sind von untergeordneter Bedeutung und müssen im Rahmen der allgemeinen Eisenbahnbautechnik ihre Behandlung finden.

In diesem Sinn kann die Behandlung des Bahn-Unter- und Oberbaues hier übergegangen werden.

X. Straßenbahntriebwagen.

Literatur:

- Adler. Ein neuer Straßenbahnwagentyp. (Berlin) V.T. 1919, H. 11.
- Delmez. Neuere Erfahrungen und Verbesserungen auf dem Gebiete des rollenden Materials elektrischer Straßenbahn. Kasten und Plattformen. I.S.K.B.V. 1910.
- Favarger. Nouvelles voitures motrices et de remorques de la Cie Genévoise des Tramways Electriques. Sch.B.Z. 1920. Bd. 76. Nr. 22.
- Hartmann. Über Wagenkästen elektrischer Fahrbetriebsmittel. E.K.B. 1920. H. 19.
- Juliusburger. Über Handbremsen für elektrische Straßen- und Kleinbahnen. E.K.B. 1913. H. 3.
- Kindler. Neue Triebwagen für die Berliner Straßenbahn. E.T.Z. 1921. H. 30.
- Largiader. Motorwagen und Anhängewagen neuer Bauart der Städtischen Straßenbahn Zürich. Sch.B.Z. Sept. 1919. S. 134.
- Largiader. Kugel- und Rollenlager. I.S.K.B.V. 1914.
- Litchfield. Applying engineering principle in design of trucks. E.R.J. Juli 1918.
- Nordmann. Neuere amerikanische Straßenbahnwagen. E.K.B. 1913. H. 15.
- Schörling. Röllen- und Kugellager. I.S.K.B.V. 1914.
- Seefehlner. Zur Frage der rein elektrischen Bremsung der Straßenbahnwagen und über einen neuzeitlichen Motorwagenentwurf. E.K.B. 1919. H. 24.
- Spängler-Stahl. Neuere Erfahrungen und Verbesserungen des rollenden Materials elektrischer Straßenbahnen. I.S.K.B.V. 1910.
- Stahl. Abnutzung und Lebensdauer der wesentlichsten Teile des rollenden Materials bei Straßenbahnen. (Lieferungsbedingnisse). I.S.K.B.V. 1908.
- Trautvetter. Einmann-Wagen. E.T.Z. 1921. H. 12. — Dasselbe G.E.R. 1920. S. 597. — Ref. E.T.Z. 1921. H. 25. — E.R.J. 1921. Bd. 57. S. 982. — Ref. E.T.Z. 1921. H. 30.
- Werneck. Straßenbahnbetrieb ohne Schaffner. Frankfurter Zeit. „Das techn. Blatt“ 1921. Nr. 12.
- Zehme. Fahrzeuge für elektrische Eisenbahnen. Die Eisenbahntechnik der Gegenwart. Kreidels Verlag. Wiesbaden 1914.
- Zehme. Die Betriebsmittel der elektrischen Eisenbahnen. Kreidels Verlag. Wiesbaden 1903.
- Die Vereinheitlichungsarbeiten des Vereines Deutscher Straßenbahnen, Kleinbahnen und Privat-eisenbahnen. (Nach dem Stande vom Okt. 1920) V.T. Nr. 32. 1920.
- Die Normung der Straßenbahnwagen in Amerika. Z.f.K.B. 1920. H. 12.
- * * * Neue Gesichtspunkte bei Bau von Straßenbahnwagen. B.I.E.B.K.V. 1913. Nr. 8.
- * * * Straßen- und Überlandwagen mit Mittelplattform. E.K.B. 1920. H. 26.
- * * * Sample car tried in San Francisco. E.R.J. 1921. Bd. 57. Nr. 5.

1. Bemessung der Wagengröße. Der Triebwagen ist dadurch gekennzeichnet daß er die Nutzlast nicht nur zieht, sondern mindestens einen Anteil derselben selbst trägt. Aus dieser Eigenart folgt, daß der Motorwagenbetrieb überall dort in Betracht kommt, wo kurze Zugseinheiten verlangt werden, bei welchen das Totgewicht einer Lokomotive den Transport unwirtschaftlich machen würde.

Diesem Umstand ist es zuzuschreiben, wenn der Motorwagen im Straßenbahnverkehr ausschließlich in Gebrauch ist. Praktisch möglich ist der Motorwagen aller-

dings erst durch den elektrischen Antrieb geworden, indem diese Betriebskraft bei einfacher Bedienung die wirtschaftliche Unterteilung der Zugkraft in die nötige Anzahl verhältnismäßig kleiner Einheiten betriebsicher gestattet.

Die Motorwagen dienen vornehmlich dem Personenverkehr mit mäßigen Fahrgeschwindigkeiten (Reisegeschwindigkeit 10 bis 15 km/h), sie vereinigen in sich eine Triebmaschine und ein Fahrzeug für die Unterbringung der Reisenden.

Die Reisenden müssen das Fahrzeug bequem besteigen und verlassen können; sie müssen sich während der Fahrt ungehindert vom maschinellen Antrieb und der Steuerung des Fahrzeuges in denselben aufhalten können. Das Einnehmen des Fahrgeldes pflegt im Wagen zu erfolgen, es muß der Schaffner die Möglichkeit haben sich im Fahrzeug frei zu bewegen. Der letztere Umstand bestimmt zunächst die Größe der Fahrzeuge.

Da im allgemeinen jeder Motorwagen mit zwei Mann, dem Fahrer und dem Schaffner, besetzt sein muß, spielen die Personalkosten in den Betriebsausgaben eine große Rolle.

Die Leistung des Fahrers ist um so besser ausgenützt, je größer der Zug ist, d. h. je mehr Fahrgäste mit einem Zug befördert werden können, immer vorausgesetzt, daß ein Verkehrsbedürfnis überhaupt vorhanden ist. Gibt man dem Motorwagen von diesem Standpunkt einen großen Fassungsraum, so besteht die Gefahr eines Verdienstentganges für das Unternehmen, indem der Schaffner bei dem oftmaligen Wechsel der Reisenden nicht imstande ist von allen das Fahrgeld einzuhaben.

Hieraus folgt, daß Motorwagen für Straßenbahnen mit Haltestellenentfernungen von 250 bis 500 m mit kleinerem Fassungsraum gebaut werden sollen, als für Überlandbahnen mit großen Haltestellenentfernungen.

Straßenbahnwagen mit etwa 10 m Länge und 60 Prozent Innenraum für Sitzplätze bilden für europäische Bahnen ziemlich die Grenze.

In Amerika, wo der Einheitstarif allgemein üblich ist und ein Umsteigerecht nicht gewährt wird, das Fahrgeld außerdem mit der Münzeinheit identisch ist, geht man bei vierachsigen Drehgestellwagen bis zu 15 m Kastenlänge.

Motorwagen für Überlandbahnen erhalten Längen von 18 bis 23 m.

Für große Wagenlängen, insbesondere bei Überlandbahnen, spricht die bessere Lauffähigkeit eines verhältnismäßig langen Fahrzeuges, was insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten von Belang ist.

Der an sich größere Eigenwiderstand eines Triebfahrzeuges spricht dagegen, das Motorwagengewicht über dasjenige Maß zu steigern, welches einerseits die Zugkraft der Triebmotoren verlangt und welches andererseits vom Schaffner beherrscht werden kann. Auch der mit den Längsdimensionen wechselnde Krümmungswiderstand spricht gegen große Wagen bei zweiachsiger Laufwerk.

Die Ausnützung des Fahrers und auch der kostbaren elektrischen Triebeinrichtung wird wirtschaftlich durch Mitnahme von Anhängewagen gesteigert.

Wie weit das Reibungsgewicht ausgenutzt werden darf, d. h. Beiwagen mitgenommen werden können, läßt sich an Hand der im IV. Teil Kap. II./1. durchgeföhrten Betrachtungen ermessen. Weiter kann für überschlägige Rechnungen angenommen werden, daß Motorwagen für Regelspur für das qm Bodenfläche 600 kg schwer sind und je qm einen Sitzplatz aufweisen. Diese Zahlen gelten für schwerere Wagen (etwa 12 t) mit geschlossenen Plattformen und zwei je 50 PS (37 KW) Motoren.

Das Leergewicht von Straßenbahn-Anhängewagen beträgt etwa 310 kg für das qm Bodenfläche, für Wagen mit geschlossenen Plattformen 250 bis 370 kg.

Auf Grund dieser Zahlen und der Tatsache, daß bei starkem Andrang bis 5 Personen, 1 Sitz- und 4 Stehplätze, zu je 75 kg für das qm Bodenfläche zu rechnen sind, kann man für bestimmte Achsdrücke und Verkehrsbedürfnisse das Zugsgewicht berechnen. Z. B. kann ein mit Besetzung 12 t schwerer zweiachsiger Motorwagen

noch einen Beiwagen von 5,5 t Gewicht in 60% schleppen, in 40% dagegen schon fast zwei Wagen desselben Gewichtes.

Der Beiwagenbetrieb erfordert große Geleisellängen an den Endbahnhöfen; das Umstellen der Wagen ist dort, wo keine Schleifen vorhanden sind, zeitraubend und umständlich.

Wo der erforderliche Raum für Schleifen nicht aufzubringen ist, z. B. im eng gebauten Zentrum großer Städte, hilft man sich durch Decksitzwagen oder durch Kupplung mehrerer Motorwagen, die dann mit Vielfachsteuerung ausgerüstet werden.

Welche Betriebsart unter den jeweils vorliegenden Verhältnissen die beste Lösung darstellt, muß erwogen werden.

2. Bauformen. Diesen Anforderungen entsprechend, haben sich gewisse Bauformen und Ausmaße eingebürgert, die einer kritischen Betrachtung deshalb zu unterziehen sind, weil sie eine mehr oder weniger unbesehene Nachahmung der bei Pferdebetrieb und bei den Fernbahnen zweckmäßig gewesenen Typen darstellen.

Der überwiegende Teil der Motorwagen weist zwei Endbühnen — Plattformen — für den Fahrer und für Stehplätze auf; dazwischen befindet sich der geschlossene Kasten mit den Sitzplätzen. Der Ein- und Ausstieg erfolgt auf der jeweils rückwärtigen Plattform.

Die verfügbaren Straßenbreiten sind bestimmt für die Wagenbreiten. Anfänglich baute man verhältnismäßig schmale Wagen, Breite 1,9 m. Diese sind unwirtschaftlich und lassen nur Längsbänke anordnen. Jetzt geht man im allgemeinen auf 2,2 m, ausnahmsweise bis auf 2,6 m Wagenbreite. Das letztere Maß ist in Amerika die Regel.

Bei 2,2 m breiten Wagen und der Quersitzanordnung lassen sich außer dem Mittelgang noch drei Sitze von je 45 cm Breite unterbringen. Einschließlich des Zwischenraums zwischen den Bankreihen bedarf man für zwei Bankreihen 1,5 m Wagenlänge.

Die Höhe des Fußbodens ist gegeben durch den Treibraddurchmesser, diese sind wieder bestimmt durch die Masse der Triebmaschine. Die gangbaren Typen verlangen Durchmesser von 800 bis 850 mm, wobei zwischen Zahnräderkasten als demjenigen Teil des Motors, der am tiefsten herabreicht, ganz abgenützte Radreifen vorausgesetzt, über Schienenoberkante etwa noch 50 mm frei bleiben.

Hieraus folgt, daß der Wagenfußboden, gemessen von Schienenoberkante, in einer Höhe von etwa 850 bis 950 mm zu liegen kommt; sofern Motoren mit kleinem Ankerdurchmesser verwendet sind, kann man die Räder in den Fußboden hineinragen lassen. Die Öffnungen müssen dann mit besonderen Radschutzkappen abgedeckt werden.

Diese Anordnung ist nicht empfehlenswert, denn die Abdichtung gegen aufgeschleudertes Wasser gelingt auf die Dauer kaum.

Bei den Pferdebahnwagen mit geringem Fassungsraum hatte die Frage der Entleerung des Wagens keine besondere Tragweite. Bei der kleinen Reisegeschwindigkeit der Pferdebahnen war der Zeitverlust durch die Standzeiten ohne Belang. Bei den viel größeren Wagen bei elektrischem Betrieb ist das Umgekehrte der Fall. Es ist daher die Anordnung mit den Endbühnen nicht mehr zweckmäßig, insbesondere auch deshalb nicht, weil elektrische Motorwagen eben die bedeutend größere Fußbodenhöhe aufweisen, daher 2 bis 3 ungewöhnlich hohe Stufen beim Einstieg benötigen. Dieser letztere Umstand ist besonders schwerwiegend, weil die dem menschlichen Körperbau unzuträgliche Stufenhöhe von etwa 30 bis 40 cm den Zeitaufwand für das Ein- und Aussteigen ungebührlich vermehrt, insbesondere weil immer zwei, oft drei Stufen dieser Höhe vorhanden sind. Im Hochbau sind bekanntlich Stufen von 15 bis 18 cm Höhe gangbar.

Die durch diese unzweckmäßige Bauart verursachten Übelstände machen sich allerdings nur dort geltend, wo starke Überfüllung der Wagen zumindest zu gewissen Tages-

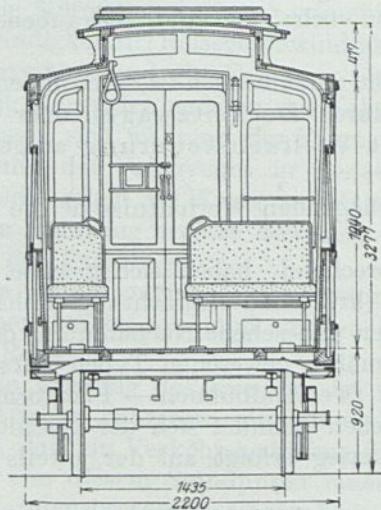


Abb. 392. Querschnitt durch einen Triebwagen mit besonderem Untergestell und Laternendach.

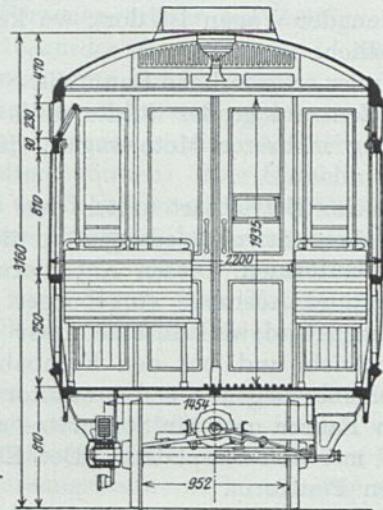


Abb. 393. Querschnitt eines Straßenbahn-Triebwagens m. getrenntem Untergestell und Tonnendach.

zeiten die Regel ist. Die Amerikaner gelangten zuerst zu der Erkenntnis, daß Endbühnen unzweckmäßig sind, wegen der unvermeidlichen Bauhöhe und wegen des verhältnismäßig langen Weges, den die Reisenden und auch der Schaffner im

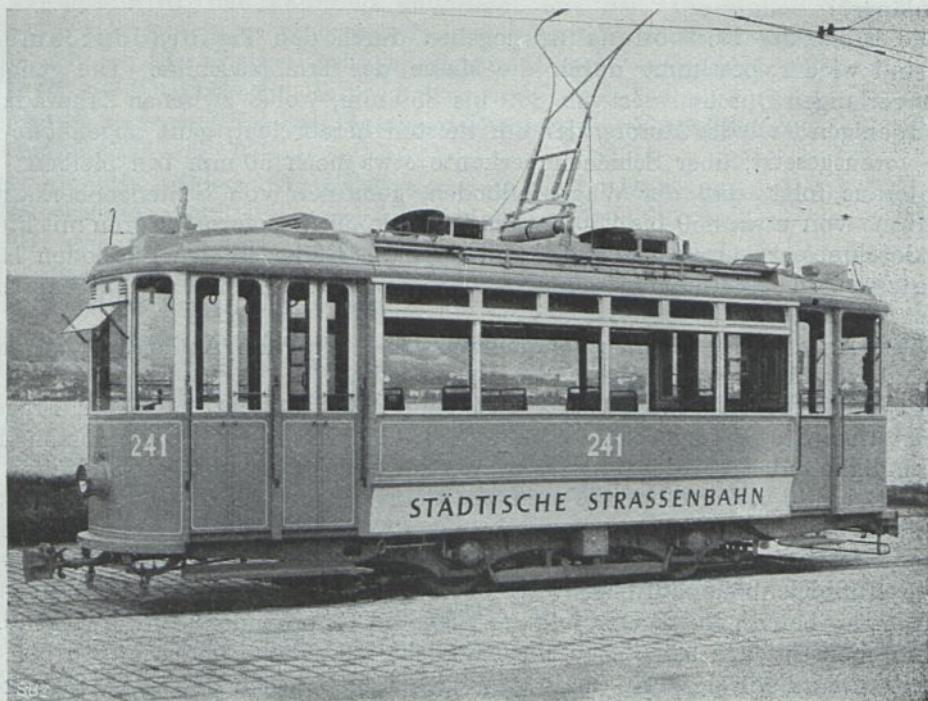


Abb. 394. Triebwagen der Züricher Straßenbahn, Tonnendach, große Plattformen.

This technical drawing provides three views of a vintage tramcar: a side elevation, an interior view, and a cross-sectional view.

Side Elevation: The top-left view shows the exterior of the tramcar. Key dimensions include a total length of 10000 mm, a wheelbase of 9100 mm, and various internal compartments. The front compartment has a width of 3600 mm, and the rear compartment has a width of 2750 mm. The side height is 2750 mm, and the roof height is 450 mm. The front and rear sections each have a height of 2750 mm. The side elevation also shows windows with widths of 7472 mm, 650 mm, and 7200 mm, and doors with widths of 820 mm and 2752 mm. The front and rear sections each have a height of 2750 mm. The side elevation also shows windows with widths of 7472 mm, 650 mm, and 7200 mm, and doors with widths of 820 mm and 2752 mm.

Interior View: The top-right view shows the interior layout. The front section has a width of 1920 mm and a height of 1800 mm. The rear section has a width of 1405 mm and a height of 1935 mm. The side height is 2750 mm. The front and rear sections each have a height of 2750 mm. The interior features a central aisle, doors, and seating areas.

Cross-Section: The bottom view shows a longitudinal cross-section of the tramcar. It highlights the double-decker structure with two levels of passenger seating. Key dimensions include a total width of 10000 mm, a wheelbase of 9100 mm, and a height of 2750 mm. The cross-section shows the internal frame, floor levels, and structural supports.

Abb. 395. Triebwagen älterer Bauart der Wiener Straßenbahn, Lenkachsen, einfache Federung, Laternendach, Längssitze.

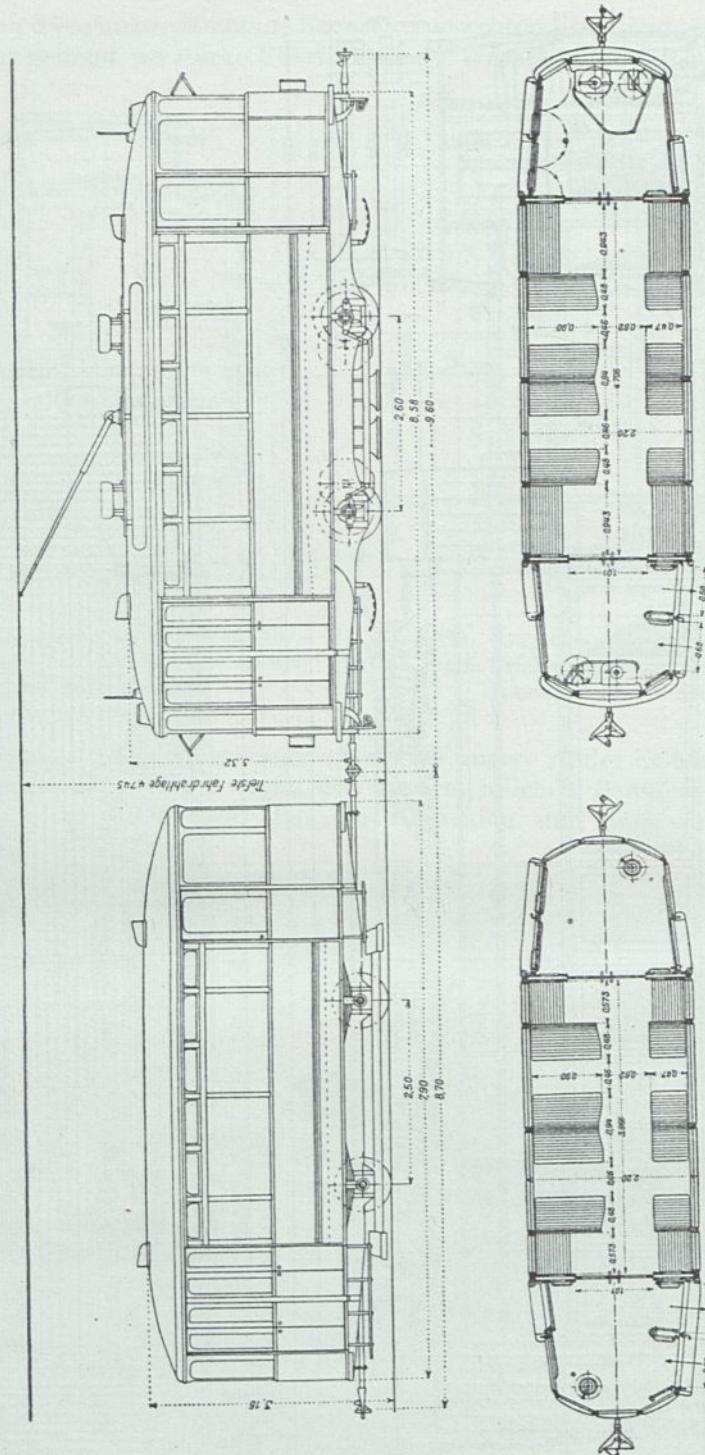


Abb. 396. Ansicht und Grundriss eines Trieb- und eines Anhängewagens der Zürcher Straßenbahn, Tomnendach, Quersitze.

Wageninnern zurücklegen; dort wurden Wagen mit trogartig versenktem Mittel-einstieg gebaut. Mit Ausnahme einer einzigen Stufe von 25 bis 30 cm sind im Fahrzeug keine Treppen vorhanden, indem die Verbindung zwischen Mittelperron und den höher liegenden Sitzräumen durch schiefe Ebenen geschaffen wird. Diese

Anordnung ist nur bei Wagen von 14 bis 15 m möglich, weil die schiefe Ebene, um eine zu steile Lage zu vermeiden, etwa 1500 bis 1600 mm lang sein muß.

Wenn man sich vor Augen hält, daß möglichst große Plattformen, da sie die Stehplatzzahl vermehren, eine reiche Einnahmequelle darstellen, und auch deshalb bevorzugt werden, weil sie die Verkehrsabwicklung erleichtern, kann der Grundriß des Wagenkastens auf fachgemäßer Grundlage entworfen werden.

Die weitere Detailbearbeitung des Wagenkastens ist Sache der Wagenbauanstalt. Hier sei nur noch auf zwei Umstände hingewiesen, die sich als arge Mängel darstellen.

Es ist üblich, an den Seitenwänden Fenster an Fenster zu reihen. Dadurch werden die Säulen so schwach, daß sie sich unter der Wucht des Daches bei jedem Anfahren und jeder heftigen Bremsung verbiegen. Diese Bauart wird insbesondere dann bedenklich, wenn sich am Dach schwere Stromabnehmer befinden. Reichlich breite Säulen mit genügendem Widerstandsmoment sind daher unerlässlich. (Abb. 399.)

Weiter pflegt man die Wagen mit einem Ventilationsaufbau zu versehen. Die auf diese Art entstehende Querschnittsform des Kastens (Abb. 392) lehrt, daß die Dachbinder keine Tragfähigkeit haben können. Bei dieser Bauart tritt unter der Last des Stromabnehmers stets ein Ausbauchen der Seitenwände ein. Die Nachteile dieser Dachform werden etwas gemildert, wenn die Wagen in der Mitte eine feste Zwischenwand besitzen (Abb. 395). Diese bildet allerdings ein arges Verkehrshindernis. Einwandfrei sind nur Kasten mit Tonnendach (Abb. 393, 394, 396).

3. Untergestelle. Die Amerikaner haben erstmalig Motorwagen gebaut, deren Untergestelle — die abgesehen von den beiden Fahrschaltern die gesamte elektrische Einrichtung tragen — vom Wagenkasten vollständig getrennt waren.

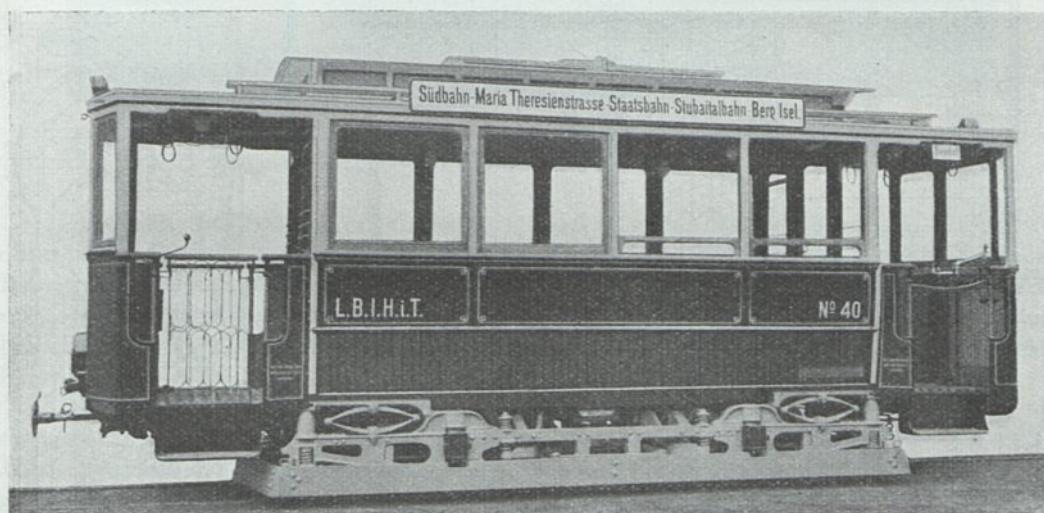


Abb. 397. Triebwagen mit besonderem Untergestell, doppelte bez. des Untergestelles ungénügende Federung.

Dieser Grundsatz ist zweifellos richtig, denn in der Erhaltung der Fahrzeuge ist die Trennung des maschinellen Teiles vom Wagenkasten sehr erwünscht, weil die Instandhaltung für Wagenkasten und Untergestell ganz verschieden geartete Arbeitskategorien voraussetzt. Nichtsdestoweniger mußte diese Type vielfach verlassen werden, weil die Ausführungen mangelhaft waren. Zunächst baute man die Wagen mit zu kleinen Achsständen, so daß bei schneller Fahrt ein bedenkliches Schaukeln eintrat. Unterstützt wurde diese Erscheinung durch eine ganz unzureichende und auch grundsätzlich mangelhafte Federung des Untergestelles auf den Achsen (Abb. 397).

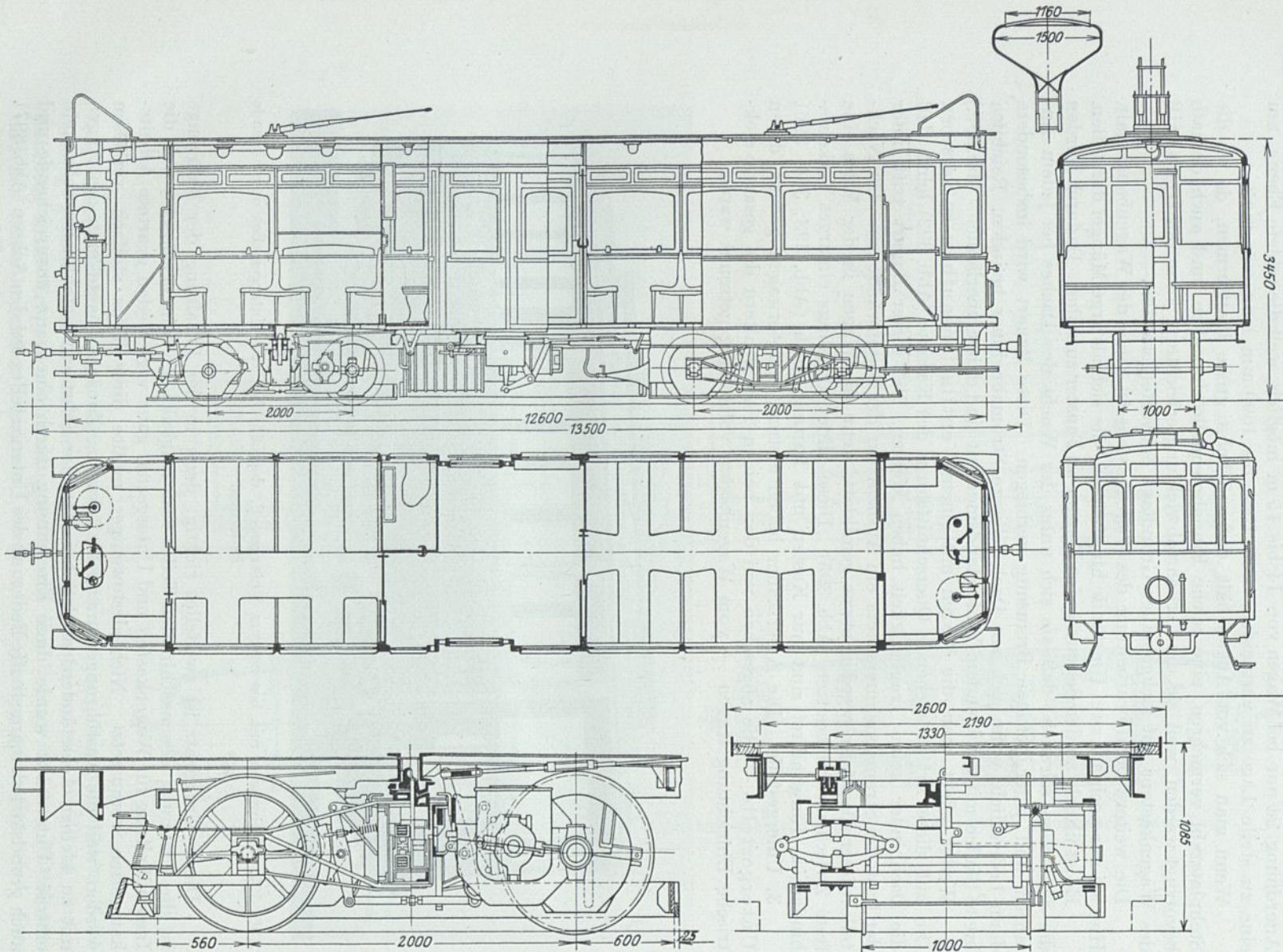


Abb. 398. Triebwagen der Ueberlandbahn Trient—Malèe. Tonnendach, Quersitze, Drehgestelle mit quergefedelter Wiege. (A.E.G.U.)

Von einer guten Federung muß verlangt werden, daß sie ein ausreichendes Arbeitsvermögen besitzt, daß die Federung weich ist und daß sie in ihrer Wirkungsweise auch gedämpft ist.

Diesen Bedingungen entsprechen nur die Blattfedern, niemals Schraubenfedern, wie sie oberhalb der Achskisten zur Abfederung der Untergestelle gebräuchlich sind.

Dank dieses Mangels ruht das Untergestell praktisch ungefedert auf den Achsen, es ist daher begreiflich, daß man diese Bauart vielfach verlassen hat.

Die Entwicklung schlug zwei Richtungen ein; einerseits verkürzte man die Achsstände noch weiter und setzte zwei Drehgestelle (Abb. 399) unter den Kasten, andererseits überging man auf die Lenkachsenbauart (Abb. 395) der Vollbahnwagen, die große Radstände zuläßt.

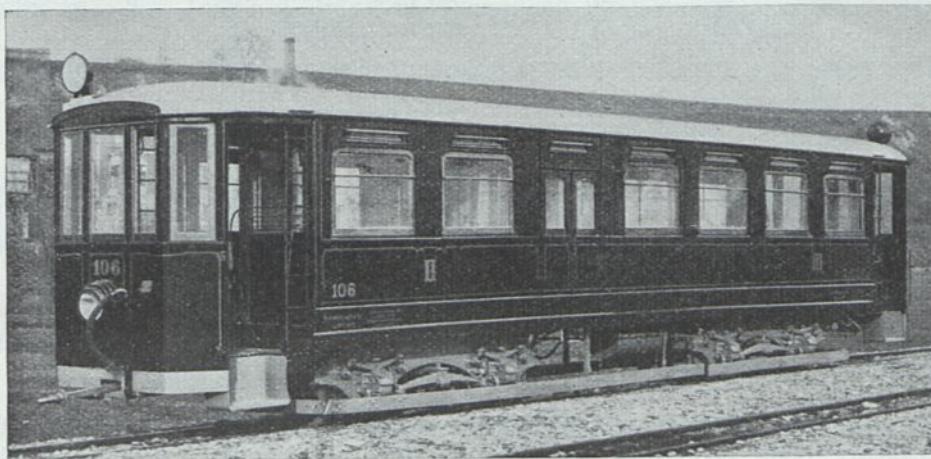


Abb. 399. Vierachsiger Triebwagen für die Ueberlandbahn M. Ostrau—Karwin. Doppelte Federung, tragfähige Fenstersäulen, Tonnendach. (O.S.S.W.)

Die Drehgestellwagen ermöglichen scharfe Kurven zu befahren, sie laufen nur dann ruhig, wenn die Wagenlänge genügend groß ist. Unter 10 m Wagenlänge sind Drehgestellwagen nicht gebräuchlich. Im übrigen wurde insbesondere in Amerika die oben beschriebene Art der doppelten Federung mit Spiral- und Blattfedern beibehalten. Neuzeitliche europäische Ausführungen verwenden ausschließlich Blattfedern (Abb. 399).

Da zwei Motoren in vielen Fällen ausreichen, daher für jedes Drehgestell nur ein Motor vorzusehen ist, sind vielfach unsymmetrische Drehgestelle mit einer Lauf- und einer Triebachse ausgeführt worden. Dieser Typ hat sich wegen ungünstiger Reibungsverhältnisse und ungenügender Bremswirkung nicht behaupten können.

Die Lenkachsenwagen erhielten Achsen mit achsialem und radialem Spielraum in den Achsgabeln. Auf diese Weise können die Radstände etwa verdoppelt werden, wodurch es möglich wurde, dem Verkehrsbedürfnisse entsprechende große Wagen bis 10 m Länge, die ruhig liefen, zu bauen, andererseits war das ganze Gewicht abgefедert bis auf Anteil des auf den Laufachsen lastenden Gewichtes der Motoren.

Das Verhältnis des Radstandes zur Wagenlänge kann mit 1:3 bis 1:4,8 im Mittel 1:4 bemessen werden, ohne den ruhigen Gang zu gefährden.

Die feste Verbindung von Laufwerk, Motoren und Wagenkasten kann aus den erwähnten Gründen nicht befriedigen.

Weiter ist die einfache Abfederung selbst unter Hinzufügung von Schraubenfedern in die Gehänge unzureichend.

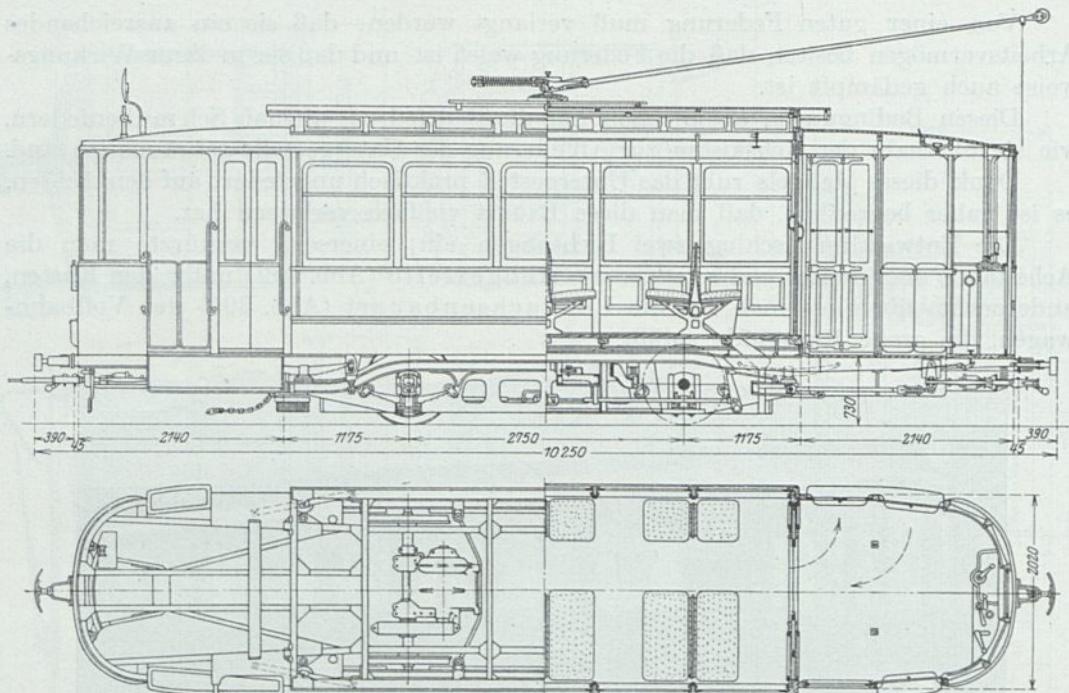


Abb. 400. Triebwagen der Straßenbahn Düsseldorf mit besonderem doppelt mit Blattfedern gefedertem Untergestell.

Man baut neuerdings in sachlich begründeter Weise Wagen mit getrenntem Untergestell, doch setzt man dieses unter Zwischenschaltung reichlicher Blattfedern auf die Achsen. Zwischen Wagenkasten und Untergestell befindet sich die zweite Federung (Abb. 400).

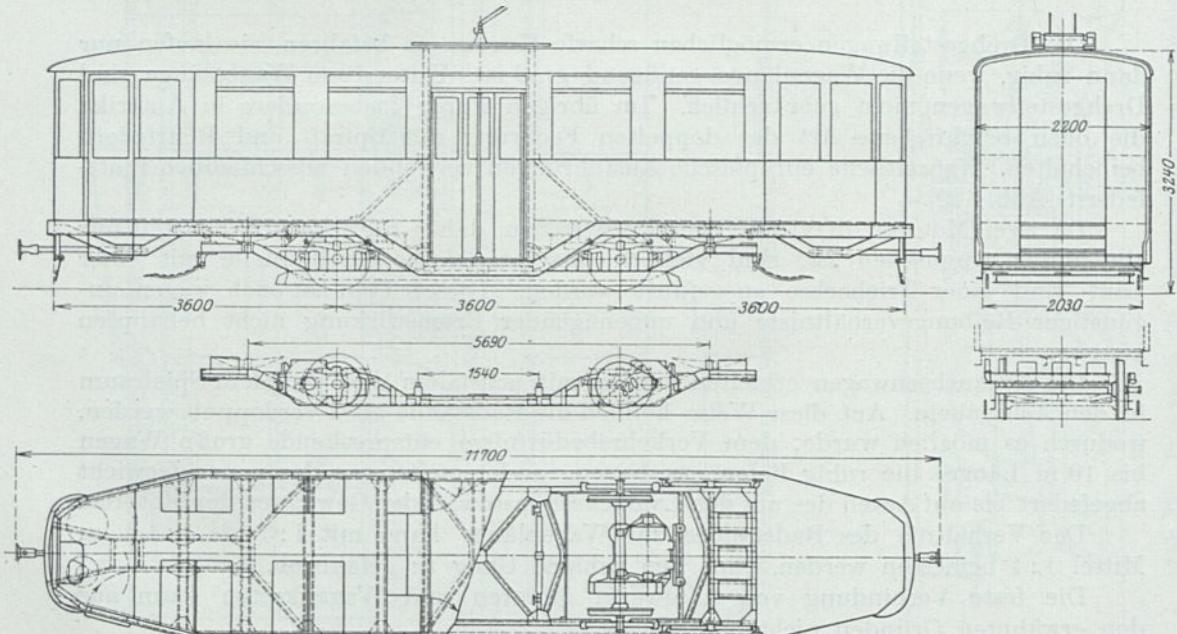


Abb. 401. Entwurf eines zweiachsigen Triebwagens mit getrenntem Untergestell, Mitteleinstieg, Tonnendach, zweckmäßige Fensterteilung. (Entwurf des Verf.)

4. Wagen mit Mitteleinstieg. Diese Bauart (Abb. 401) ermöglicht, selbst bei der zweiachsigen Type einen versenkten Mitteleinstieg anzubringen, jedoch müssen dann die Motoren außerhalb der Achsen angeordnet werden.

Die Wagen schlingen und nicken um so weniger, je kleiner das Trägheitsmoment um die senkrechte und wagerechte Schwerachse ist, andererseits werden die von außen einwirkenden Störungskräfte um so wirksamer abgewiesen, je größer der Radstand ist. Man legt daher, wenn irgend tunlich, die Motoren als schwere Stücke innerhalb der Achsen, insbesondere bei Wagen mit kleinen Radständen. Da es sich bei Wagen mit Mitteleinstieg um schwere Typen mit großen Radständen handelt, ist der Verlegung der Motoren nach außen unbedenklich.

5. Gewichtangaben. Das Gewicht der Wagen ohne elektrische Ausrüstung schwankt zwischen 1100 bis 600 kg/m Wagenlänge und beträgt im Mittel 850 kg/m; dabei gelten die größeren Werte für Wagen mit größeren Radständen.

Die Mittelwerte für die verschiedenen Bauarten sind: Lenkachsenwagen 850 kg/m, getrenntes Untergestell 910 kg, Vierachser und einachsige Drehgestelle 980 kg.

Das Gewicht der Untergestelle schwankt zwischen 1500 und 4000 kg, meistens 2000 bis 3000 kg.

Das Gewicht der zweimotorigen elektrischen Ausrüstung beträgt für

Ausrüstungen mit 2 25 PS-Motoren ohne elektrische Bremse	2200 kg
" " 2 35 PS- " " " " 2650 kg	
" " 2 50 PS- " " " " 3200 kg.	

Die elektrische Bremse vermehrt wegen der erforderlichen Widerstände das Gewicht um etwa 200 bis 300 kg, sofern die Leistung der Motortypen noch ausreicht.

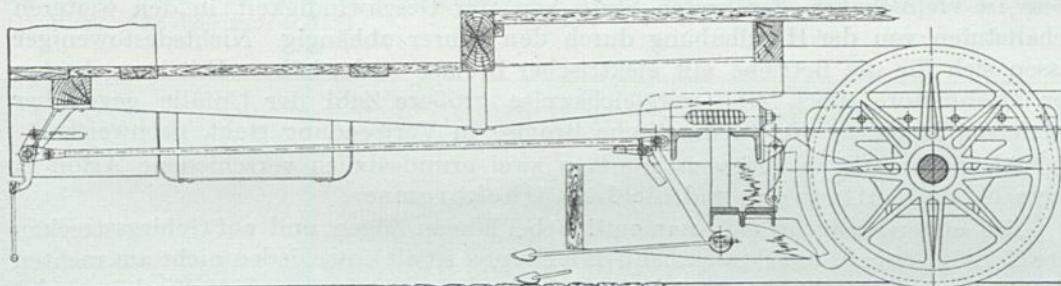


Abb. 402. selbsttätige Schutzvorrichtung mit Tastgitter und Fangkorb.

6. Schutzvorrichtungen. Der rege Verkehr öffentlicher Straßen bringt es mit sich, daß zufallsweise Personen vom Triebwagen niedergestoßen werden. Eine rasch und zuverlässig wirkende Bremse im Zusammenhang mit einer guten Sandstreuvorrichtung sind zunächst die Voraussetzung, um derartige Gefahren zu mildern. Weiter sind Vorkehrungen nötig, um zu verhindern, daß niedergestoßene Personen unter die Räder oder die Triebmotoren gelangen. Die Lösung dieser Aufgabe war Jahre hindurch die Beute geldhungriger Erfinder. Nach vielen mehr oder weniger abenteuerlichen und dilettantenhaften Lösungen hat sich fast überall ein System durchgesetzt, das grundsätzlich darauf fußt, daß ein möglichst weit vorne, etwa in der Ebene der Wagenspritzwand angeordnetes Tastgitter das Tragwerk eines Fangkorbes auslöst, so daß dieser auf die Schienen niederfällt und in dieser Lage die gestürzte Personen aufnimmt. Der Fangkorb ist möglichst nahe zu den Rädern anzuhören (Abb. 402).

Diese Anordnung gewinnt dadurch Berechtigung, als man ein mit etwa 20 km in Fahrt befindliches Fahrzeuge im äußersten Notfall über eine Weglänge von 12

bis 15 m zu halten vermag. Die Weglänge bis zu 2 m zwischen Tastgitter und Fangkorb kann unter Umständen von größter Wichtigkeit sein, stellt sie doch etwa $\frac{1}{6}$ des Bremsweges dar.

Zum Schutz niedergestoßener Personen ist es wichtig, die Perronstiegen genügend hoch zu setzen (mindestens 33 cm) und scharfe Kanten zu vermeiden. Mitteleinstiege haben auch von diesem Standpunkt ihre Vorteile.

Schutzvorrichtungen, die den Fangkorb vor das Fahrzeug gesetzt haben, sind minderwertig.

7. Die Bremse. Die Frage, welches Bremssystem sich für Straßenbahn-Triebwagen am besten eignet, hat von berufener Seite, namentlich innerhalb der Vereinigungen der Straßenbahnbetriebe wiederholt einläßliche Erörterungen erfahren, ohne daß es zu einer abschließenden Feststellung gekommen wäre.

Die Handbremse kommt wegen der starken körperlichen Beanspruchung des Fahrers als Betriebsbremse nicht in Betracht.

Dies vorausgesetzt, stehen sich nur die elektrische Kurzschlußbremse und die pneumatische Bremse gegenüber.

Die besonderen Eigenheiten der erstenen sind im IV. Teil, IV. Kap. eingehend behandelt worden, hier wäre nur noch auszuführen, daß es vom Betriebszustand außerordentlich verlockend ist, über eine Bremse zu verfügen, die unabhängig von der Backenbremse ist, demnach wirklich ein zweites von der erstenen unabhängiges Bremssystem darstellt, andererseits sind zu diesem Zweck keine besonderen Einrichtungen vorzusehen, bzw. anzuschaffen. Allerdings liefert die elektrische Bremse keine unter allen Umständen gleich große, dem verfügbaren Reibungsgewicht entsprechende Bremskraft, diese ist vielmehr in der ersten Stufe von der Geschwindigkeit, in den weiteren Schaltstufen von der Handhabung durch den Fahrer abhängig. Nichtsdestoweniger lassen sich für die Betriebe mit elektrischer Bremse weder höhere Erhaltungskosten der Triebmotore, noch eine vergleichsweise größere Zahl der Unfälle gegenüber Betrieben, in denen die pneumatische Bremse in Verwendung steht, nachweisen.

Als pneumatische Bremsen kommen zwei grundsätzlich verschiedene Arten in Betracht, die Luftsauge- und die Luftdruckbremse.

Die erstere mag an sich namentlich bei langen Zügen und auf Gebirgsstrecken ihre Vorteile haben, am Straßenbahn-Triebwagen ist sie entschieden nicht am rechten Platz. Diese Tatsache ist zu erkennen, wenn man bedenkt, daß das Lösen der Bremse durch die maschinelle Leistung der Pumpe herbeigeführt wird. Je kürzer die Haltezeiten und je öfter sie sich wiederholen, desto größer muß der Pumpenmotor sein, und doch hat sich gezeigt, daß die Fahrmotore in derartigen Betrieben arge Beschädigungen durch Überlastungen erleiden, weil die Fahrer den Fahrstrom oft früher schalten als die Bremse lösen. Wegen der vergleichsweise großen Motorleistung, die zur Aufrechterhaltung des Vakuums benötigt wird, arbeitet diese Bremse mit vergleichsweise hohem Stromverbrauch.

Die Mitteldruckbremse, die mit 3 bis 5 At. Druck arbeitet, ist frei von diesen Mängeln. Der Kompressor braucht nur dann zu arbeiten, wenn der Betriebsdruck unter einen gewissen Wert gesunken ist, dabei kann der Kompressor unmittelbar von einer Treib- oder Laufachse des Fahrzeuges angetrieben werden, in welchem Fall ein Teil der sonst abgebremsten lebendigen Kraft des Fahrzeuges zur Erzeugung der Druckluft verwertet wird. Die Druckluftbremse arbeitet demnach sehr sparsam. Ihre Bremswirkung läßt sich sehr gut regeln, jedenfalls der Höchstwert begrenzen, andererseits kann ihre Wirkung unter allen Umständen gesichert werden, weil mit ihrer Betätigung zugleich auch der Sandstreuer bedient werden kann. Allerdings wird die Unveränderlichkeit der Bremskraft in ihren Wirkungen insofern

beeinträchtigt, als die Reibungskraft zwischen Bremsklotz und Radreifen tatsächlichen Schwankungen durch Witterung, Zustand der Straßendecke und dergl. unterliegt.

Das Einfrieren der Leitungen, die kostspielige Instandhaltung der Gummischläuche und der Dichtungen ist auch eine unerwünschte Beigabe.

Fest steht, daß in Amerika die Druckluftbremse fast ausschließlich in Gebrauch ist; die Ursache dürfte im großen Gewicht der dort gebräuchlichen Triebwagen zu suchen sein.

XI. Triebwagen für Stadt-(Untergrund-)Bahnen.

Literatur:

- Dietl. Die neuen A.E.G.-Wagen. Bahn Blankenese-Ohlsdorf. E.K.B. 1909. H. 31.
 Dietl. Probewagen für die Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf. E.K.B. 1905. H. 31.
 Gerlach. Die städtische Untergrundbahn in Berlin-Schöneberg. Verl. W. Ernst & S. Berlin, 1911.
 Gerlach. Die städtische elektrische Untergrund-Nordsüdbahn zu Berlin. E.T.Z. 1914. H. 24.
 Mattersdorf. Bau- und Betriebsanlagen der Hamburger Hochbahn. E.T.Z. 1912. H. 23.
 Meyer. Die elektrische Zugförderung auf der Vorortbahn Berlin-Groß-Lichterfelde. Z.V.D.I. 1903.
 Platzmann. Die städtische Untergrundbahn in Berlin-Schöneberg. E.T.Z. 1913. H. 10.
 Rudolph. Der Probewagen für die A.E.G.-Schnellbahn. E.K.B. 1917. H. 3. G.A. 1917. Nr. 950.
 Wechmann. Gewichte von Stadtbahnzügen. G.A. 1908. Nr. 743.
 Zehme. Die elektrischen Stadtschnellbahnen in den V. S. von N.-A. G.A. 1911. Nr. 824.
 Elektrische Zugförderung auf Pariser Vorortbahnen. E.K.B. 1912. H. 31. L.E. Sept. 1912.
 Berliner Stadt- und Ringbahn-Triebwagenzüge. E.T.Z. 1920. H. 50.
 Die neuen Wagen der elektrischen Stadtschnellbahnen in New York. E.T.Z. 1916. H. 15; E.R.J. Bd. 43. S. 1261.
 Verbesserungen an den Hoch- und Untergrundbahnwagen der Stadt New York. E.T.Z. 1921. H. 35.
 Die neuen Wagen der Londoner Untergrundbahn. E.R.J. 1920. Bd. 54, S. 4. Ref. E.T.Z. 1920. H. 52. The Locomotive 1921.

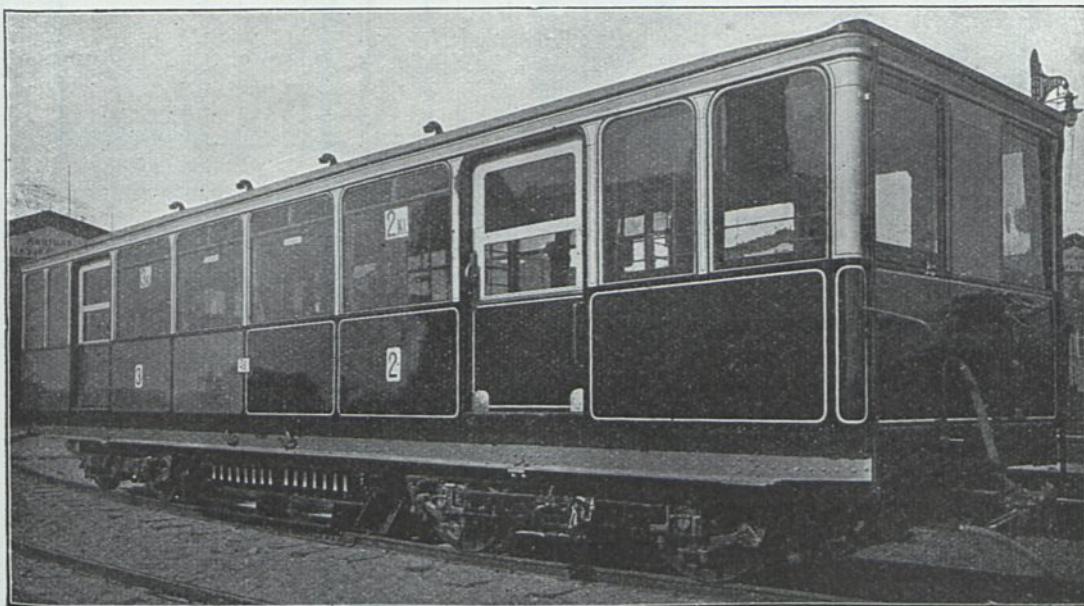


Abb. 403. Ansicht des Triebwagens der Hamburger Stadtbahn.

1. Grundlagen für den Entwurf. Die Bauformen von Eisenbahnfahrzeugen sind im allgemeinen den besonderen Transportaufgaben entsprechend gestaltet, doch

gehen die auf diese Aufgaben zurückzuführenden Einschränkungen in keinem Fall so weit wie bei städtischen Schnellbahnen.

Städtische Schnellbahnen, kurz Stadtbahnen, sind eine volkswirtschaftliche Notwendigkeit, wenn es sich um die täglich wiederholte Beförderung einer großen Personenzahl über Entfernungen von durchschnittlich mehr als 4 bis 6 km handelt. Durch die hierfür erforderliche Reisezeit wird die Benützung der Straßenbahn mit etwa nur 12 km/h Reisegeschwindigkeit zu zeitraubend, andererseits auch für das Straßenbahnunternehmen verlustbringend, weil die Tarife aus Zweckmäßigkeitsgründen nicht dem Reiseweg entsprechend abgestuft werden, daher zahlt der öfter wechselnde Fahrgast relativ mehr.

Stadtbahnen müssen eine nennenswert höhere Fahrgeschwindigkeit, im allgemeinen etwa 50 km/h aufweisen, um den gewünschten Gewinn in der Reisegeschwindigkeit von 20 bis 30 km/h zu erzielen.

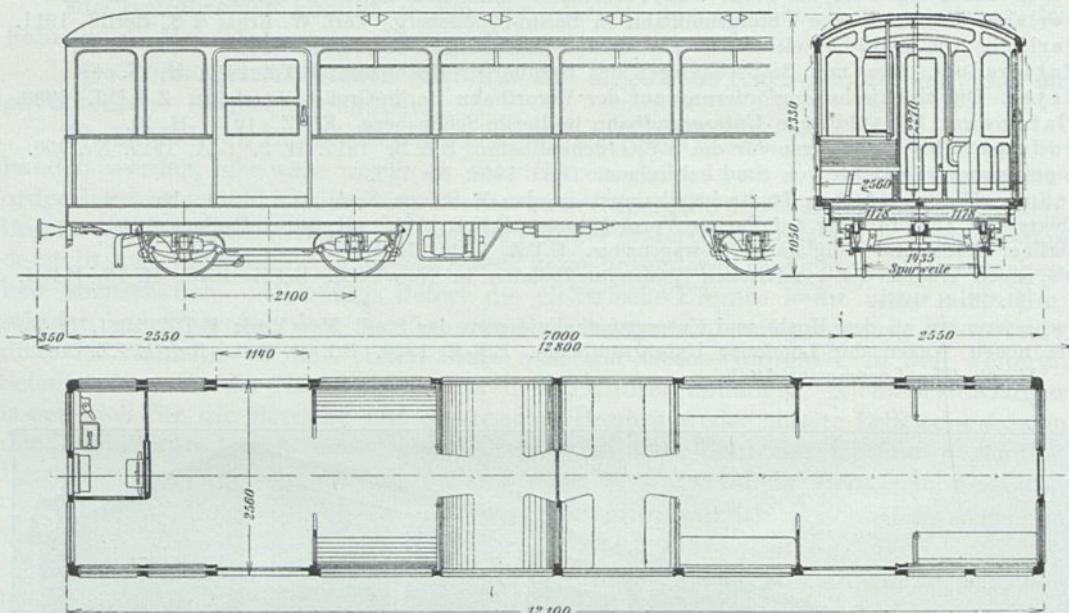


Abb. 404. Triebwagen der Hamburger Stadtbahn.

Diese hohe Fahrgeschwindigkeit lässt sich mit dem übrigen Straßenverkehr nicht in Einklang bringen, Stadtbahnen müssen daher mit eigenem Bahnkörper ober- oder unterirdisch gebaut werden.

Die baulichen Anlagen sind sehr kostspielig, weil sie im Stadtinnern errichtet werden müssen, durchweg Kunstbauten sind und wegen Aufrechterhaltung des sonstigen Verkehrs auf beträchtliche Erschwernisse in der Ausführung zu rechnen ist. Diese letzteren sind insbesondere deshalb von großer Tragweite, weil Stadtbahnen zur Erreichung der für den Ertrag nötigen Frequenz den Hauptverkehrsadern der Städte folgen sollen.

Die hohen Baukosten lassen im allgemeinen nur einen bescheideneren Ertrag erzielen; ein weiterer Umstand, um alles daran zu setzen, die Baukosten zu verringern.

Die Kubatur des Bahnkörpers bzw. der Querschnitt des Bahnkörpers ist ausschlaggebend für die Baukosten. Der Querschnitt wird bestimmt durch das Umgrenzungsprofil der Wagen. Hieraus folgt, welche Bedeutung der richtigen Formgebung der Fahrzeuge zukommt. Die Triebfahrzeuge müssen namhafte Le-

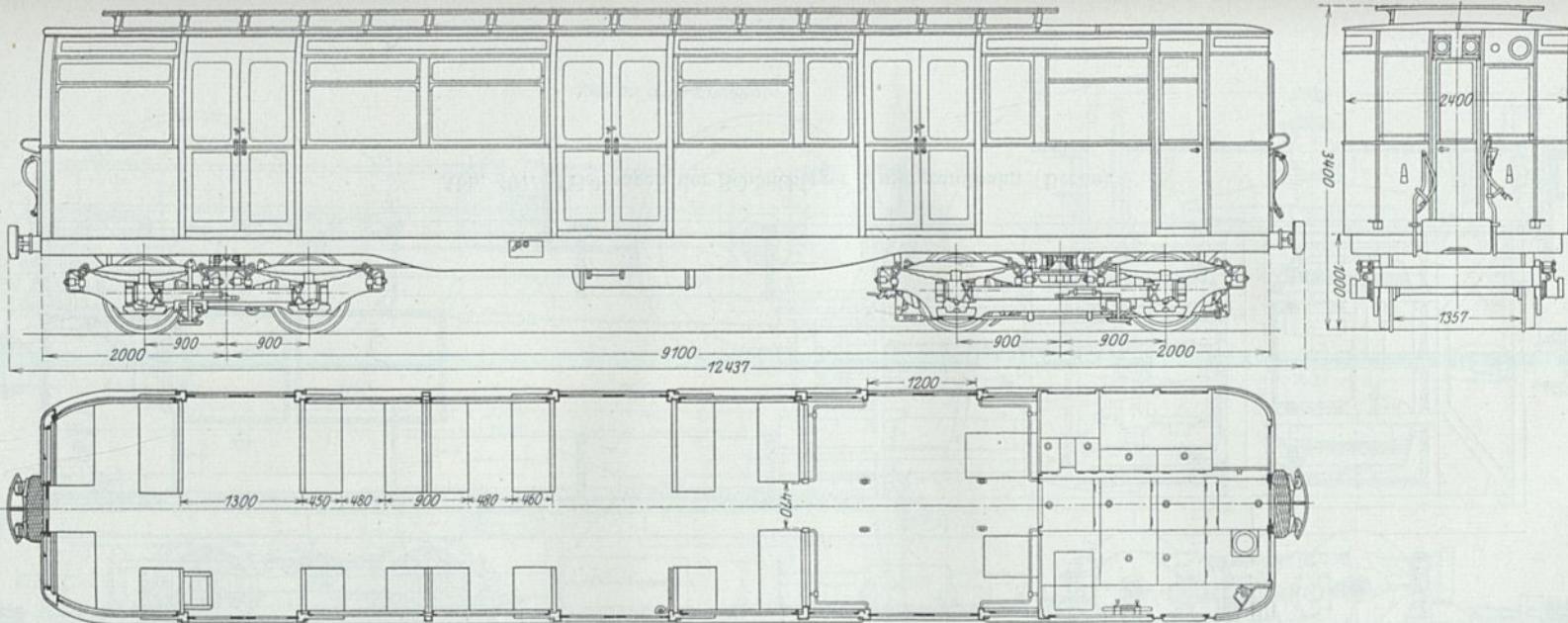


Abb. 405. Triebwagen der Pariser Metropolitain Bahn.

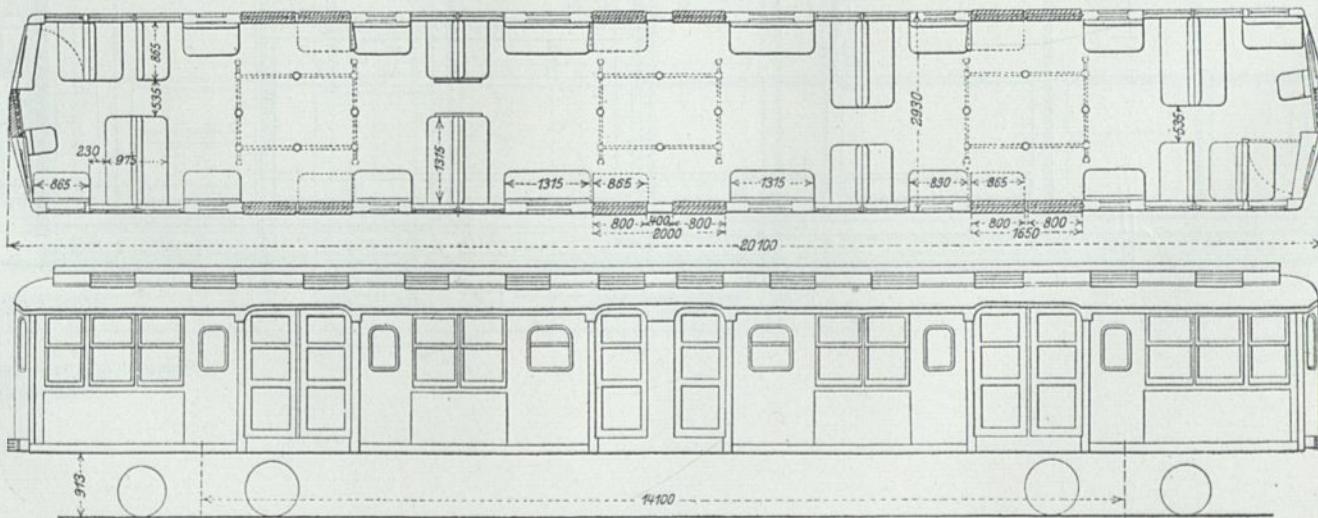


Abb. 406. Triebwagen, Reihe 1916 der elektrischen Stadt-Schnellbahnen in New York. Anordnung der Türen und Sitze.

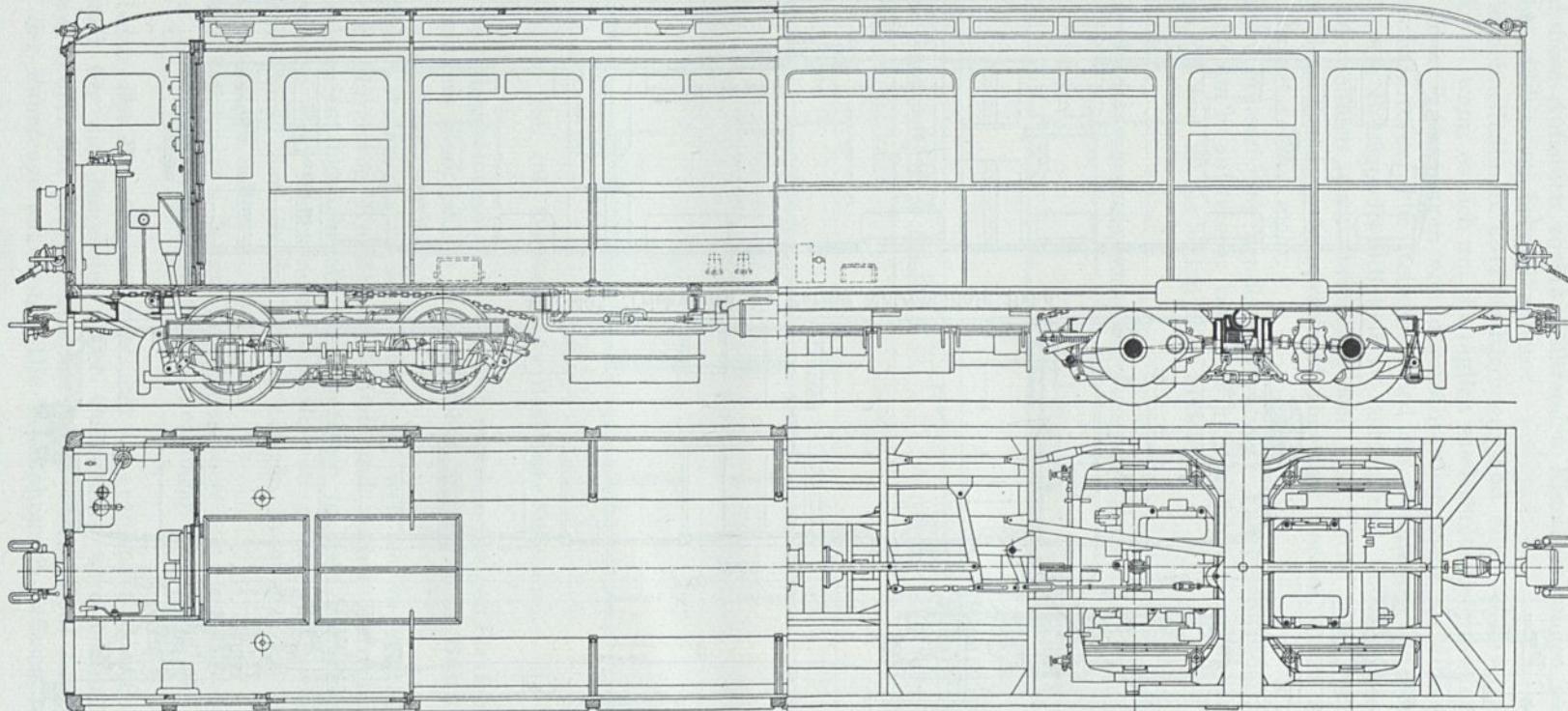


Abb. 407. Triebwagen der Schöneberger Untergrundbahn (Berlin).

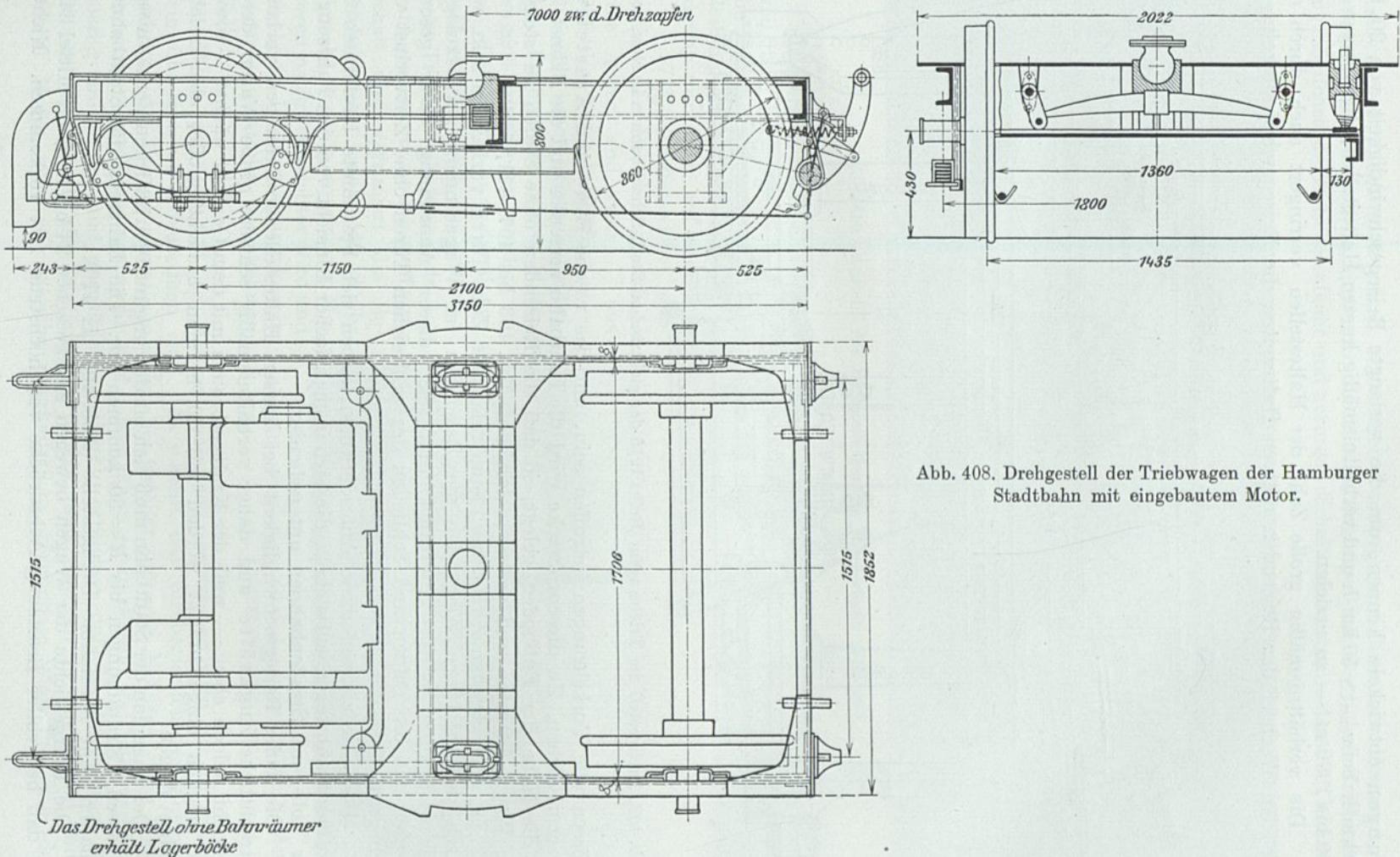


Abb. 408. Drehgestell der Triebwagen der Hamburger Stadtbahn mit eingebautem Motor.

stungen entwickeln können, um die verlangte Reisegeschwindigkeit von 20 bis 30 km/h bei $v_{max} \approx 50$ km/h und verhältnismäßig kurzen Haltestellenentfernungen — 500 bis 1000 m — zu erzielen.

Die verhältnismäßig große Zahl der Haltestellen verringert auch durch die für den Wechsel der Reisenden nötigen Haltezeiten die Reisegeschwindigkeit. Es

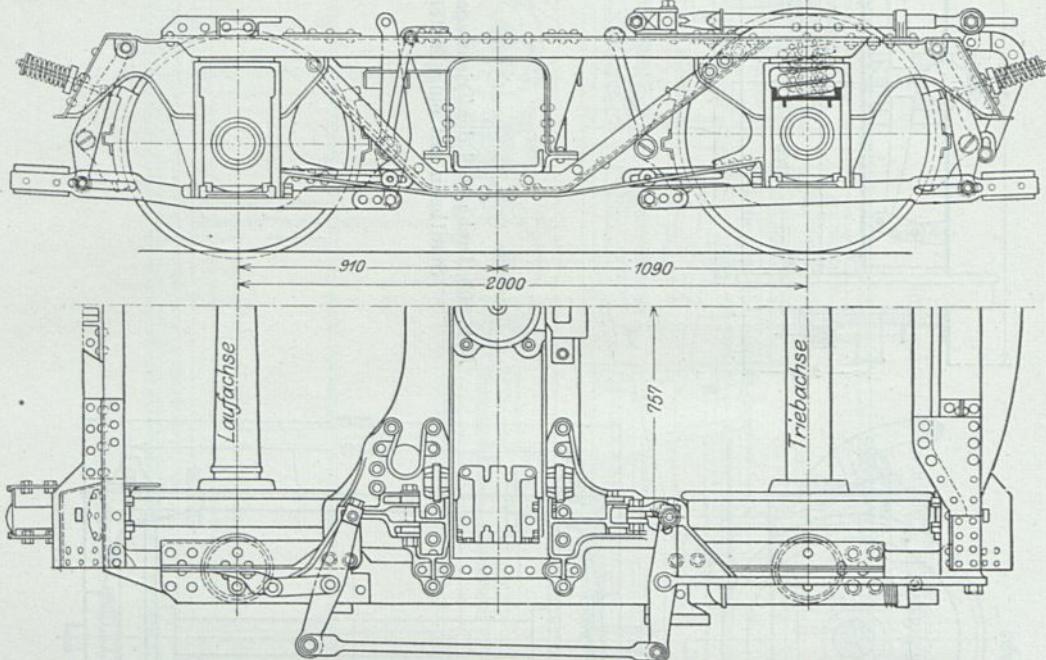


Abb. 409. Drehgestell der Triebwagen, Reihe 1916 der elektrischen Stadt-Schnellbahnen in New York.

müssen alle Vorkehrungen getroffen sein, um das rasche Ein- und Aussteigen zu ermöglichen. Zu diesem Zwecke wird die Fahrbahn versenkt und die Bahnsteige in die Höhe der Fußboden gelegt, so daß die Reisenden ohne Stufen zu steigen die Wagen betreten und verlassen können (Abb. 403 bis 407, 411, 412).

Zu dem gleichen Zweck muß eine reichliche Zahl Türen vorhanden sein, wodurch der mittlere Weg, den die Reisenden im Wageninnern zurückzulegen haben, gekürzt wird. Allerdings muß bei dieser Anordnung dafür gesorgt werden, daß das Öffnen und Schließen der zahlreichen Türen ohne Zeitverlust vor sich geht.

Mit Rücksicht auf diese Anforderungen haben sich bestimmte Bauformen für die Stadtbahnwagen entwickelt, die sich in mehrfacher Hinsicht von den Fahrzeugen für Voll- und Straßenbahnen unterscheiden.

Die hohe Reisegeschwindigkeit bei kurzen Haltestellenentfernungen verlangt beträchtliche Zugkräfte und daher verhältnismäßig schwere große Wagen, deren Gewicht jedoch eben — weil der Kraftverbrauch mit dem Gewicht wächst — soweit als möglich eingeschränkt werden soll. D. h. man braucht große, aber relativ leichte Wagen.

Der Lageplan der Stadtbahn muß sich oft den ungünstigen örtlichen Verhältnissen anpassen. Krümmungen bis $R=50$ kommen vor. Die Fahrzeuge für Stadtbahnen erhalten ohne Ausnahme Drehgestelle (Abb. 408 bis 410).

Die Leergewichte der Wagen bewegen sich zwischen 24 bis 48 t, im Mittel 34 t, so daß bei voller Besetzung Achsdrücke von höchstens 12 t vorkommen. Nichts-

destoweniger pflegt man einen schwereren Oberbau zu wählen, als diesem Achsdruck entsprechen würde, um trotz der dichten Zugfolge und der hohen Triebkräfte mit möglichst langer Lebensdauer und geringen Erhaltungskosten rechnen zu können.

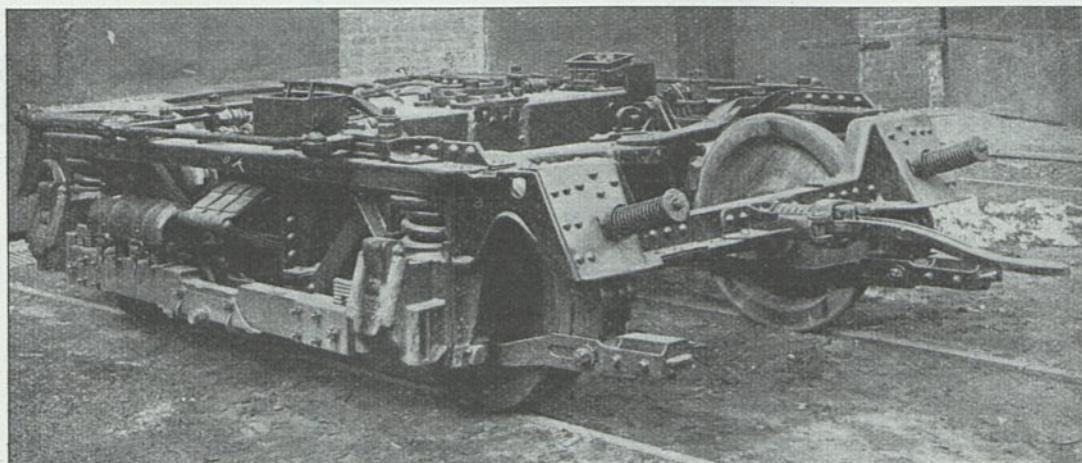


Abb. 410. Ansicht des Drehgestelles der Triebwagen Abb. 406.

Die ersten Stadtbahnen hatten Züge mit 100% Triebgewicht. Dies ist unnötig, weil noch bei etwa 57% Reibungsgewicht selbst in einer Steigung von etwa 40% die übliche Höchstbeschleunigung von $0,7 \text{ m/sec}^2$ erzielbar ist. Mit rund 39% Reibungsgewicht, welches bei Anhängewagenbetrieb vorkommt, ist diese Beschleunigung nur mehr auf ebener Strecke zu erzielen.

57% Triebgewicht entspricht der Anordnung, daß je eine Achse, und zwar — aus Gründen guter Lauffähigkeit — die nach innen liegende der beiden Drehgestelle eines Motorwagens angetrieben werden.

Die Verringerung der Motorzahl auf die durch das erforderliche Triebgewicht begrenzte Anzahl verbessert die Baustoffwirtschaft und verringert die Betriebskosten, indem die halbe Anzahl doppelt so starker Motoren natürlich leichter wird und weniger Instandhaltungskosten verursacht, als im umgekehrten Falle.

Wenn nur ein Teil der Achsen motorisch angetrieben wird, ist zu erwägen, wie die Motoren anzurufen sind. Es scheint, daß diesbezüglich derjenigen Anordnung der Vorzug einzuräumen ist, bei welcher die zwei Motoren eines Wagens in einem Gestell untergebracht sind. Man kann es in diesem Fall mit verhältnismäßig einfacheren und unschädlichen Mitteln erreichen, daß die Triebachsen mehr belastet werden als die Laufachsen. Rüstet man dagegen je ein Gestell mit je einem Motor aus, ist dasselbe überhaupt in geringerem Maß und nur durch

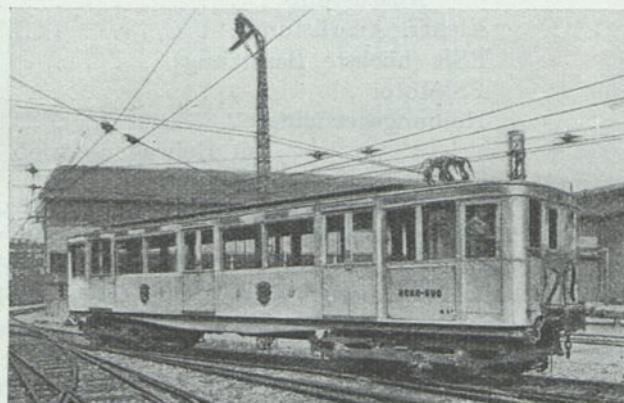


Abb. 411. Triebwagen (vierachsrig) der Pariser Nord-Süd-Untergrundbahn.

unsymmetrische Anordnung des Drehzapfens innerhalb der Achsen zu erreichen. Diese Anordnung hat dagegen den Vorteil für sich, daß die nicht angetriebene weniger belastete Achse das Drehgestell führt.

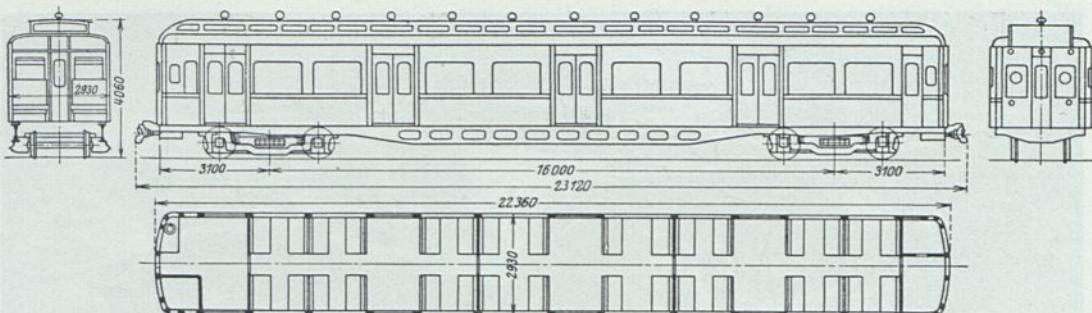


Abb. 412. Triebwagen der Franz. Staatsbahn für den Pariser Vororte-Verkehr. (Die Wagen sind mit zwei dreiachsigen, statt zweiachsigen Drehgestellen ausgeführt.)

Zur ersten Auswertung der Motorwagen bedient man sich am besten der Erfahrungszahlen, die aus der untenstehenden Übersicht zu entnehmen sind:

Wagenlänge	12,0 bis 22,0 m
Breite	2,6 bis 2,8 m
Höhe	3,6 bis 3,2 m
Maximale Besetzung je qm	3,6 bis 5,0 Personen
Bodenfläche für einen Sitzplatz	0,35 qm
„ für einen Stehplatz	0,15 qm
Gewicht leer für d. m. Länge einschl. elektr. Ausrüstung	180 bis 240 kg
Elektr. Ausrüstung	6,5 bis 10,0 t
PS/t (höchste Besetzung)	5,0 bis 9,0 PS/h
PS/Motor	100 bis 235 PS/h
Reibungsgewicht	50 bis 58 %
„ im Beiwagenbetrieb . . .	39 %

Auf Grund dieser Erfahrungszahlen kann das Gewicht und die Ausmaße der in Aussicht genommenen Fahrzeuge bestimmt werden. Hierauf sind die Fahrlinien auszuarbeiten, um die Gegenprobe darauf zu machen, ob der gewählte Motor tatsächlich ausreicht oder übermäßig stark wäre.

Bei der Wahl des Motors ist zu beachten, daß niedrige Wagenhöhe anzustreben ist. Tatsächlich sind alle Stadtbahnwagen mit Motoren ausgerüstet, die die Anwendung von Radsätzen mit 850 bis äußerst 920 mm gestatten.

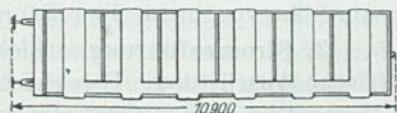
2. Grundriß der Wagen. Besondere Sorgfalt verlangt der Entwurf des Grundrisses des Wagens. Wie wenig in diesem Belange Einmütigkeit besteht, zeigen die ungemein mannigfaltigen Grundrisse (Abb. 413, 414).

Es gibt nicht zwei Bahnen mit den gleichen Anordnungen.

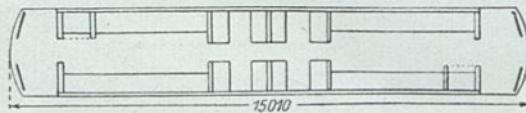
Von größter Wichtigkeit für die Erreichung einer hohen Verkehrsleistung ist — wie bereits angedeutet — die leichte Entleerungsmöglichkeit der Wagen. Maßgebend hierfür ist der Weg, den ein Reisender im Mittel bis zur Erreichung der Tür zurückzulegen hat und die Anzahl der Reisenden, die durch eine Tür den Wagen verlassen müssen.

Ältere Wagen weisen Weglängen von 3,7 bis 2,3 m auf; bei neueren Wagen ist man bis auf 1,8 bis 1,0 m herabgegangen.

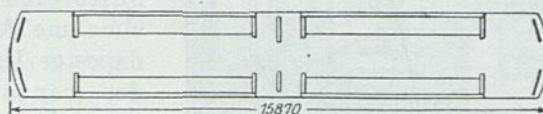
Bei den Wagen der Interb. Rap. Trans. N. Y. müssen 83,5 Reisende durch eine Tür den Wagen verlassen; ebenso auf der Bostoner Hochbahn und den New Yorker Städtischen Bahnen sogar 87.



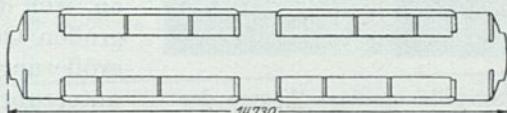
Berliner Stadt- und Ringbahn (3. Kl.).



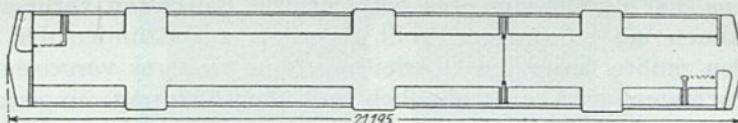
Brooklyner Schnellbahn.



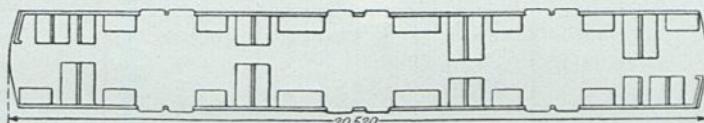
New Yorker Interborough Schnellbahnen.



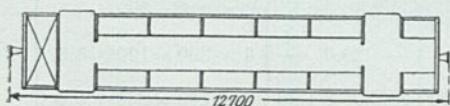
New Yorker Hudson und Manhattan Bahn.



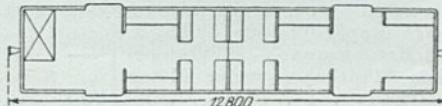
Bostoner Hochbahn (Cambridge Untergrundlinie).



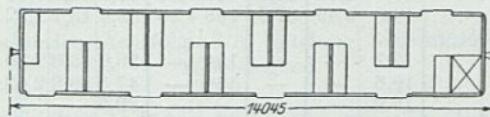
New Yorker Städt. Schnellbahnen.



Berliner Hoch- und Untergrundbahn.



Hamburger Hochbahn.



Berliner A.E.G.-Schnellbahn.

Abb. 413. Grundrisse, Sitz- und Türanordnungen von Stadtbahnwagen.

Die niedrigste Zahl weist die Berliner Stadtbahn mit 16 Personen je Tür auf; allerdings verliert man durch das umständliche Schließen der zahlreichen Türen Zeit.

Die A.E.G.-Schnellbahn in Berlin erzielt 36,25, die Nord-Südbahn 25,2 Fahrgäste je Tür, wobei ein maschinelles Schließen der Türen vorgesehen ist.

Die Höhe des Innenraumes wird auf das praktisch mögliche Mindestmaß beschränkt, um das Tunnelprofil nicht unnötig zu vergrößern. Die Wagen erhalten daher eine Gesamthöhe von nicht über 3,6 m.

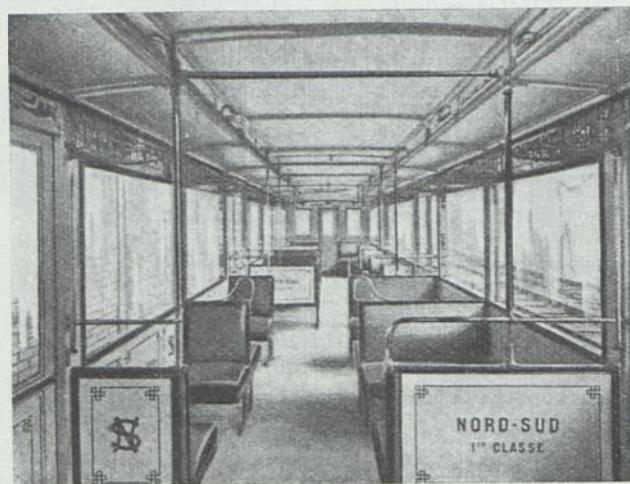


Abb. 414. Innenansicht, Sitzordnung eines Wagens der Pariser Nord-Süd-Untergrundbahn.

von mindestens 300 bis 500 mm, was beträchtliche Baukosten verursacht. Nur bei Untergrundbahnen mit eiförmigem Profil, das etwa aus Gründen der Tragfähigkeit gewählt werden mußte, kann die Oberleitung ohne weiteres vorgesehen werden.

Die Motorwagen sind ausschließlich mit Zugsteuerung eingerichtet, so daß die Garnituren auf dem Endbahnhofe nicht umgestellt werden müssen.

Angaben von Stadtbahnmotorwagen.

Anlage	Wagen-		Bodenfläche qm	Fassungs- raum Per- sonen max	Gewicht t leer	Leistung PS (insgesamt)	Treibgewicht in % des Zuggewichtes bei voller Besetzung)				
	länge m	breite m									
Interborough Rapid Transit, New York	16,0	2,60	41,6	169	4,07	35,2	46,0	2,20	2 × 200 = 400	8,7	57,3
Berlin Nord-Süd	13,6	2,50	33,9	126	3,72	31,2	40,3	2,18	2 × 150 = 300	7,5	57,0
Interborough Rapid Transit (5 Wagen- zug = 3 Motorwagen + 2 Beiwagen)	—	—	—	—	—	—	20,6	—	6 × 200 = 1200	5,8	38,3
New Yorker Stadtbahn (reiner Motor- wagenbetrieb)	20,4	2,76	53,5	270	5,00	38,6	55,8	1,89	2 × 140 = 280	5,0	49,9
Brooklyn Rapid Transit (5 Wagenzug = 3 Motorwagen + 2 Beiwagen)	15,0	2,62	39,2	154	4,00	32,5	44,3	2,16	2 × 200 = 400	9,1	57,9 bis 41,0
Boston-Cambridge	21,5	2,62	56,5	266	4,70	39,0	56,0	1,81	2 × 200 = 400	7,2	55,6
Hudson-Manhattan Rd.	14,8	2,49	37,0	158	4,30	33,6	43,7	2,27	2 × 160 = 320	7,4	54,9
Long-Island (5 Wagenzug = 3 Motor- wagen + 2 Beiwagen)	15,7	—	—	154	—	36,0	46,0	2,30	2 × 200 = 400	8,7	58,6 bis 42,2
Long-Island-Suburban	19,6	—	—	186	—	47,5	59,3	2,42	2 × 235 = 470	8,0	54,4
Buenos-Aires	16,0	—	—	—	—	30,0	—	—	2 × 115 = 230	—	—
Hamburger Stadtbahn	12,8	2,56	32,8	100	3,30	24,0	31,0	1,87	2 × 100 = 200	6,45	~ 57,0
Paris-Metropolitain	13,4	2,40	32,3	120	—	28,5	37,0	2,12	2 × 150 = 300	8,12	~ 67,0
Paris-Nord-Süd (2 Motorwagen + 3 Bei- wagen)	14,4	2,40	34,6	82	—	32,5	41,0	2,24	4 × 125 = 500	8,8	44,5
Berlin, Hoch- und Untergrundbahn .	12,7	2,36	29,2	100	2,00	18,0	26,0	1,42	4 × 75 = 300	—	—
Paris, Vorortlinien	23,1	2,93	68,0	104	—	—	80,0	—	4 × 160 = 640	8,0	—
New Yorker Stadtbahn (1916)	20,4	2,93	60,0	270	4,50	38,3	55,3	1,88	2 × 160 = 320	5,8	~ 57,0
Berlin-Schöneberg	12,8	2,36	30,2	54	1,82	20,0	24,0	1,56	2 × 80 = 160	6,7	~ 57,0
Metropolitan District Ry.-London (1920) (3 Motorwagen + Beiwagen)	14,9	2,75	41,0	200	4,80	44,7	57,7	3,00	4 × 198 = 792	6,5	47,7

Daß eine durchgehende Luftdruckbremse für die Betriebssicherheit unerlässlich ist, bedarf keines besonderen Nachweises.

Als besondere Eigentümlichkeit der Stadtbahnen ist die starke Erhitzung der Bremsklötze und Radreifen und hierdurch verursacht eine hohe Raumtemperatur, insbesondere in den tiefliegenden Tunnelstrecken zu erwähnen. Gegen diesen Übelstand war man insbesondere in Paris bestrebt durch Bremsung mit Stromrückgewinnung anzukämpfen. Wenn auch der Gedanke an sich gut ist, so scheiterte die allgemeine Einführung an der Umständlichkeit der Schaltung.

XII. Industrielokomotiven.

Literatur:

Bright. The modern electric mine locomotive. Proc. 1915.

Bülow und Doppelstein. Vergleichende Untersuchungen an Grubenlokomotiven. Glückauf 1912

Eaton. The development of the electric mine locomotive. Proc. 1914.

* * * Grubenlokomotiven. G.E.R. 1915. Nr. 4.

* * * High power electric locomotives for narrow gauge goods trains. El. 1919. S. 225.

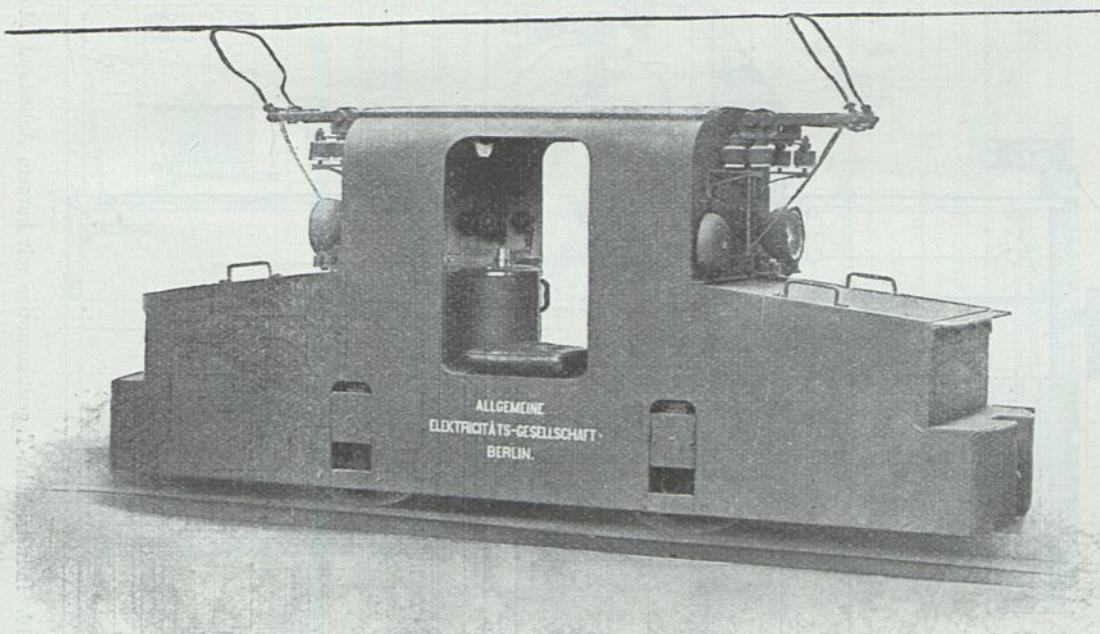


Abb. 415. Grubenlokomotive, Achsfolge 2 A, mittlerer, versenkter Führerstand, Motoren außenliegend.

1. Besondere Kennzeichen. Betrachtet man eine Dampflokomotive zeitgemäßer Bauart, so fällt das organische Gefüge der ganzen Maschine ins Auge. Der Zusammenhang von Tender, Führerstand, Feuerkiste, Kessel, Rauchkammer mit Schlot, dann Dampfmaschine, Getriebe und Laufwerk, verbunden in der natürlichen Reihenfolge durch ein widerstandsfähiges Gestell bei zweckmäßiger Festlegung der Schwerpunktslage ist unverkennbar.

Dieses Ziel ist auch für elektrische Lokomotiven anzustreben, wobei festgestellt werden kann, daß ausgeführte Lokomotiven für Industriebahnen diesem Grundsatz oft eher gerecht werden als große Vollbahnlokomotiven.

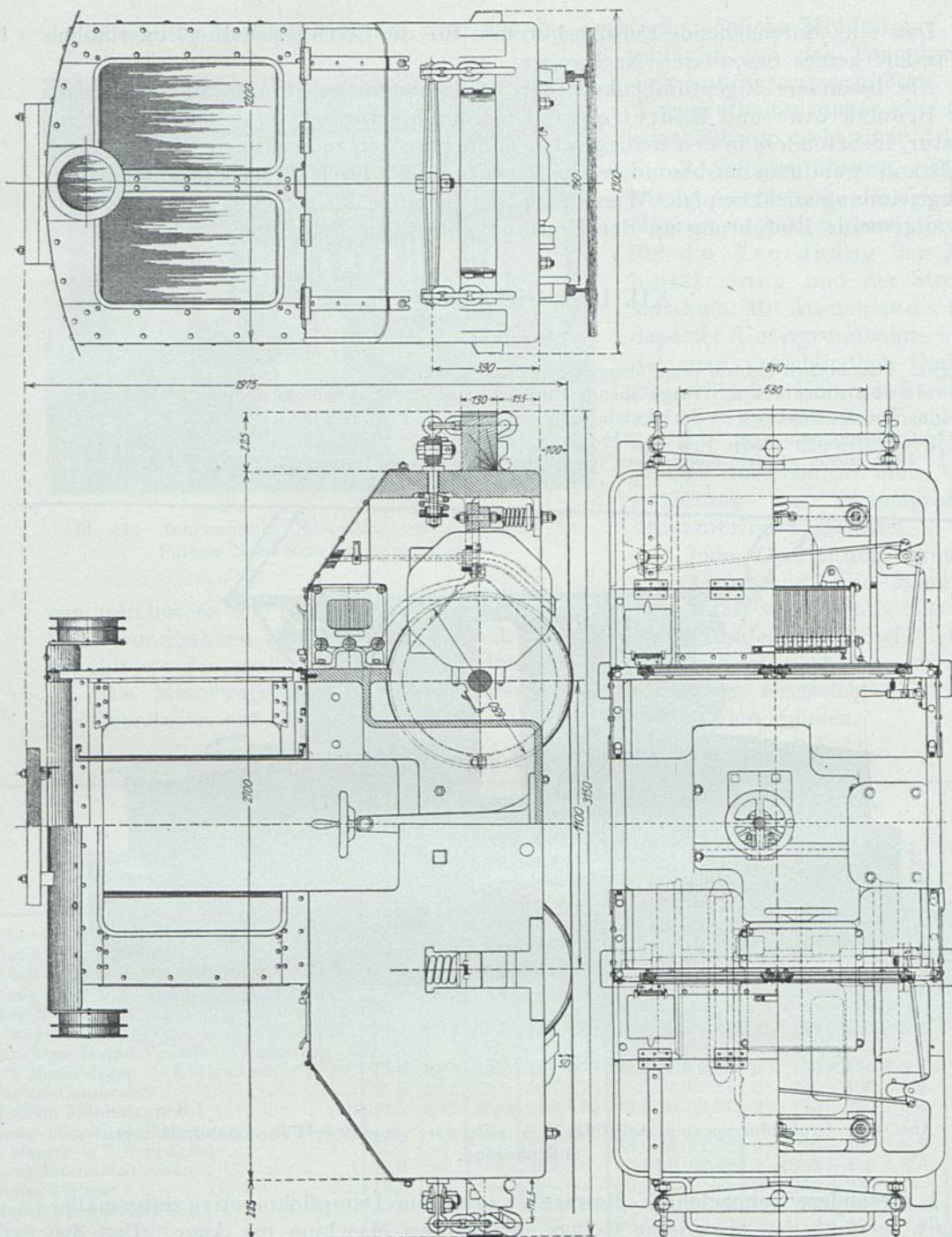


Abb. 416. Industriebahn-Tageslokomotive mit kurzem Achsstand, Motor außenliegend, Führerstand versenkt.

Für Industrielokomotiven sind als besondere Anforderungen kennzeichnend:
 schmale Spur bis herab 480 mm,
 scharfe Krümmungen . $R > 5$,
 kleine Leistungen . . . $5 \sim 100$ PS,
 kleine Achsdrücke . . . 1—4 t,
 Geschwindigkeiten . . . < 15 km/h.

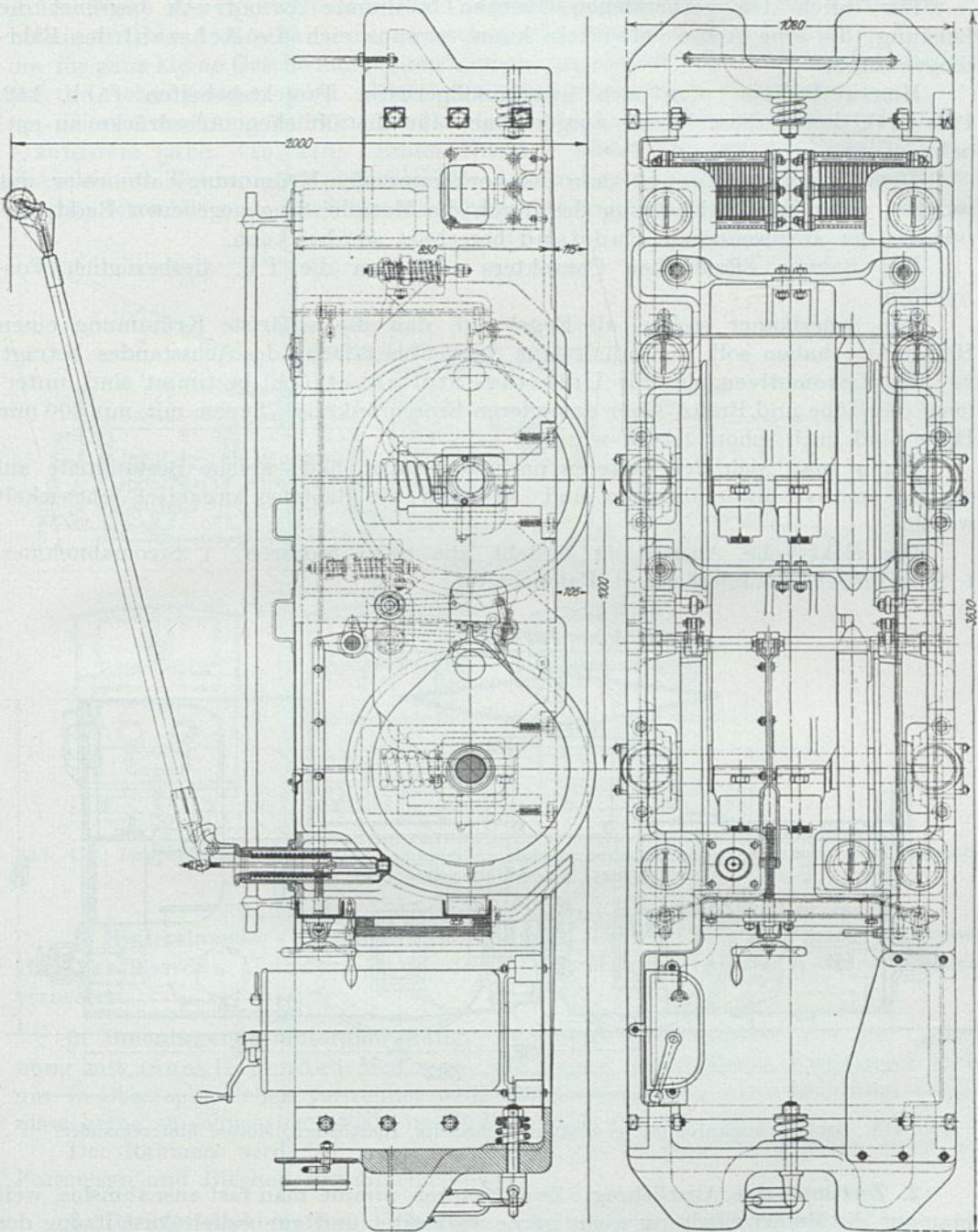


Abb. 417. Grubenlokomotive mit hintereinander angeordneten Motoren, offener Führersitz.

Bevor man zu dem Entwurf des Triebfahrzeuges schreitet, welches in der Mehrzahl der Fälle eine Lokomotive sein wird, da die Nutzlast zu schleppen ist und nicht auf das Fahrzeug aufgeladen wird, muß auf Grund der vorliegenden Angaben die Gesamtleistung bestimmt werden.

Da einfache und billige Fahrzeuge verlangt werden, kommt für die kleinen Leistungen nur Gleichstrom mit etwa 500 V Spannung und die unmittelbare Stromzufuhr in Betracht.

Der durch den vorhandenen Oberbau bestimmte Achsdruck begrenzt die Leistung, die eine Achse entwickeln kann, woraus sich die Achszahl des Fahrzeuges ergibt.

Hierzu bedient man sich zweckmäßigerweise Projektsbehelfen (Abb. 142, 143, 144), denen diese Werte ausgerechnet für die üblichen Achsdrücke zu entnehmen sind.

Dem Lageplan entnimmt man die vorkommenden Krümmungshalbmesser, aus welchen unter Berücksichtigung des durch die Motorleistung gegebenen Raddurchmessers der anzuwendende Radstand berechnet werden kann.

Für Bahnen öffentlichen Charakters enthalten die T.V. diesbezüglich Vorschriften.

Die Amerikaner stellen als Regel auf, daß die schärfste Krümmung einen Halbmesser haben soll, der mindestens das 5- bis 6-fache des Achsstandes beträgt.

Bei Lokomotiven, die für Untertag-(Stollenbetrieb) bestimmt sind, unterliegt die Höhe und Breite einer besonderen Einschränkung. Typen mit nur 800 mm Höhe sind auch schon gebaut worden.

Wenn man sich des weiteren noch vor Augen hält, welche Bestandteile auf der Lokomotive unterzubringen sind, so kann die Bauform organisch entwickelt werden.

Die elektrische Ausrüstung besteht aus zwei Motoren, 1 Stromabnehmer, 1 Satz Vorschaltwiderstände, 1 Fahrschalter.

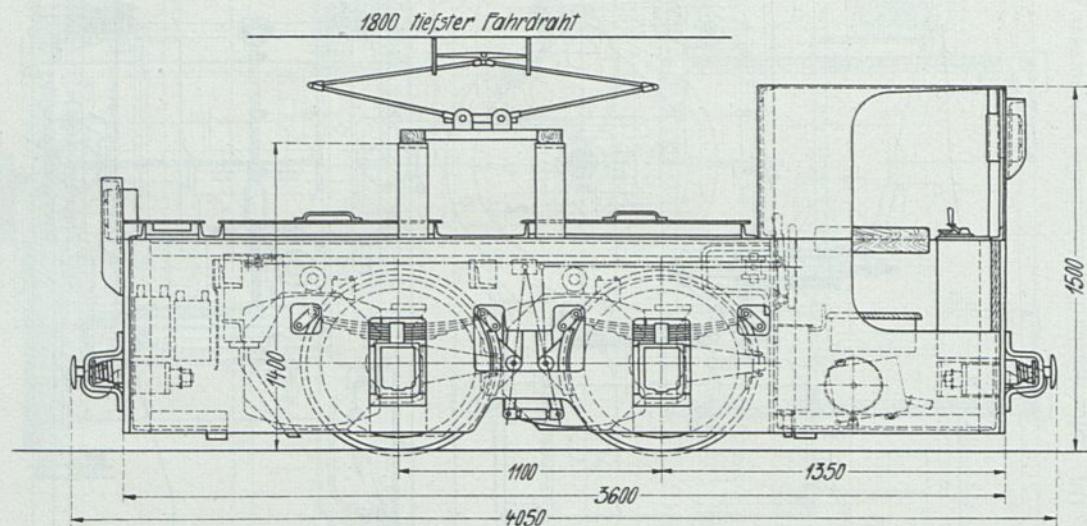


Abb. 418. Grubenlokomotive mit gedecktem Führersitz, Blattfedern, Motore hintereinander.

2. Zweimotorige Ausrüstung. Zwei Motoren nimmt man fast ausnahmslos, weil man auf die Reihenschaltung nicht gerne verzichtet und zur vollen Ausnutzung des gesamten Gewichtes als Treibgewicht beide Achsen anzutreiben sind. Man zieht diese Betriebsweise meist einer mechanischen Kupplung der Achsen vor. Die zweimotorige Ausrüstung gewährt auch eine Notreserve für den Fall, daß einer der Motoren schadhaft wird.

3. Motoren außerhalb der Achsen. Zur Unterbringung dieser elektrischen Ausrüstung benötigt man zwei Achsen, die mit möglichst geringem Radstand einzubauen sind. Zu diesem Zwecke werden beide Motoren nach außen gelegt und der Raum zwischen den Achsen für den Führerstand bzw. Sitz ausgenutzt. Um die

ganze Breite der Spurweite für die Unterbringung des Motors zur Verfügung zu haben, wird ein Außenrahmen vorzusehen sein, der nur bei den leichtesten Formen, die für ganz kleine Geschwindigkeiten dienen, ungefedert oder nur mit Spiralfedern auf die Achse gelagert wird. Blattfedern sind entschieden vorzuziehen.

Diese Anordnung führt zu der für elektrische Lokomotiven verbreiteten Bügelleisenform (Abb. 415, 416). Einen Nachteil bildet die geringe Stabilität, weil die schweren Motormassen außerhalb der Achsen liegen, und so das Trägheitsmoment um die lotrechte und die wagrechte Querachse unnötig vergrößern.

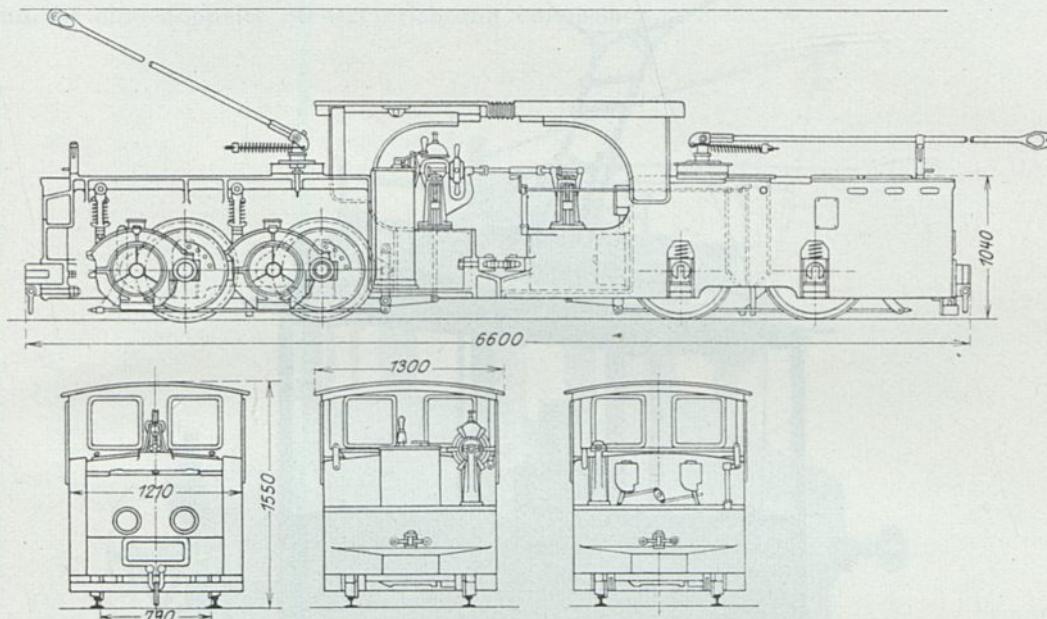


Abb. 419. Doppel-Lokomotive für Stollenbetrieb. Motore hintereinander, Steuerung und Bremsung von einem Führersitz (Ganz).

4. Hintereinander - (Tandem-) Anordnung. Dieser Übelstand wird bei einer Hintereinander-(Tandem-) Anordnung der Motoren (Abb. 417, 418, 419) etwas verbessert.

5. Innenliegende Motoranordnung. Die beste Lauffähigkeit gibt die Anordnung mit innenliegenden Motoren, die wegen des größeren Radstandes meist nur in Obertagbetrieben verwendet wird, wo die Schaffung guter Richtungsverhältnisse keine so schwierige ist als im Stollen (Abb. 420 bis 423).

Der Rahmen wird bei gangbaren Typen aus Stahlguß hergestellt, sonst aus Formeisen und Blechen zusammengenietet.

6. Drehgestellokomotiven. Genügen zwei Achsen nicht, können Typen mit drei oder vier Achsen vorgesehen werden. Erstere sind nur in Amerika für ganz schwere Grubenbetriebe mit festem Rahmen gebräuchlich, letztere werden in der Drehgestellbauart ausgeführt. Da kleine Motoren unwirtschaftlich sind und ihre Instandhaltung auch mehr Sorgen gibt als doppelt so große Einheiten und diese in der halben Anzahl, ist es eine gute Lösung, die beiden Achsen jedes Drehgestelles zu kuppeln und nur einen Motor, insgesamt also deren zwei vorzusehen. Die zweimotorige Anordnung führt auch zu einer wesentlich einfacheren Steuerung.

Diese Bauart empfiehlt sich insbesondere dann, wenn eine verhältnismäßig große Zugkraft verlangt wird, die Motoren daher mit doppeltem Vorgelege versehen sein müssen.

Diese Anordnung ermöglicht, die Drehgestelle bei kleinen Radständen mit guter Lauffähigkeit zu bauen, wobei auch der Rahmen mit geraden Trägern ausführbar bleibt (Abb. 424).



Abb. 420. Obertag-Lokomotive für eine Industriebahn. Achsfolge 2 A. 2 Motoren innenliegend (A.E.G.U.).

Gewicht 5,5 t. Leistung 2×17 PS/h. Geschw. 12 km/h. Spurweite 700 mm.

7. Verschublokomotiven. Bei Gleichstromlokomotiven für Verschub- und Schleppdienst, welche die Geleiseanlagen öffentlicher Bahnen mitbenützen oder für die dieselben Verhältnisse bestehen, behält die Bügeleisenform mit einer Kabine in der Mitte ihre volle Berechtigung; es kommen eben nur Untergestellmotoren in Betracht, so daß auf der Plattform nur noch die Widerstände, Bremseinrichtungen, eventuell der erforderliche Ballast unterzubringen ist, wozu die niedrigen Vor-

bauten, die den freien Ausblick des Führers nicht behindern, vollständig ausreichen (Abb. 421, 422, 423, 425).

Der Fahrschalter, die Bremse, der Sandstreuer und die Pfeife bzw. Glocke müssen so angeordnet sein, daß der Fahrer alles bedienen kann ohne seinen Platz zu verlassen.

Für den Verschubdienst ist zu beachten, daß der Fahrer sich aus der Lokomotive herausbeugen muß, um die üblichen optischen Signale zu sehen; es muß ihm währenddessen die Bedienung der Steuerung möglich sein, wenigstens auf der einen Seite. Für Maschinen dieser Art, die in beiden Richtungen gleichen Dienst tun, ist eine doppelte Steuereinrichtung vorzusehen.

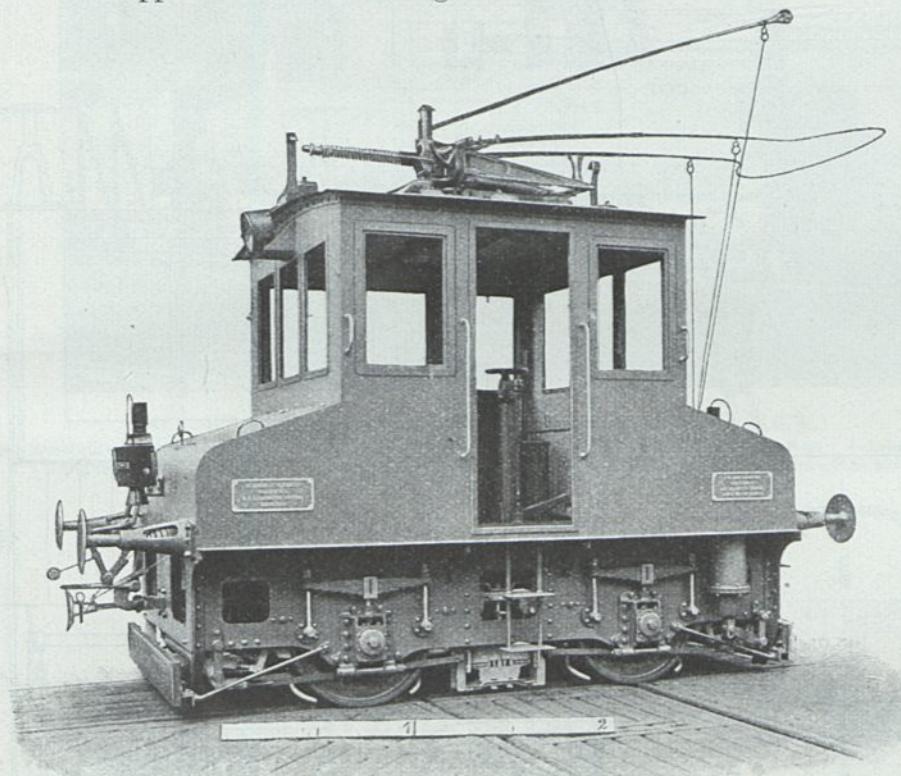


Abb. 421. Regelspurige Verschublokomotive mit zweierlei Zug- und Stoßvorrichtung und dreierlei Stromabnehmer. Leistung 180 PS, Gewicht 10 t (A.E.G.U.).

8. Einrichtung des Führerstandes. Der Entwurf des Führerstandes erfordert unter sorgfältiger Bedachtnahme des Verwendungszweckes des Triebfahrzeuges grundsätzlich eine derartige Anordnung aller Steuer- und Sicherheitsbehelfe, daß die Bedienung durch sympathische Bewegungen des Fahrers erfolgen kann. In diesem Belange gelten dieselben Grundsätze auch für Vollbahnlokomotiven (Abb. 427).

Wird die Handbremse betriebsmäßig benutzt, so ist diese auf der rechten Seite des Fahrers anzuordnen, damit er im Bedarfsfalle die größte körperliche Kraft entwickeln kann, ohne dabei seine Aufmerksamkeit von den Vorgängen auf dem Bahnkörper abwenden zu müssen.

Steht eine pneumatische Bremse zur Verfügung, ist die Vorrichtung zu ihrer Betätigung ebenso wie der Fahrschalter in bequemem Handbereich des Führers anzuordnen, und zwar tunlichst so, daß sich der Fahrer aus der Kabine hinausbeugen kann, ohne den Steuerhebel loslassen zu müssen.

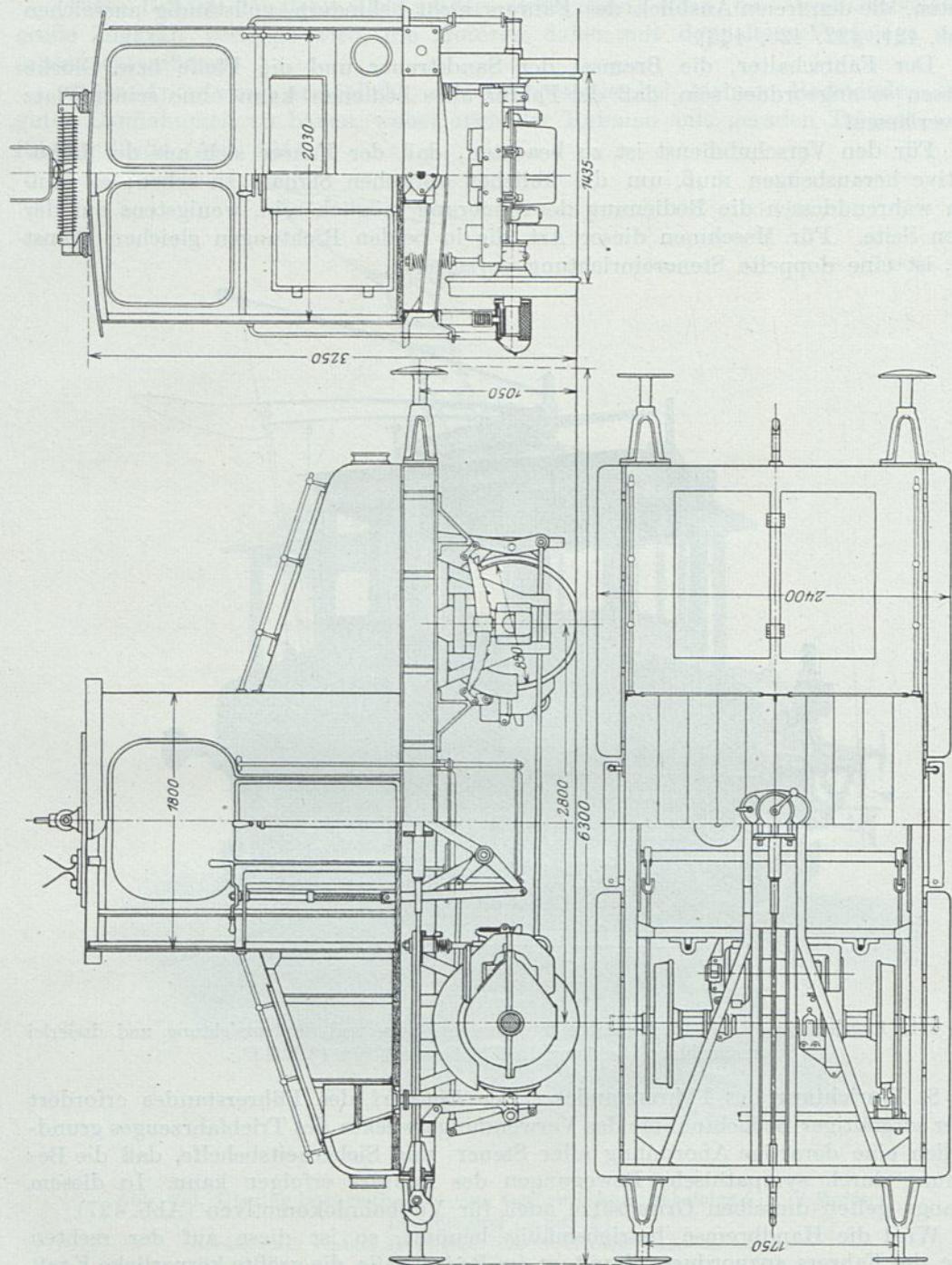


Abb. 422. Regelspurige Verschublokomotive mit seitlich offenem Führerstand (S.S.W.).

Das Gleiche gilt bezüglich der Betätigung der Signaleinrichtungen.

Daß sich alle Instrumente, die dem Führer über die Belastung der Lokomotive, die Bremse, die Fahrgeschwindigkeit usw. Aufschluß geben, so angeordnet sein müssen, daß er sie sehen kann, ohne seinen Standort zu verlassen, bedarf keines weiteren Beweises.

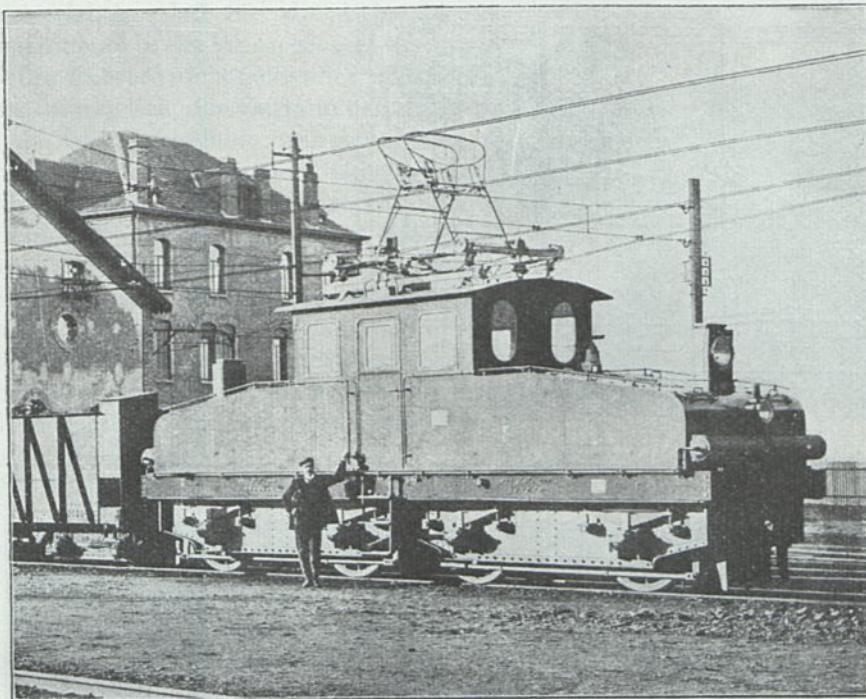


Abb. 423. Industriebahn-Lokomotive mit Drehgestellen. (S.S.W.)

Anlage: Moselhütte—Maizières (1908). Spurweite 1 m. Gewicht 5,5 t. Raddurchmesser 1250 mm. Achsfolge 2 A + 2 A. Leistung $4 \times 160 = 640$ PS. Stromart G.S.; 2000 V. Zugkraft 8000 kg. Geschwindigkeit 22 km/h.

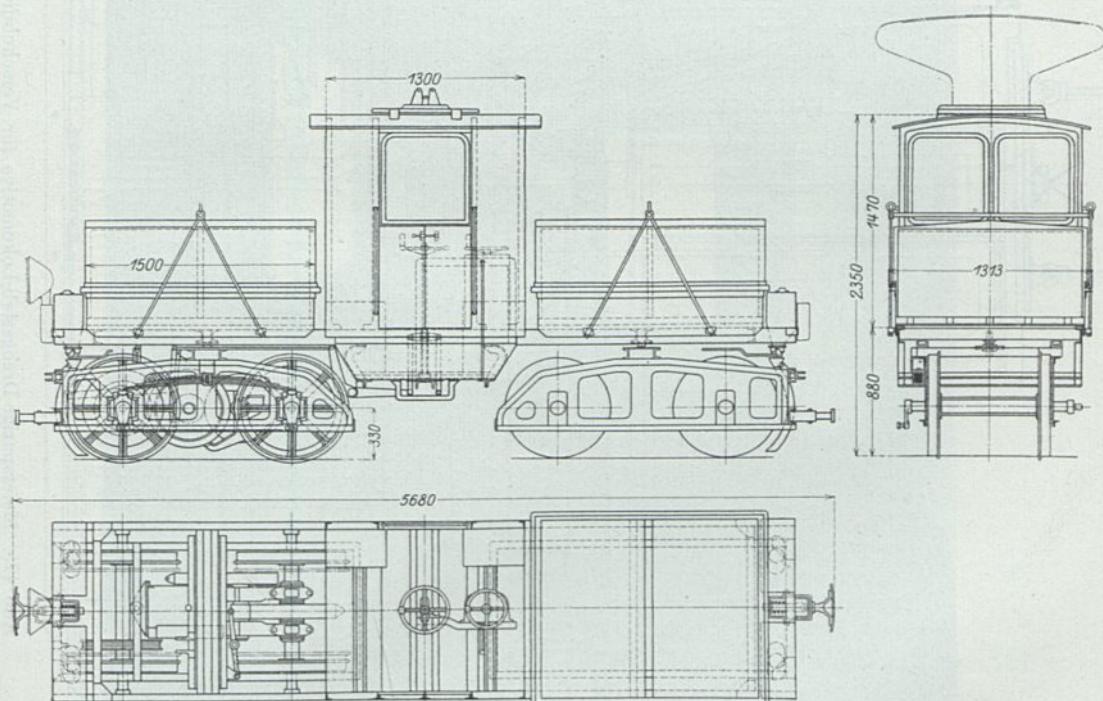


Abb. 424. B + B-Lokomotive für geringe Achsdrücke, Spurweite 600—800 mm ohne Änderung des Bremsgestänges, besondere Bremsscheibe, Oberleitungs- und Speicherbetrieb, Speicher abhebbar, zwei Motoren je 15 PS, doppelte Zahnradübersetzung (A.E.G.U.).

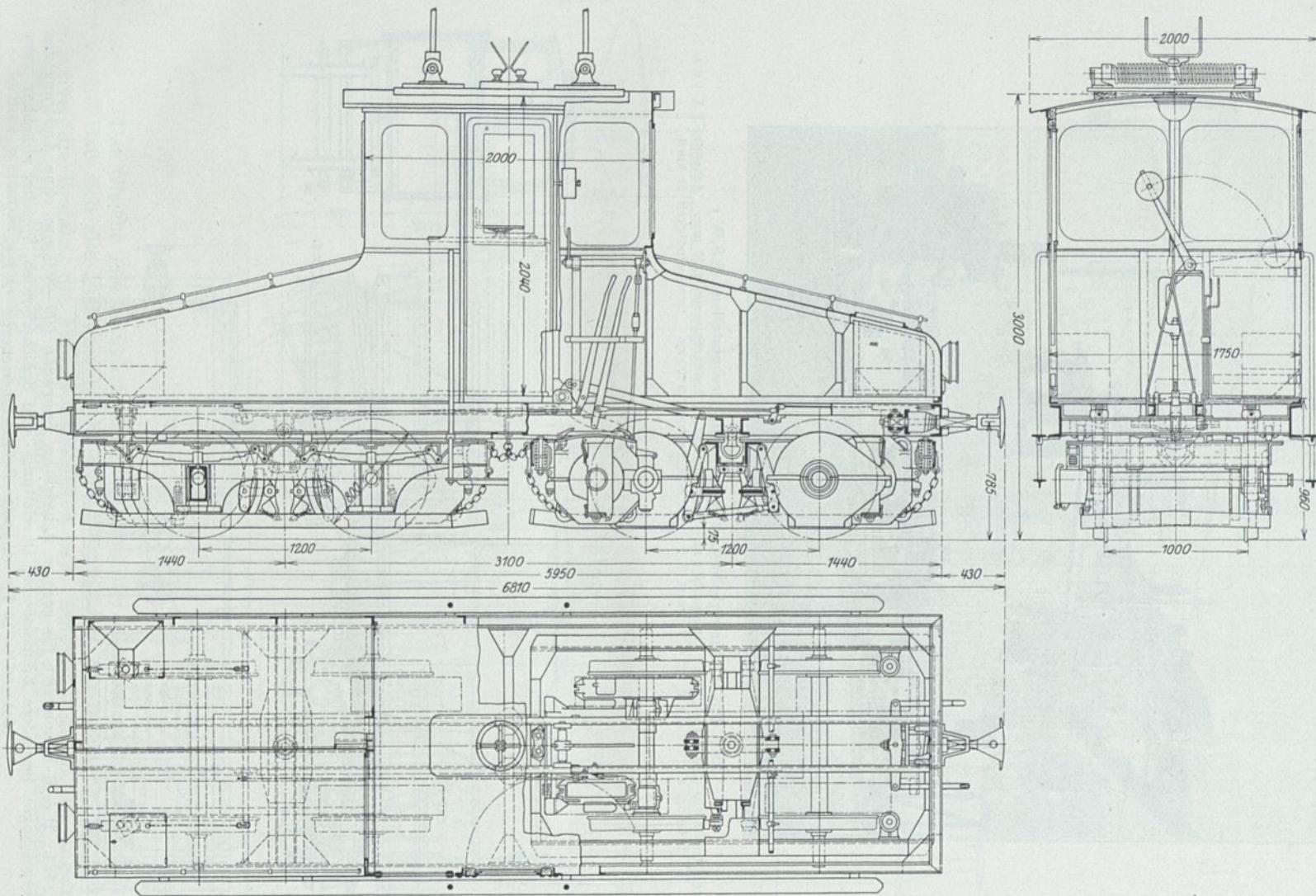


Abb. 425. Meterspurige-Drehgestell-Lokomotive für Verschubdienst. Motore außerhalb der Achsen, kurze Achsstände (S.S.W.).

Es ist wichtig, daß für die Beleuchtung dieser Instrumente in der Weise gesorgt wird, daß das Auge des Fahrers nicht geblendet wird, sonst ist es ihm unmöglich den Zustand der Strecke, die Signale bei Dunkelheit wahrzunehmen.

Von Maschinen für höhere Geschwindigkeiten wird verlangt, daß die Führerkabine allseitig geschlossen und gut heizbar sei. Bezuglich Anordnung des Führerstandes ist zu erwähnen, daß das Personal es nicht gerne sieht, wenn der Führerstand ganz vorne an das Maschinenende gesetzt wird, vielmehr werden möglichst lange Vorbauten vorgezogen, die bei Zusammenstößen immerhin einen Teil der Stoßenergie aufzunehmen imstande sind.

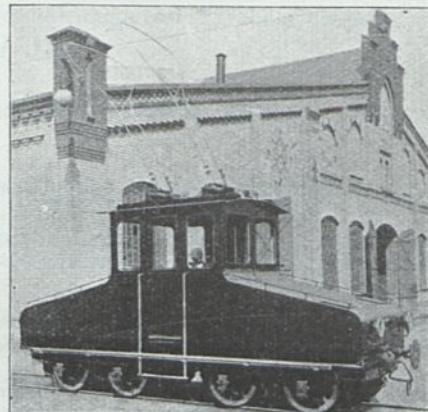


Abb. 426. Ansicht der Lokomotive Abb. 425.



Abb. 427. Einrichtung des Führerstandes einer Lokomotive der S.B.B. (M.F.O.).

XIII. Vollbahnlokomotiven.

Literatur.

Allgemeines:

- Afee. Mechanische Aufgaben beim Entwurf elektrischer Lokomotiven. E.J. 1918. Bd. 1, S. 16. — Ref. E.K.B. 1919. H. 20.
- Batchelder. Mechanical design of electric locomotives. E.R.J. Nov. 1916.
- Fontanellaz. Einheitliche Kennzeichnung sämtlicher Lokomotivbauarten der Welt. G.A. 1921. Nr. 1066.
- Hruschka. Einteilung und Bezeichnung der elektrischen Triebfahrzeuge. E.K.B. 1912. H. 26.
- Kleinow. Betrachtungen über Einzelheiten amerikanischer elektrischer Vollbahnlokomotiven. E.K.B. 1913. H. 27.
- Laternser. Wirtschaftliche und konstruktive Gesichtspunkte im Bau neuerer Groß-Elektrolokomotiven. Sch.B.Z. 1920. Bd. 77. Nr. 5.
- Liechty. Lokomotiven mit Hilfsmotoren. G.A. 1908. Nr. 746.
- Liechty. Lokomotiven und Wagen mit Triebdrehgestellen. G.A. 1916. N. 926.
- Leitzmann und Borries. Lehrbuch des Lokomotivbaues. Verl. Julius Springer, Berlin 1911.
- O'Brien. The application of electric locomotives to main line railway traction. E.R. 1921. Bd. 88. Nr. 2261. — Ref. E.u.M. 1921. H. 24.
- Seefehlner. Elektrische Vollbahnlokomotiven in Europa und Amerika. E.K.B. 1915. H. 31.
- Seefehlner. Das Gewicht der elektrischen Vollbahnlokomotiven. E.u.M. 1915. H. 1.
- Seefehlner. Entwicklungsmöglichkeiten der elektrischen Vollbahnlokomotive. Sch.B.Z. 1921. Bd. 78. Nr. 2. — Ref. E.K.B. 1921. H. 10. — E.u.M. 1921. H. 38. — Ref. E.W. 1921. Bd. 78. Nr. 70.
- Stockert. Handbuch des Eisenbahnmaschinenwesens. Bd. I. Julius Springer, Berlin 1908.
- Storer. Electric locomotive characteristics. E.R.J. 1921. Bd. 57. Nr. 19.
- Wichert. Über Reihenbildung elektrischer Lokomotiven als Voraussetzung für ihre Vereinheitlichung. G.A. 1921. Nr. 1055. — Winkler. E.u.M. 1921. H. 26.
- Zehme. Fahrzeuge für elektrische Bahnen. Eisenbahntechnik der Gegenwart. Bd. IV. Abschn. E. C. W. Kreidels Verl. 1914.
- Zipp. Elektrische Vollbahnlokomotiven für einphasigen Wechselstrom. Verl. O. Leiner, Leipzig 1915.
- * * * La locomotive électrique et la traction des grande vitesse. R.G.E. Mai 1917. S. 740.
- * * * Sul peso dei locomotivi elctr. Ela. 1918.

1. Benennung der Bauarten auf Grund der Achsfolge. Schematische Bezeichnung für die Achsfolge:

$A = 1$	$B = 2$ $C = 3$ $D = 4$ $E = 5$ $F = 6$	Triebachsen miteinander gekuppelt.	Die Anzahl der Laufachsen wird durch Zahlen angegeben.
$B = 2$			
$C = 3$			
$D = 4$			
$E = 5$			
$F = 6$			

Analog für Zahnbahnen

- $a = 1$ Triebzahnrad,
 $b = 2$ Triebzahnräder gekuppelt,
 $c = 3$ Triebzahnräder gekuppelt.

In einem Gestell vereinigte Achsen sind durch Bindestrich gekennzeichnet; gekuppelte Gestelle erhalten das + - Zeichen; z. B.

1 — D — 2

eine vierfach gekuppelte Maschine mit einer Laufachse und einem Drehgestell.

2 + 2A + 2A

Gliedermaschine, bestehend aus drei zweiachsigen gekuppelten Gestellen, davon das vorderste ein Laufgestell, die übrigen Triebgestelle.

1 — b — 1

Zahnradlokomotive mit zwei Laufachsen und zwei gekuppelten Triebzahnrädern.

A/b — 1

Zahnradlokomotive für gemischten Betrieb mit einer Reibungsachse, zwei gekuppelten Triebzahnrädern und einer Laufachse.

2. Maßbestimmungen. Die räumlichen Einschränkungen, die bei nicht-öffentlichen Bahnbetrieben durch die örtlichen Verhältnisse gegeben sind, werden bei Vollbahnen in der Hauptsache durch internationale Vereinbarungen geregelt. Diese Regeln sind in den Technischen Vereinbarungen (T. V.) und den E.M.V. (Eisenbahn-Ministerial-Verordnung) bezüglich der Technischen Einheit der Eisenbahnen niedergelegt. Diese enthalten insbesondere alle Maßangaben betreffend die Umgrenzungslinie der Fahrzeuge und des Lichtraumprofiles.

Nachdem die Normalhöhe der Zug- und Stoßvorrichtung feststeht, ist damit auch die Richtung, in der die Zugkraft auszuüben ist, gegeben.

Die Herstellung des mechanischen Aufbaues einschließlich des außerhalb des Motors befindlichen Getriebes ist Sache der Lokomotivfabrik; es kann angenommen werden, daß die Detailausarbeitung dieser Einrichtungen nach den allgemeinen Regeln des Maschinenbaues seitens der Lokomotivfabrik durchgeführt wird.

Da aber die Mechanik und die elektrische Ausrüstung miteinander in innigem Zusammenhang stehen und die Wirkungsweise der letzteren vom Elektroingenieur beherrscht wird, ist es dessen Aufgabe, alle Anordnungen zu treffen, den Entwurf der Lokomotive in den Grundzügen und in den Hauptabmessungen festzulegen.

Hierzu ist es nötig, daß der Elektroingenieur die Beschränkungen, die sich aus den für Bahnfahrzeuge geltenden T.V. und der T. E. ergeben, kennt und sie in seinen Entwürfen berücksichtigt.

Die hauptsächlichsten Bedingungen sind:

Größte Breite	3000 mm
" Höhe	4570 mm
Lichte Höhe über S.O.	(100) 60 mm
Größter fester Achsstand	5500 mm
Größte Drehzahl der Achsen	400/min
Radreifenbreite	130—150 mm.

3. Anordnung der elektrischen Ausrüstung. Für Unterbringung der Bestandteile der elektrischen Ausrüstung hat als Grundsatz zu gelten, daß in der Anordnung die Reihenfolge des Stromlaufes einzuhalten ist. Diese Reihenfolge ist bei Behandlung der Schaltpläne dargelegt worden.

Der Hochspannungsschalter samt Höchststromauslösung, Drosselpule und Erdungsschalter wird knapp unter dem Dach nächst dem Transformator stets in einer Kammer angeordnet, die nur bei geöffnetem Schalter also spannungslosem Zustande erreichbar ist.

In gleicher Weise ist dafür zu sorgen, daß das Lokomotivdach nur bei herabgelassenen Stromabnehmern betreten werden kann. Zu diesem Zwecke wird die Steigleiter mit einem Abläßhahn der Druckluftleitung für den Stromabnehmer verbunden.

Unmittelbar in der Nähe des Transformators sind diejenigen Steuerungsbehelfe unterzubringen, die für die Stufenschaltung bzw. Geschwindigkeitsregelung dienen. Von diesen gehen Hauptleitungen zu den Motoren, in deren Nähe dann die Motorschalter wie: Fahrtwender, Kurzschließer und Nebenschließer anzutunnen sind.

Vorstehendes gilt für Wechselstrombetrieb und sinngemäß auch für andere Stromarten.

Die Nebenapparate, wie: Pumpen, Kompressoren, werden dann zum Zwecke eines Gewichtsausgleiches auf geeignete Stellen verteilt.

Bezüglich der Gewichtsverteilung ist anzustreben, daß die Last möglichst gleichmäßig ausgeteilt wird, damit die Biegungsbeanspruchungen des Rahmens in möglichst niedrigen Grenzen gehalten werden. Dieser Grundsatz fußt auf der Tatsache, daß das Gewicht der Mechanik sich ziemlich gleichmäßig auf die Achsen verteilt, bzw. nach Maßgabe des Achsdruckes eine derartige Belastung unschwer zu erreichen ist.

4. Die Mechanik. Insolange die Frage eines für den Vollbahnbetrieb geeigneten Motors noch nicht gelöst war, wobei dessen sämtliche Eigenschaften, also nicht nur dessen Wirkungsweise bei der Umformung der elektrischen Arbeit in mechanische im Auge zu behalten ist, sondern auch die mit dem Motorsystem eng zusammenhängende Art der Stromerzeugung, Fernleitung und Verteilung, richtete sich die ganze Aufmerksamkeit auf die elektrische Ausrüstung und dachte man der Mechanik und dem Laufwerk weniger Beachtung zuwenden zu müssen. Diese Auffassung bestärkte der Umstand, daß die Kraftübertragung vom Elektromotor zu den Achsen scheinbar einfacher beschaffen ist als diejenige der Dampflokomotive.

Die Entwicklung der elektrischen Lokomotive hat damit einen verfehlten Weg eingeschlagen, der erst verlassen erscheint, seitdem man der Lauffähigkeit der Lokomotive und dem organischen Zusammenbau der elektrischen Ausrüstung mit der Mechanik ernste Beachtung schenkt und sich auch der Fesseln der Technik der Straßenbahnmotorwagen entledigt hat.

Viele Erstausführungen trugen diesen Erwägungen nicht Rechnung und beachteten vor allem auch die für Dampflokomotiven als richtig erkannten Bau規eln nicht. Unfälle und schwere Beschädigungen des Oberbaues waren die Folge.

Die elektrische Lokomotive kann zur Umwandlung der Drehung in eine fortschreitende Bewegung die bei der Dampflokomotive vorhandenen hin- und hergehenden Massen entbehren, doch ist sie trotzdem nicht frei von störenden Nebenbewegungen.

Diese „störenden Nebenbewegungen“ und Wirkungen sind teils auf innere, teils auf äußere Ursachen zurückzuführen.

Beim Entwurf der Mechanik wird man ebenso wie bei einer Dampflokomotive sich über Art und Größe der zu gewärtigenden störenden Wirkungen Rechenschaft geben müssen.

Die störenden Nebenbewegungen können durch Zerlegung in drei räumlich zueinander senkrechte Richtungen erfaßt werden.

Das Zucken ist die Folge von periodischen, in der Richtung der Bewegung im Schwerpunkt angreifenden Kräften.

Durch den Schwerpunkt lotrecht gerichtete Kräfte erzeugen das Wogen; wagerecht gerichtete Kräfte das Schwanken.

Ein Kräftepaar in der senkrechten Längsebene des Fahrzeuges erzeugt das Nicken, in der Querebene das Wanken; schließlich Drehmomente in der wagerechten Ebene das Schlingern.

Als äußere Ursachen sind die Unregelmäßigkeiten der Fahrbahn anzusehen, die, wenn zwar im allgemeinen unregelmäßig, durch eine gewisse Periodizität Häufungsscheinungen herbeiführen können.

Soweit die angedeuteten äußeren Ursachen in Betracht kommen, sind zur Bekämpfung dieser „störenden Nebenbewegungen“ dieselben Mittel anzuwenden, die Theorie und Praxis bei Dampflokomotiven als wirksam erkannt hat.

Zur Bekämpfung des Schlingerns wird das Trägheitsmoment des Fahrzeuges um eine lotrechte Drehachse tunlichst herabzusetzen sein und zu diesem Zweck das Gewicht der Einrichtungen möglichst gegen die Fahrzeugmitte angeordnet.

Der Hebelarm der abweisenden Kraft, das ist der feste Achsstand, wird, soweit es die Kurvenläufigkeit erlaubt, namentlich für höhere Fahrgeschwindigkeiten tunlichst groß zu bemessen sein. Da die Wirkungen der Geschwindigkeit quadratisch wachsen, wird die gute Führung des Fahrzeuges sorgfältig zu erwägen sein; führende Gestelle oder Laufachsen müssen kräftige Rückstellfedern erhalten.

Eine gute Lauffähigkeit verlangt ruhigen Gang der Maschine bei jeder Geschwindigkeit in Verbindung mit geringer Beanspruchung des Oberbaues und guter Kurvenläufigkeit. Außer den bereits oben angedeuteten Maßregeln wird in diesem Belange eine hohe Schwerpunktslage des Fahrzeuges erwünscht sein.

Das Fahrzeug wankt um die wagerechte Längsachse unter dem Einfluß der störenden Schienenkräfte, die hochliegenden Massen der gegen die Achsen abgefederten Teile des Fahrzeugs erhöhen dessen Trägheitsmoment um diese Achse. Die hochliegende Masse leistet diesen Kräften weniger Folge, so daß die Bewegungen in der Querachse verringert werden.

Lange Zeit betrachtete man die hohe Lage des Schwerpunktes beim Baue von Dampflokomotiven als unvermeidliches Übel, das man wegen der Kesseldimensionen in Kauf nehmen mußte. Im Verfolg der gleichen Anschauung bevorzugte man beim Bau elektrischer Lokomotiven Triebmaschinen mit kleinen Abmessungen, weil sie ermöglichten, den Schwerpunkt der Maschine tief zu legen.

Damit traten bei hohen Geschwindigkeiten Unzuträglichkeiten auf. Es zeigte sich, daß die tiefe Schwerpunktslage zu sehr hohen seitlichen Schienendrücken führte. Auf der N.Y.C.-Bahn kam es aus dieser Ursache zu Zerstörungen des Gleises und folgenschweren Entgleisungen. Die ursprünglich mit der Achsfolge 1—4 A—1 ausgeführten Lokomotiven mußten umgebaut werden und erhielten führende Drehgestelle (Abb. 442 u. 443).

Die hohe Schwerpunktslage verringert auch die Raddrücke in Krümmungen, so daß dieser Grundsatz besonders für hohe Geschwindigkeiten beachtet werden sollte.

Diese Regeln sind vom Standpunkt der Lauffähigkeit des Fahrzeuges auch für die Anordnung der elektrischen Ausrüstung maßgebend. Lokomotiven mit nahe an den Enden eingebauten Motoren sind demnach verfehlt.

Je nachdem innere Störungswirkungen auch vorhanden sind, kommen die äußeren Störungsquellen bei dem verschiedenen Getriebe mehr oder weniger zur Geltung.

Vom Standpunkt der inneren Störungsursachen betrachtet, hat man die Getriebeanordnungen in zwei Gruppen zu teilen.

Die Antriebe mit rein umlaufenden Konstruktionsteilen vermeiden störende Nebenbewegungen vollständig.

Die umlaufenden Motormassen stellen Körper mit vergleichsweise großen Trägheitsmomenten dar, die eine Kreiselwirkung erzeugen.

Brech hat nachgewiesen, daß die Größenanordnung dieser Kräfte innerhalb unbedenklicher Grenzen bleibt.

Die zweite Gruppe bilden Getriebeanordnungen mit Kuppelstangen, Blindwellen, Kuppelrahmen und dergleichen.

Infolge des unvermeidlichen Lagerspieles der Kurbelgetriebe, Stichmaßfehlern in den Stangen und Kurbellängen und Ungenauigkeiten in der Winkelstellung der Kurbeln findet während einer Triebadumdrehung eine unstetige Drehmomentübertragung statt. Wenn der Puls dieser zwar unstetigen, aber doch periodischen Drehmomentübertragung mit den Eigenschwingungszahlen des umlaufenden Systems übereinstimmt, mit welchen die Motormassen oder die Radsätze gegenüber dem Rahmen oszillieren, so treten für die jeweiligen Schwingungsvorgänge kritische Drehzahlen bzw. kritische Geschwindigkeiten der Lokomotive auf, die durch ausgeprägte Schüttel-

schwingungen, unter Umständen bedenklichen Erschütterungen gekennzeichnet sind. Diese Schwingungen können alle Arten von außen verursachten störenden Nebenbewegungen in Erscheinung treten lassen.

Die französische Südbahn hat mit fünf verschiedenen Treibstangenbauarten diesbezüglich Versuche angestellt, welche die Richtigkeit dieser Überlegung bewiesen haben.

Lokomotive	Getriebe	Kritische Geschwindigkeit km/h				
		Wanken	Nicken	Wogen	Schlingern	Zucken
Thomson-Houston .	2 Blindwellen	11,5	25—32	25—32	—	68
A.E.G.	schiefe Stangen	x	x	25—32	x	55
Schneider & Co. . .	"	x	x	25—32	x	55
B.B.C.	Zweistangen	o	30	o	x	o
West.	Kandorahmen	o	30	o	35—50	o

o bedeutet, daß eine kritische Geschwindigkeit weder rechnungsmäßig erwartet noch beobachtet wurde, x bedeutet, daß eine kritische Geschwindigkeit zwar erwartet wurde, aber wegen Kürze der Gebrauchszeit nicht festgestellt werden konnte.

Außer diesen durch unvermeidliche Erzeugungsfehler primär verursachten Störungen können solche auch unmittelbar durch das Kräftespiel im Getriebe herbeigeführt werden.

Schiefe Treibstangen, die im gefederten Gestell festgelagerte Motor- oder Vorgelegekurbel mit der Kurbel der Treibachse verbinden, verursachen während jeder Umdrehung entsprechend der senkrechten Teilkraft Ent- und Belastungen der Tragfedern und bewirken, wenn die Richtung dieser senkrechten Teilkraft durch den Schwerpunkt geht, ein Wogen des Fahrzeuges. Tritt diese Teilkraft außerhalb des Schwerpunktes auf, tritt ein Nicken ein.

Bei zweckmäßiger Anordnung wird die Anker- bzw. Vorgelegewelle wenig oder garnicht über den Tragachsen überhöht angeordnet sein, so daß die Treibstange eine geringe Neigung gegen die Wagerechte aufweisen wird. Die die Störung verursachende senkrechte Teilkraft wird dann keine nennenswerte Entlastung bewirken; durch Resonanz können sich auch diese Wirkungen vervielfachen und den ruhigen Gang der Lokomotive stören.

Wenig Beachtung pflegt man der Tatsache zu widmen, daß die **Beschleunigungskraft** des Fahrzeuges die Achsbelastung verändert. Die Beschleunigungskraft kann man im Schwerpunkt angreifend denken; mit der Höhe desselben als Hebelarm erzeugt die Beschleunigungskraft ein Drehmoment, dem die vordere Achslast mit dem Achsstand als Hebelarm das Gleichgewicht hält.

Jede Beschleunigung entlastet demnach die **vordere Achse**.

In demselben Sinne wirkt die **Zugkraft** am Haken mit der Höhe des Zughakens über der Schienenoberkante als Hebelarm.

Diese Wirkungen können bei den Gewichts- und Maßverhältnissen von Vollbahnlokomotiven keine Bedeutung erlangen; sie sind insbesondere bei gekuppelten Achsen belanglos, weil die Gesamtlast und damit die Zugkraft sich nicht ändert.

Bei Einzelantrieb und unter ungünstigen Reibungsverhältnissen wird die Sicherheit gegen Gleiten durch diese Einflüsse tatsächlich vermindert. Zu bereinigen ist die Frage, welchen Einfluß übersetzte Untergestellmotore in der Trambahnanordnung durch ihre Drehmomentwirkung bewirken können; ob gegenüber dem statischen Belastungsschema eine Änderung der Achsdrücke eintreten kann.

Der Zahndruck des Motors wird von der Treibachse und der Motoraufhängung als Widerlager aufgenommen. Faßt man diejenige Fahrtrichtung und Motoranordnung ins Auge, bei welcher das Motormoment den Motor anhebt, demnach die Aufhängung entlastet, ist ohne weiteres einzusehen, daß, wenn der Anteil der Belastung

der Motoraufhängung Null wird, sich die Achslast nicht ändert, indem sie ebenso wie früher das gesamte Motorgewicht trägt; nur lastete der Anteil, der früher der Aufhängung entsprach, am Kasten, also über die Tragfeder auf der Achse. Lediglich die Tragfeder hat eine Entlastung erfahren und sich dementsprechend gehoben. Dasselbe tritt ein, wenn das Motormoment weiter gesteigert wird.

5. Bauformen. Eine der wissenschaftlichen Kritik standhaltende Bauform wird den hier angedeuteten Anforderungen der zweckmäßigen Anordnung der elektrischen Ausrüstung, der einwandfreien Mechanik des Getriebes und des Laufwerkes Rechnung tragen. Wenn zwar die diesbezüglichen Grundsätze ganz allgemein behandelt wurden und für jede Bauart ihre Gültigkeit behalten, so weisen die Ausführungen doch keinen ausgesprochenen einheitlichen Zug auf. Dies liegt darin, daß den hier erörterten störenden Wirkungen je nach Art der vorliegenden Aufgabe mehr oder weniger Bedeutung zukommt, bzw. vom Konstrukteur zugemessen wird; andererseits sind die Stromsysteme auch nicht ohne wesentlichen Einfluß auf die zu wählende Bauart.

Ein Hinweis auf die Tatsache, daß das hochgespannte Gleichstromsystem aus Gründen der Begrenzung der Motorspannung die Unterteilung der Leistung auf eine vergleichsweise große Motorzahl verlangt und eine wirtschaftliche Geschwindigkeitsregelung auch nur auf diesem Wege erzielbar ist, erklärt, warum der Einzelantrieb vom Gleichstromsystem bevorzugt wird.

Die an sich und durch den mitgeschleppten Transformator ungünstigeren Gewichtsverhältnisse des Einphasensystems lassen eine erhöhte Baustoffwirtschaft, die durch große Motoreinheiten erzielbar ist, wünschenswert erscheinen. Hierdurch tritt der Vielachsenantrieb in den Vordergrund.

Das Stromsystem ist mitbestimmend für die Zweckform des Lokomotivaufbaues, welcher eine Schutzverkleidung für die maschinelle Einrichtung darstellt und einen Raum für den Führer zu enthalten hat.

Bei Drehstrom- und Gleichstrom-Mittelspannungsanlagen mit tief angeordneten Motoren ist der überwiegende Teil der elektrischen Einrichtung bereits im Untergestell untergebracht. Im Kasten ist in der Hauptsache nur mehr der Führerstand unterzubringen, für welchen eine Grundfläche von etwa 1,5 bis 2 m Länge mehr als ausreichend ist; die noch übrigen Bestandteile der elektrischen Ausrüstung finden in beiderseits angeordneten bis etwa Fensterhöhe reichenden Vorbauten Unterkunft.

Auf diese Weise ist die bekannte symmetrische Bügeleisenform mit der Führerkabine in der Mitte entstanden, welche Bauform unter den geschilderten Verhältnissen durchaus am Platze ist.

Mit Einführung hochliegender Motoren und solcher Systeme, die den Transformator auf der Lokomotive mitführen oder aus anderen Gründen (Gleichstrom-Hochspannung) zur Unterbringung der Steuer- und Schaltbehelfe vergleichsweise große Räume benötigen, mußte die Bügeleisenform verlassen werden und wählte man meist die bei den Triebwagen übliche symmetrische Kastenbauart mit je einem Führerstand am Fahrzeugende.

In vielen Fällen wird sich diese immerhin umständliche Bauart, die den Mangel aufweist, daß die eigentlich nur einmal benötigten Steuerapparate doppelt vorgesehen sind, nicht vermeiden lassen. Sinngemäßer ist eine Anordnung mit nur einer Führerkabine, die nicht am Maschinenende angeordnet ist.

Das Personal sieht die Führerstände am Stirnende nicht gern, weil bei Zusammenstößen in erster Linie das Fahrzeugs Ende die Gewalt des Anpralles aufzunehmen hat.

Wird die Führerkabine in der Fahrzeugmitte angeordnet, müssen die Vorbauten zur Unterbringung der elektrischen Einrichtung entsprechend schmäler gehalten werden, damit dem Führer eine freie Sicht ermöglicht wird.

6. Lokomotiventwürfe. Diese Gesichtspunkte und Regeln vor Augen haltend, kann zur Ausfertigung einer Entwurfskizze geschritten werden. An Hand derselben ist es dann Sache der Lokomotivfabrik die Werkpläne zu verfassen.

Die Aufgabe sei gegeben: es ist eine Güterzugsmaschine für eine Gebirgsstrecke zu bauen. Es ist bekannt:

- die Spurweite,
- der Achsdruck,
- die größte und normale Fahrgeschwindigkeit,
- die mit 36,0 km/h zu fördernde Bruttolast,
- die Zugkraft am Haken und
- die Regelleistung.

Als ersten Schritt hat man die Achsfolge festzulegen.

Diesbezüglich ist vorerst im Hinblick auf verfügbare Motortypen die Wahl zwischen Untergestell- und Obergestellmotoren bzw. dem Einzel- oder Vielachsentrieb zu treffen.

Im ersteren Fall wird man mit einer etwas geringeren Zugkraft für die Tonne-Reibungsgewicht und einer schlechteren Baustoffwirtschaft zu rechnen haben. Der Einfluß beider Größen

$$1000\mu = z \text{ kg/t} \quad \text{und} \quad q \text{ kg/PS}$$

auf das Lokomotivgewicht, geht aus den im IV. Teil, II. Kap. abgeleiteten Beziehungen hervor. Die Lokomotivleistung $A = na$ PS lässt sich ausdrücken:

$$\frac{Aq}{1000} = nR + mL = R\left(n + \frac{m}{p}\right) \quad \text{und} \quad a = \frac{A}{n} = \frac{1000R}{q} \left(\frac{n + \frac{m}{p}}{n}\right),$$

wo $R = pL$ die Achslast in t auf einer Treibachse,

n die Anzahl der Treibachsen,

L den Achsdruck einer Laufachse in t,

m die Anzahl der Laufachsen,

a die Leistung einer Treibachse in PS

bezeichnet.

Bei voll ausgenutztem Reibungsschlüssel gilt

$$a = \frac{1000\mu \cdot R \cdot v}{270},$$

daher

$$v = \frac{270}{q\mu} \left(\frac{n + \frac{m}{p}}{n} \right) = \frac{270000}{qz} \left(\frac{n + \frac{m}{p}}{n} \right).$$

Für $m = 0$ wird

$$v_r = \frac{270}{\mu q}$$

diejenige Geschwindigkeit, welche bei Ausnutzung der Reibung aller Achsen dem spezifischen Baugewicht der Lokomotive entspricht. (Rechentafel Abb. 143.)

Wird eine höhere Leistung bzw. eine höhere Geschwindigkeit verlangt, müssen Laufachsen vorgesehen werden. In diesem Fall ist $m > 1$ und

$$v_n = v_r \frac{n + \frac{m}{p}}{n}.$$

Z. B. für

$$m = 0 \quad \text{und} \quad z = 180 \text{ kg/t} \quad \text{wird}$$

$$v_r = \frac{1500}{q}$$

und für

$$z = 160$$

$$v_r = \frac{1690}{q}.$$

Wenn für die in Betracht kommende Aufgabe $q = 55 \text{ kg}$ für eine Bauart mit Gestellmotoren und $q = 60 \text{ kg}$ für eine Bauart mit Untergestellmotoren gesetzt wird, so ist im erstenen Fall

$$v_r = 27,3 \text{ km/h}$$

und im zweitenen Fall

$$v_r = 28,2 \text{ km/h.}$$

Hieraus folgt, daß die Aufgabe, eine Lokomotive für 36 km/h zu bauen mit einer Bauart, die nur Treibachsen erhält, mit den angegebenen spezifischen Gewichten nicht gelöst werden kann. Man hat die Wahl, ein System mit geringerem spezifischem Lokomotivgewicht anzuwenden, die Leistung herabzusetzen oder auf ein Schema mit Laufachsen zu übergehen. Es sei ersteres der Fall.

Der Achsdruck mit 14,5 t sei in beiden Fällen gegeben, daher kann eine Achse

$$\frac{14,5 \cdot 180 \cdot 27,3}{75 \cdot 3,6} = 264 \text{ PS} \quad \text{bzw.}$$

$$\frac{14,5 \cdot 160 \cdot 28,2}{270} = 242 \text{ PS} \quad \text{leisten.}$$

Die Zugkraft einer Achse beträgt

$$180 \times 14,5 = 2610 \text{ kg} \quad \text{bzw.}$$

$$160 \times 14,5 = 2320 \text{ ,}$$

Um die Kraft am Zughaken 12000 kg auszunützen, werden ohne Rücksicht auf den Eigenbedarf der Lokomotive

$$\frac{12000}{2610} = 4,6 \quad \text{bzw.} \quad \frac{12000}{2320} = 5,2 \text{ Achsen}$$

nötig. Die Lokomotive wird demnach mit fünf bis sechs Treibachsen auszurüsten sein.

Die Lokomotive mit Gestellmotoren und fünf Achsen kann demnach für eine Leistung von insgesamt 1320 PS und diejenige mit Untergestellmotoren

mit fünf Achsen mit 1210 PS

oder sechs Achsen mit 1352 ,

ausgelegt werden.

Da eine Achsfolge — 5 A — zu großen Achsständen führen würde, kommt für den Einzelantrieb nur eine Anordnung mit zwei kurzgekuppelten Drehgestellen in Betracht. Die Maschine mit Einzelantrieb wird sechsachsig mit dem Schema

$$3 \text{ A} + 3 \text{ A}$$

auszulegen sein, und zwar um so eher, als die Leistung von fünf Achsen für die Erfüllung der Aufgabe etwas zu knapp wäre.

Soll die höher als v_r angesetzte Geschwindigkeit v beibehalten werden, errechnet sich die Zahl der Laufachsen aus der Beziehung

$$v = \frac{n + \frac{m}{p}}{n} v_r,$$

wo

$$v_r = \frac{270}{q\mu}$$

mit der Reibungszahl μ und dem spezifischen Gewicht q für die Pferdestärke festliegt.

Eine Zwischenform mit drei Untergestellmotoren und fünf gekuppelten Achsen kann ebenfalls in Betracht gezogen werden, weil mit obiger Motorleistung von je 242 PS der Raum zwischen der Radspur noch nicht ausgenutzt ist, indem sich in der Spur Motoren bis äußerst 400 bis 450 PS unterbringen lassen. Drei Untergestellmotoren würden zu der erwünschten Leistung von etwa 1320 PS führen. In diesem Falle hat man die fünf Achsen mit Kuppelstangen zu verbinden und erhält die Achsfolge

— E —.

Die gleiche Achsfolge wird die Lokomotive mit Gestellmotoren erhalten.

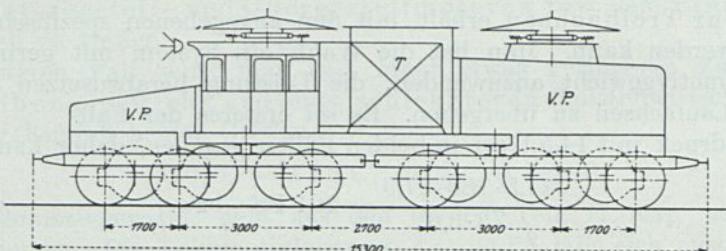


Abb. 428. Genereller Entwurf für eine Güterzuglokomotive mit Untergestellmotoren der Achsfolge 3 A + 3 A.

Die Lokomotive Achsfolge: 3 A + 3 A mit Untergestellmotoren erhält Außenrahmen, zwei Motoren sind hintereinander, der dritte in Gegenüberstellung im Untergestell angeordnet (Abb. 428).

Der Radstand wird durch die Außenmasse der Motorgehäuse bestimmt, wobei es meist nicht möglich sein wird, wie bei Dampflokomotiven Rad an Rad zu reihen. Schon bei drei Achsen mit Einzelantrieb kommt man zu dem im allgemeinen zulässigen größten festen Radstand von etwa 5000 mm.

Man wird auch aus diesem Grunde eine Gliederung des Untergestelles vornehmen. Das Kuppeln von mehr als drei Achsen muß bezüglich der erzielbaren Vorteile sehr erwogen werden, weil bei elektrischem Antrieb die Hauptursache, die hiefür bei Dampfbetrieb spricht, nämlich daß im allgemeinen nur eine Dampfmaschine vorhanden ist und eine Unterteilung des Gestelles sehr umständlich ist, bei der elektrischen Lokomotive entfällt, andererseits wird der Zugwiderstand durch Vereinigung vieler Achsen in einem Gestell zweifellos gesteigert. Weiters erscheint es nicht empfehlenswert, zweiachsige Gestelle zu wählen, weil diese in bezug auf ihre Lauffähigkeit minderwertig sind und ein Achsbruch stets katastrophale Folgen nach sich zieht. Zieht man zwecks Kürzung der Achsstände zweiachsige Gestelle vor, werden den Treibachsen der beiden äußeren Gestelle zweckmäßigerweise Laufachsen vorgesetzt (Abb. 429).

Die drei Achsen eines Gestelles sind fest im Rahmen gelagert, die mittlere erhält im Bedarfsfalle schmälere Spurkränze.

Da die Gestelle zur Übertragung der Zugkraft kurzgekuppelt sind, sind die Drehzapfen vollständig entlastet; ebenso der Rahmen, der das Obergestell trägt.

Um einen möglichst leichten Oberrahmen zu erhalten, wird man Drehzapfen so nahe als möglich gegen die Maschinenmitte legen und als schwerstes Stück den Transformator hier anordnen, damit jeder Stützpunkt gleich belastet wird.

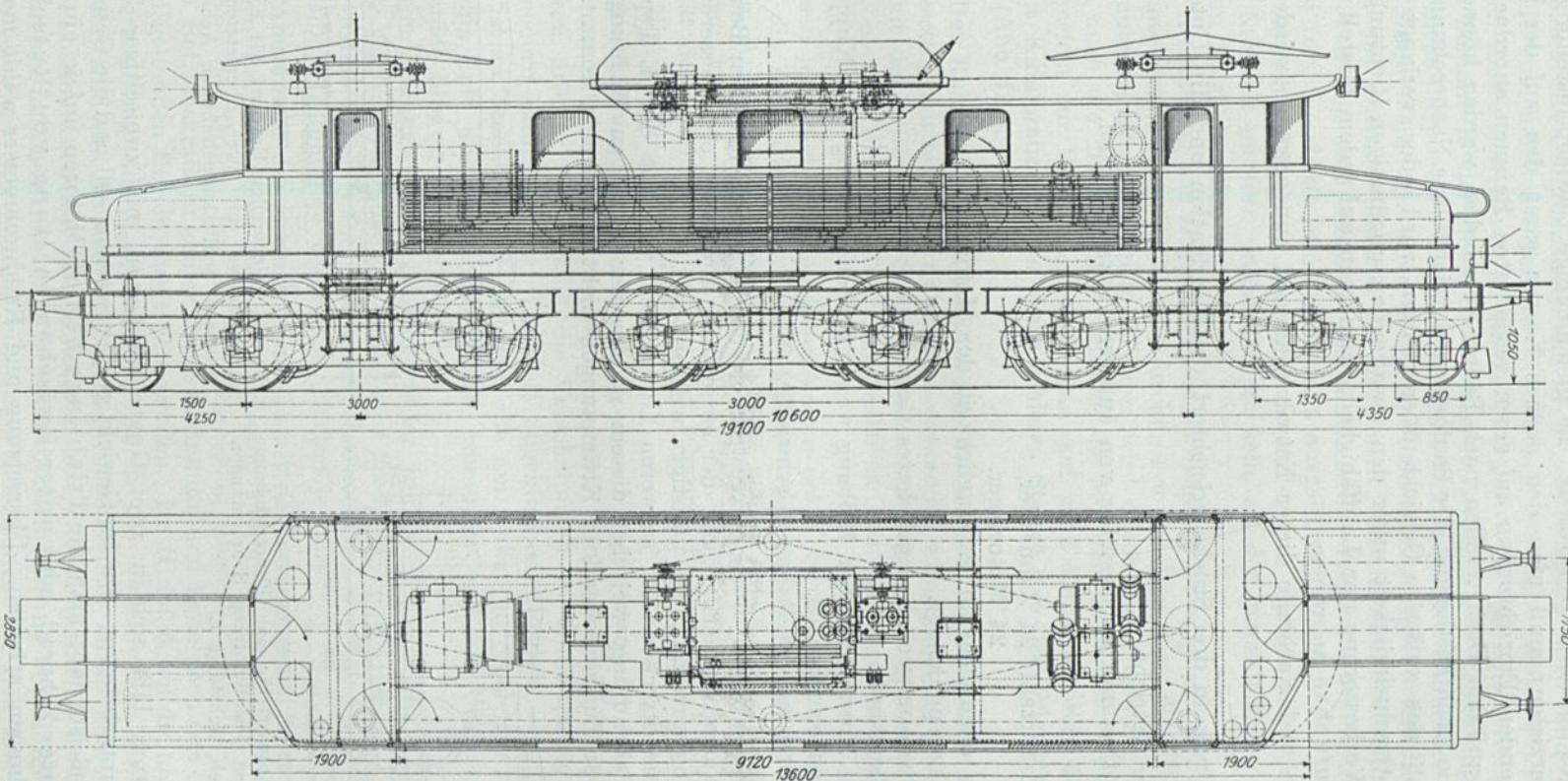


Abb. 429. Entwurf einer 1—2 A + 2 A + 2 A — 1 Güterzuglokomotive (B.B.C.).

Gelingt es auf diese Weise nicht, die gleichmäßige Gewichtsausteilung auf alle Achsen zu erzielen, muß man den ganzen Kasten samt den auf der Plattform unterzubringenden Einrichtungen auf einen gesonderten Rahmen anordnen, dessen Stützpunkte auf den Drehgestellen nach Bedarf verschoben werden können.

Führt die nach Festlegung der Bauformen durchgeführte Nachrechnung zu dem Ergebnis, daß das zulässige Gewicht überschritten wird oder verlangt die vorgeschriebene Geschwindigkeit unter den obwaltenden ungünstigen Richtungsverhältnissen eine Verbesserung der Lauffähigkeit, wird man auf jedem Gestell eine einstellbare Laufachse anordnen.

Die Vor- und Nachteile dieser Entwürfe können nun erwogen werden.

Vorteile:

Unterteilung in drei Stücke erleichtert die Fabrikation und die Unterhaltung im Betrieb.

Einfaches Getriebe.

Volle Entlastung des Gestelles von äußeren Getriebekräften.

Nachteile:

Große Motorzahl: 24 Zahnräder,
24 Motorlager.

Teilweise unzureichende Zugänglichkeit der Motoren.

Tiefe Schwerpunktlage.

Vergleichsweise großes ungefedertes Gewicht.

Große Radstände.

Schlechte Ausnützung der Reibung wegen Reihenschaltung oder Kupplung der Achsen erforderlich.

Querverbindung des Rahmens schwierig.

Der E-Entwurf mit drei Untergestellmotoren unterliegt derselben Beurteilung, wobei die Baustoffwirtschaft dank der geringeren Motorzahl eine bessere ist und auch die Reibungsverhältnisse günstiger werden.

Für ebene Strecken mit schweren Güterzügen verdient der E-Typ um so eingehende Behandlung, weil bei diesem zufolge der günstigen Richtungsverhältnisse der große Zugwiderstand in Krümmungen nicht in Betracht kommt.

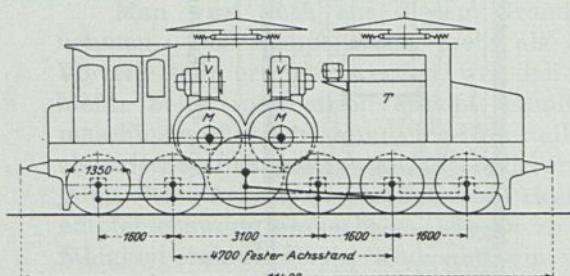


Abb. 430. Genereller Entwurf für eine Güterzuglokomotive mit zwei übersetzten Gestellmotoren, Schrägstangenantrieb, Achsfolge E.

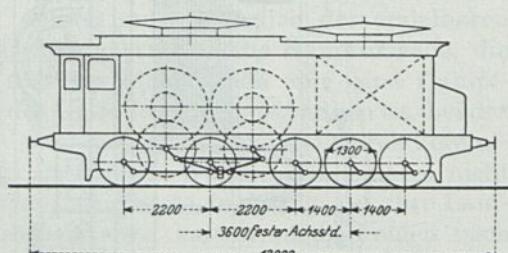


Abb. 431. Genereller Entwurf für eine Güterzuglokomotive mit zwei übersetzten Gestellmotoren, Schlitzkuppelrahmen, Achsfolge E.

Die Leistung läßt sich in zwei Gestellmotoren mit zweiseitiger Zahnradübersetzung unterbringen. Da im Gewicht gespart werden soll und die Geschwindigkeit nicht groß ist, läßt man die Trieblinge beider Motoren auf je ein gemeinsames gefedertes Zahnrad oder unter Zwischenschaltung von Rutsch- (oder Feder-)kupplungen arbeiten. Übersetzung und Raddurchmesser wählt man gegen-

seitig so, daß das Umgrenzungsprofil nicht überschritten wird und daß die Vorlegegewelle eine möglichst geringe Überhöhung bekommt (Abb. 430).

Gegen dieses Getriebe ist nichts einzuwenden, weil nur solche Achsen gekuppelt sind, die beinahe in derselben Ebene liegen, Stöße in der Triebstange sich in die Motoren nicht fortpflanzen können, weil die beiden großen Zahnräder gefedert sind.

Die Motoren sind gut oder wenigstens besser zugänglich als die Untergestellmotoren, das gesamte Gewicht ist abgefедert, die Lauffähigkeit für mäßige Geschwindigkeit gut, weil die erste und fünfte Achse verschiebar ist, die zweite und vierte ist fest, die dritte ohne Spurkranz ausgeführt.

Im Gewicht wird diese Maschine zweifellos am besten abschneiden; sie hat nur den Nachteil insofern unhandlich zu sein, als der ganze Rahmen samt Kasten aus einem Stück besteht.

Die Ausführung von Doppelmotoren ist nicht immer möglich. Vor allem müssen die Gehäuse vergleichsweise kleine Durchmesser erhalten, um die gewünschte Übersetzung unterbringen zu können. Weiters wird durch den engen Zusammenbau der Motoren auch die gleichmäßige Kühlung der Motoren gefährdet. Steht daher noch etwas Gewicht zur Verfügung, wird man auf zwei Einzelmotoren übergehen, die dann mit Kandorahmen oder einer schießen Stange mit der Triebachse verbunden werden (Abb. 431).

7. Der Rahmen. Für alle Entwürfe mit Gestellmotoren wurde stillschweigend vorausgesetzt, daß ein Innenrahmen verwendet würde, der sich ohne Schwierigkeiten mit der genügenden Steifheit bauen läßt und das Laufwerk insofern vereinfacht, als die Kuppelzapfen unmittelbar in die Radscheiben eingesetzt werden können.

Lassen jedoch die axialen Dimensionen der Motoren eine Unterbringung innerhalb — die Zahnräder jedoch außerhalb — der Rahmenbleche nicht zu, so wird man zum Außenrahmen greifen. Auf die Achsen müssen dann besondere Kurbeln aufgezogen werden, die insofern von Vorteil sind, als sie zur Vergrößerung der Elastizität des Getriebes beitragen. Bei schweren Schmalspurlokomotiven ist diese Bauart die meist gebräuchliche.

8. Die Kühlung. Die modernen Motoren sind meistens für künstliche Kühlung eingerichtet; es wird vorausgesetzt, daß ständig kalte Luft zugeführt wird. Es ist von größter Wichtigkeit, die Verschalungen so einzurichten, daß sich die Luft erneuern kann und die Warmluft ungehindert entweicht.

Es ist zu beachten, daß Motoren, die am Anker ein Schleuderrad angeordnet haben, die Luft an bestimmten Stellen einsaugen und am Umfang meist durch Statorkanäle hinausschleudern.

Besonders angeordnete Schleuderräder treiben dagegen die Frischluft in die Maschine, aus der sie dann an geeigneter Stelle entweicht.

Es handelt sich dabei um große Luftmengen; der 450 PS-Motor der Ch.-M. St. P.-Bahn. Lokomotive verbraucht 72 cbm je Min.

9. Anordnung der Bremse. Die Bauart der mechanischen Bremse hat in den bisherigen Betrachtungen keine Erwähnung gefunden; tatsächlich wird diese — wenn von der Druck- bzw. Sauglufterzeugung abgesehen wird — von der elektrischen Betriebskraft in keiner Weise beeinflußt und kann nach den für Dampflokomotiven geltenden Regeln ausgeführt werden. Im Hinblick auf die nicht unbeträchtliche Vermehrung der Massenwirkung durch die umlaufenden Ankerkörper und Zahnräder, sind die Bremsprozente entsprechend höher anzusetzen.

Bei Lokomotiven mit Gestellmotoren und Vielachsenantrieb ist die im Dampflokombau übliche einseitige Bremsklotzanordnung unbedingt zu vermeiden, weil der einseitige Bremsdruck einseitige Abnutzungen in den Lagern und Scher-

backen bewirkt und dadurch die erwünschte Übereinstimmung der Kuppelstangenlängen mit den Achsständen stört. Aus diesen Gründen sollen alle Triebachsen in gleicher Weise und je durch zwei Klötze, die durch Ausgleichsgestänge zu verbinden sind, gebremst werden.

10. Baulängen ausgeführter Lokomotiven. Zur Bewertung der eigenen Entwürfe ist es von Interesse zu wissen, welches Raumerfordernis ausgeführte Maschinen aufweisen. Da die Breite und Höhe in allen Fällen fast genau übereinstimmt, gibt die Länge ein Maß für das Volum.

Aus der Sammlung der Angaben ausgeführter Lokomotiven ist zu entnehmen, daß Maschinen mit Gestellmotoren eine bessere Raumwirtschaft erzielen, als solche mit Untergestellmotoren. Die Ausnutzung der Länge verbessert sich mit der Leistung. Die spezifischen Werte schwanken von etwa 60 PS/m bei 600 PS bis zum Höchstwert von 208 PS/m bei 3000 PS.

11. Angaben von ausgeführten Lokomotiven.

Bedeutung der in den Tabellen benutzten Kürzungen.

A.E.G.	= Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin.	M.A.G.	= Maschinenfabrik der Ungarischen Staats- bahnen, Budapest.
A.E.G.U.	= A.E.G.-Union El.Ges., Wien.	M.F.E.	= Maschinenfabrik Eßlingen.
A.L.W.	= American Locomotive Works, Pittsburgh.	M.F.O.	= Maschinenfabrik Oerlikon.
A.S.E.A.	= Allmänna Svenska Elektriska Aktie- bolaget, Västerås.	M.S.W.	= Maffei-Schwarzkopff-Werke, Berlin.
B.B.C.	= Brown, Boveri & Co., Baden, Schweiz.	O.S.S.W.	= Oest. Siemens-Schuckert-Werke, Wien.
B.B.C.M.	= Brown, Boveri & Co., Mannheim.	O.B.B.W.	= Oest. Brown, Boveri-Werke, Wien.
B.E.W.	= Bergmann El.-Werke, Berlin.	Sar.	= Lokomotivfabrik, Saronno.
B.L.W.	= Baldwin Locomotive Works, Schenectady.	Sécheron.	= S. A. des Ateliers de Sécheron, Genève.
Ganz.	= Ganz & Co., Maschinenfabrik A.-G., Budapest.	S.L.F.W.	= Schweizerische Lokomotivfabrik, Winterthur.
G.E.C.	= General Electric Co., Schenectady.	S.S.W.	= Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.
G.W.F.	= Grazer Waggon- und Maschinenfabriks- A.-G., Graz.	St.E.G.	= Lokomotivfabrik der Staatseisenbahn- gesellschaft, Wien.
Hanomag.	= Hannoveranische Maschinenfabrik A.-G., Hannover.	T.H.	= Thomson-Houston, Comp. d'Electricité, Paris.
K.M.F.	= Karlsruher Maschinenfabrik, Karlsruhe.	West.	= Westinghouse Electric & Manufacturing Co., Pittsburgh, Havre, Vado.
L.F.K.C.	= Lokomotivfabrik Kraus & Co., München, Linz.	W.L.F.	= Wiener Lokomotivfabrik Floridsdorf, Wien.
L.H.W.	= Linke-Hoffmann-Werke, Breslau.		

Am	= Achsmotor.
Ar	= Außenrahmen.
Bw	= Blindwelle.
D	= Drehstrom.
Déri	= Repulsionsmotor mit Bürstenverschiebung.
Ds	= Doppeltgespeister Reihenschlußmotor.
G	= Gleichstrom.
Gm	= Gestellmotor.
Gdm	= Gestelldoppelmotor.
H	= Überhöhung der Blindwelle über den Kuppelachsen.
Hw	= Hohlwelle.

J	= Induktionsmotor.
Kk	= Künstliche Kühlung.
R	= Reihenschlußmotor.
Rep.	= Repulsionsmotor.
Ugdm	= Untergestell-Doppelmotor.
Ugm	= Untergestellmotor.
Ü	= Übersetzung.
W	= Wechselstrom.
WE	= Winter-Eichberg-Motor.
Wp	= Wendepole.
2Z	= zweiseitiges Vorgelege.

Abbildung	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11		12		13		14		15		16		17		18		19	
									Bahnanlage	Jahr der Lieferung	Reihe, Bezeichnung	Achsenfolge	Dienstgewicht t	Reibungsgewicht t	Achsdruck t	Gewicht für den mech. Teil	Leistung PS	Zugkraft am Radumfang kg	Geschwindigkeit km/h									
	Erbauer für d. elektr. Ausführung	d. mech. Teil	Stückzahl						die elektr. Ausrüstung	Regel-Dauer-	Regel-Dauer-	Regel-Dauer-	Regel-Dauer-	Regel-Dauer-	Regel-Dauer-	Höchst-Höchst-												
432	Baltimore & Ohio Rrd. G.E.C. B.L.W.	1895	3	LE 1	2A + 2A	86,5	86,5	21,4	52,8	33,7	1080	—	10200	—	—	28,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
433	Baltimore & Ohio Rrd. G.E.C. B.L.W.	1903—1906	5	LE 2	4 A	72,5	72,5	18,1	40,0	32,5	800	—	16350	—	—	13,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
434	Baltimore & Ohio Rrd. G.E.C. B.L.W.	1910	2	DE 1	2 A + 2 A	84,0	84,0	21,0	54,0	30,0	1100	660	11800	5900	—	26,7	30,2	82,0	—	—	—	—	—	—	—	—		
435	Boston & Maine R.R. Hoosac-Tunnel West. A.L.W.	1911	5	S-5000	1—2A+ +2A-1	118,0	91,0	22,8	64,4	53,6	1500	1405	10450	9320	31000	32,2	40,8	48,3	—	—	—	—	—	—	—	—		
436	Butte, Anaconda & Pac. Ry. G.E.C. A.L.W.	1913	20	S. 46	2 A + 2 A	72,6	72,6	18,2	45,4	27,2	1280	1090	13600	11340	21800	24,8	26,0	80,0	—	—	—	—	—	—	—	—		
436	Canadian-Northern G.E.C. A.L.W.	1909	6	600	2 A + 2 A	78,0	78,0	19,5	50,4	27,6	1280	984	9080	6580	—	34,5	40,4	80,0	—	—	—	—	—	—	—	—		
437	Great-Northern Cascade-Tunnel G.E.C. A.L.W.	1909	4	5000	2 A + 2 A	104,5	104,5	26,1	57,5	47,0	1500	1400	16900	15800	31700	24,5	24,0	48,5	—	—	—	—	—	—	—	—		
438	Chicago, Milw. & St. Paul Ry. G.E.C. A.L.W.	1914	30	G.Z. P.Z.	2—4× ×2 A—2	260,5	204,0	25,5	151,3	109,2	3616	3168	38600	32200	60200	24,5	25,2	56,0	—	—	—	—	—	—	—	—		
439	Chicago, Milw. & St. Paul Ry. G.E.C. A.L.W.	1916	2	V.L.	2 A + 2 A	63,6	63,6	15,9	38,5	25,1	600	484	8330	6150	19100	19,3	21,2	—	—	—	—	—	—	—	—			
440	Chicago, Milw. & St. Paul Ry. G.E.C. A.L.W.	1918	—	10251	1—2A+ +4A+4A+ +2A-1	240,0	208,0	17,3	134,0	106,0	3240	2760	21000	19000	41500	42,2	39,8	101,4	—	—	—	—	—	—	—	—		
230	Chicago, Milw. & St. Paul Ry. West B.L.W.	1918	10	—	2—3A—2+ +2—3A—2	241,0	150,0	25,0	107,0	110,0	4000	3200	—	22000	51000	—	33,8	96,0	—	—	—	—	—	—	—	—		
—	Grand-Trunk St. Clair-Tunnel West B.L.W.	1908	3	2655	3 A + 3 A	122,5	122,5	20,4	69,5	53,0	1500	1335	23800	16800	39000	17,4	21,5	48,5	—	—	—	—	—	—	—	—		
441	Michigan C.R. Detroit-Tunnel G.E.C. A.L.W.	1909	6	7500	2 A + 2 A	91,0	91,0	22,8	61,4	29,6	1100	660	15750	8000	25000	19,0	22,3	64,5	—	—	—	—	—	—	—	—		
442	New York-Central Hudson River Rrd. G.E.C. A.L.W.	1906	35	S—1	1—4 A—1	103,5	64,0	16,0	76,2	27,3	2200	800	9540	2270	—	62,0	95,0	129,0	—	—	—	—	—	—	—	—		
443	New York-Central Hudson River Rrd. G.E.C. A.L.W.	1909	12	S—3	2—4 A—2	111,0	67,4	16,9	83,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
444	New York-Central Hudson River Rrd. G.E.C. A.L.W.	1914	6	T 2—1157	4×2 A	120,5	120,5	15,0	80,5	40,0	2600	2000	9080	6360	—	79,0	85,0	136,5	—	—	—	—	—	—	—	—		
445	New York-Central Hudson River Rrd. G.E.C. A.L.W.	1913	10	T 1—3247	4×2 A	107,5	107,5	13,4	74,0	33,5	2320	1760	7810	5180	—	81,3	91,7	136,5	—	—	—	—	—	—	—	—		
—	New York, New Haven & Hartford Ry. West B.L.W.	1918	5	—	1—A+2A+ +A—2— +A+2A—A—1	164,0	111,0	18,5	85,0	75,0	2583	2055	9500	6500	21500	72,4	85,4	112,6	—	—	—	—	—	—	—	—		

Angaben von ausgeführten Lokomotiven.

20	21	Durchmesser mm	Länge über Puffer mm	Achsstand mm	Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Anzahl	Motoren Art Spannung	Gewicht kg je PS		Literatur	
										31	32	33	
										Regelleistung PS je Lokomotivjähre	Dauerleistung PS je Lokomotivjähre	Regelleistung PS je Lokomotivjähre	
1575	—	10324	2084	6966	G	650	—	4	R	Unmittelbar, gefederte Hw, Ar	80,0	—	105
1070	—	9038	2300	4443	G	650	—	4	R	Ugm, U = 1:4,26, Ar	90,6	—	85
1260	—	12050	2897	8550	G	650	—	4	WpR	Ugm, Kk, U = 1:3,25, Ar	76,4	127,0	91
1600	1067	14650	2135	11752	W	11000	25	4	R 300	Gm, gefederte Hw, U = 1:4,14, Ar	82,0	138,0	91
1168	—	11380	2640	7850	G	2400	—	4	WpR 1200	Ugm, Kk, Ar, U = 1:4,83 u. 1:3,2	57,7	66,6	112
1168	—	11400	2643	7900	G	2400	—	4	WpR 1200	Ugm, Kk, Ar, U = 1:3,2	61,0	79,3	112
1830	—	12750	3200	5540	D	6600	25	4	J 300	Ugm, Kk, Ar, U = 1:4,28	69,7	74,6	118
1590	1100	33800	3200	30200	G	3000	—	8	WpR 1500	Ugm, Kk, Ar, 2 Z, U = 1:4,56 u. 1:2,45	72,1	82,2	109
1016	—	12200	2440	8950	G	3000	—	4	WpR 1500	Ugm, Kk, Ar,	106,0	131,5	49
1118	914	23165	4242	—	G	3000	—	12	R 1000	Am, Kk, Ar	73,0	86,0	140
1725	914	21945	5080	—	G	3000	—	2×6	WpR 750	Gdm, Kk, Ar, 2 Z, U = 1:3,7, Hohlwelle gefedert	60,2	75,4	182
1575	—	16900	4880	—	W	3300	25	6	WR	Ugm, Kk, Ar, U = 1:5,22	81,6	96,0	89
1220	—	12050	2900	8400	G	600	—	4	WpR 600	Ugm, Kk, Ar, 2 Z, U = 1:4,37	82,6	136,0	91
1120	840	13119	3963	9144	G	650	—	4	R 600	Am, Ar	47,1	129,5	167
915	—	17350	2000	14									

Bauregeln für Triebfahrzeuge mit Reibungsbetrieb.

Abbildung	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Bahnanlage	Jahr der Lieferung	Stückzahl	Reihe, Bezeichnung	Achsenfolge	Dienstgewicht t	Reibungsgewicht t	Achsdurchdruck t	Gewicht für den mech. Teil	Leistung PS	Zugkraft am Radumfang kg	Geschwindigkeit km/h						
	Erbauer für d. elektr. Ausstattung								die elektr. Ausrüstung	Regel-Dauer.	Regel-Dauer.	Höchstdauer.	Regel-Dauer.	Höchstdauer.	Höchstdauer.	Regel-Dauer.	Höchstdauer.	
446	New York, New Haven & Hartford Ry. West. B.L.W.	1916	2	S 097—098	1—2A+2A—1	100,0	75,0	19,0	52,5	47,5	1700	1350	11000	7580	—	42,6	48,7	63,5
447	New York, New Haven & Hartford Ry. West. B.L.W.	1911—1912	17	S 0215—0200	2A+2A	72,0	72,0	18,0	36,2	35,8	752	572	10550	6720	—	19,7	23,0	40,2
448	New York, New Haven & Hartford Ry. West. B.L.W.	1910—1912	38	Colonial 073	1—2A+2A—1	105,4	80,0	20,0	50,6 56,2	54,8 52,3	1696	1104	8040	5540	—	58,4	53,8	87,0
449	New York, New Haven & Hartford Ry. West. B.L.W.	1910	1	070	1—B+B—1	122,5	87,2	21,8	64,2	58,3	1240	1045	7620	6430	—	51,5	44,0	98,0
450	New York, New Haven & Hartford Ry. West. B.L.W.	1910—1911	2	071—072	1—2A+2A—1	127,0 112,5	86,3 84,0	21,6 21,0	68,5 54,0	58,5	1260	1160	6000	5360	23000	59,5	58,3	88,0
451	New York, New Haven & Hartford Ry. West. B.L.W.	1907	41	0—41	1—2A+2A—1	99,0	76,0	19,0	47,6	51,4	1420	1125	4400	2920	—	87,6	104,0	140,0
452	Norfolk u. Western West. A.L.W.	1915	12	2500	1—B+B—1+1—B+B—1	245,0	203,5	25,5	150,5	94,5	3600 bis 3280	3000 bis 2600	39500 20000	30800 18200	—	22,5 45,0	22,5 45,0	57,5
—	Paulista West. A.L.W.	1921	2	R 214	1—2A+2A—1	127,7	92,3	23,7	—	—	2240	1800	8800	6486	23135	70,8	76,0	105,0
—	Paulista West. A.L.W.	1921	2	R 215	3A+3A	105,8	105,8	17,6	—	—	1680	1350	13335	9800	26535	35,5	37,6	65,0
—	Paulista G.E.C. B.L.W.	1920	4	R 200	2—2A+2A—2	110,0	72,7	18,2	70,0	38,0	1680	1600	7100	6700	21800	65,0	66,4	100 (85)
453	Paulista G.E.C. B.L.W.	1920	8	R 204	2A+2A	91,0	91,0	22,8	52,5	38,0	1680	1600	14000	13300	27200	33,5	34,0	56 (48)
454	Pennsylvania West. Pennsyl.	1917	—	—	1—C+C—1	244,0	201,0	33,5	—	—	4800	—	39550	—	64500	33,0	33,0	—
455	Pennsylvania West. Pennsyl.	1910	31	3977	2—B+B—2	142,0 150,0	93,0 94,5	23,3 23,6	87,7	64,3	2500 4000 $\frac{1}{3}$ h	1860	9720	5900	36000	48,0	69,5	128,5
—	Piedmont & Northern G.E.C. B.L.W.	1914	—	5102	2A+2A	57,5	57,5	14,4	40,5	17,0	1000	700	7950	5100	13600	33,8	—	—
—	Spokane & Inland Ry. West. A.L.W.	1906	6	A 1	2A+2A	44,5	44,5	11,1	—	—	600	—	—	—	—	—	—	48,0
456	Albtalbahn A.E.G. —	1915	4	—	2A+2A	31,5	31,5	8,0	—	—	320	180	3900	—	6000	22,0	—	—
457	Badische Staatsbahn (Wiesenthal) S.S.W. M.S.W.	1912	12	—	1—C—1	68,6	42,0	14,0	36,6	32,0	1050	780	4600	3000	10500	62,0	79,0	90,0

Angaben von ausgeführten Lokomotiven.

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Durchmesser mm	Triebrad-Laufrad	Länge über Puffer mm	Achsstand mm	Fester	Gesamter	Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Motoren Anzahl	Antrieb	Regel-Leistung je PS	Dauerleistung je PS	Rezelleistung je m Lokomotivlänge	Literatur
1600	915	15250	2440	12350	W	11000	25	4<2	R 300	Gdm, Kk, Ar, U = 1 : 5,72 Hw	58,8	74,0	89	Proc. Bd. 36. Nr. 8.
1600	—	11800	2135	7150	W	11000	25	4	R 300	Gm, Kk, Ar, Hw, U = 1 : 5,95	95,7	135,5	64	Heilmund, E.K.B. 1918. H. 26. — E.R.J. 1912. Bd. 39. Nr. 7 u. 1914 Bd. 43. Nr. 21.
1600	915	14250 15250	3360	11900 12950	W G	11000 650	25	4<2	R 300	Gdm, Kk, Ar, U = 1 : 4,18	62,1	94,5	119 111	E.R.J. 1912. Bd. 39. Nr. 7. — E.N. 1912. Bd. 76. Nr. 11. — B.J.E.K.V. 1913.
1450	915	15900	2440	13250	W G	11000 650	25	2	R	Gm, Bw, Kk, schiefe Treibstange	100,0	117,0	78	E.R.J. 1910. Bd. 35. Nr. 19. — E.K.B. 1910. H. 20. — E.K.B. 1918. H. 26.
1600	1075	14600	2135	11750	W G	11000 650	25	4	R 300	Gm, Kk, Ar, 2 Z, gefederte Hw, U = 1 : 2,33	100,0 89,0	110,0 97,0	86	E.R.J. 1909. Bd. 34. Nr. 13 u. 1910. Bd. 35. Nr. 19. — E.K.B. 1910. H. 20. — Murray. Proc. 1911. Z.V.D.I. 1910. Bd. 54. Nr. 18. — E.R.J. 1909. Bd. 35. Nr. 19. u. Bd. 34. Nr. 18.
1575	840	11500	2032	9390	W G	11000 650	25	4	R 450	Am, gefederte Hw, Kk, Ar	70,0	88,0	123	E.R.J. 1907. Bd. 30. Nr. 7. — 1908. Dez. Sch.E.T.Z. 1907. H. 13. — Z.V.D.I. 1908. S. 821. — E.T.Z. 1907. H. 16. — E.K.B. 1908. Nr. 5. — G.A. 1909 Nr. 770.
1575	762	32300	3360	28900	W D	11000	25	8	J	Gdm, Kk, 2 Z, U = 1 : 4,73, Kupplst.	74,7	94,2	111	E.R.J. 1915. Bd. 45. Nr. 23. — E. u. M. 1913. H. 47. — Wynne. Proc. 1916. Nr. 2. — Seefehlner, E.K.B. 1915. H. 31 u. 1916 H. 13. — Hershey, E.R.J. 1916. Bd. 47. Nr. 10.
1600	915	16130	2540	12550	G	3000	—	4	R 1500	Gdm, Kk	57,0	71,0	123	E.R.J. 1921. Bd. 57. Nr. 24 u. 1920. Bd. 55. Nr. 24 u. Nr. 17. — E.R.J. 1919. Bd. 53. Nr. 24. — Ref. E.T.Z. 1921. H. 36.
1040	—	15300	4270	11300	G	3000	—	6	R 1500	Ugm, Z	63,0	78,5	110	E.R.J. 1921. Bd. 57. Nr. 24 u. 1920. Bd. 55. Nr. 24. — Ref. E.T.Z. 1921. H. 36.
1070	915	16800	2370	14000	G	3000	—	4	R 1500	Wp, Ugm, 2 Z, U = 1 : 2,33	65,5	69,0	100	E.R.J. 1921. Bd. 57. Nr. 24. — G.E.R. 1921. Nr. 1 u. Nr. 7. — Ref. ETZ 1921. H. 36.
1070	—	11950	2645	8160	G	3000	—	4	R 1500	Wp, Ugm, 2 Z, U = 1 : 4,56	54,0	57,0	142	G.E.R. 1921. Nr. 1 u. Nr. 7. — E.R.J. 1921. Bd. 57. Nr. 24 u. 1920. Bd. 55 Nr. 17.
1830	915	23320	4060	19480	W D	11000	25	4	J	Gdm, Kk, 2 Z, U = 1 : 5, Kupplst.	—	50,8	—	E.T.Z. 1918. Nr. 48. — E. u. M. 1918. H. 10. — G.C. 1917. Nr. 11. — E.R.J. Juni 1917. — Sc.A. Aug. 1917. — G.A. 1919. Nr. 998. — E. März. 1918. — Eng. Sept. 1917. — E. Febr. 1918. — E.R.J. Dez. 1917. Sch.B.Z. 1918. Bd. 71. Nr. 12.
1730 1830	1300	19780	2186	17060	G	600	—	2	Wp R 600	Gm, Kk, Bw, schräge Treibstange	57,0	76,4	127	E.R.J. 1909. Bd. 34. Nr. 18 und 1911. Bd. 37. Nr. 9. — E.T.Z. 1913. H. 42. — E.R.J. 1913. H. 15. — E.R.J. 1911. Bd. 37. Nr. 9. — E.T.Z. 1909. H. 52.
—	—	11400	2186	8140	G	1500	—	4	Wp R 750	Ugm, Kk	57,5	80,5	114	E.R.J. 1914. Bd. 43. Nr. 11.
968	—	8850	—	—	W G	6600 700	25	4	R	Ugm	74,0	—	68	E.R.J. 1909. Bd. 34. Nr. 14.
950	—	—	—	—	W	8000	25	4	W E 650	Ugm, U = 1 : 6,1	100,0	—	—	E.K.B. 1915. H. 16.
1050	850	12360	4000	9000	W	15000	15	2	R 300	Gm				

Abbildung	1		2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Bahnanlage	Erbauer für d.elektr. Aus- rüstung	d. mech. Teil	Jahr der Lief- rung																	
459	Badische Staatsbahn (Wiesenthal) B.B.C.M K.M.F.	1913	2	A ³ — 1				70,0	43,4	14,0	34,0	31,0	800	—	4300	—	9500	50,0	—	70,0	
460	Bayerische Staatsbahn (Garmisch) M.S.W.	1913	5	EP 29 — 002	1 — C — 1			69,0	42,0	14,0	—	—	1000	—	9000	—	—	30,0	—	50,0	
461	Bayerische Staatsbahn (Garmisch) B.B.C. L.F.K.	1920	2	EG 20221	B + B	61,0	61,0	15,3	34,8	26,2	900	700	7700	6000	8000	30,0	30,0	50,0			
462	Bayerische Staatsbahnen B.E.W. L.F.K.	1916	5	E G 4 Nr. 20201 bis 5	2 A + 2 A	56,0	56,0	14,0	32,0	24,0	880	580	7800	4100	9300	28,6	36,0	50,0			
	Bayerische Staatsbahnen S.S.W. L.F.K.	1914	5	EP $\frac{3}{6}$ Nr. 20101 bis 5	1 — C — 2	82,5	42,8	14,3	48,6	30,3	905	650	6200	3300	9400	39,5	53,0	80,0			
463	Bayerische Staatsbahnen M.S.W. L.F.K.	1916	5	EP $\frac{3}{6}$		94,0	48,0	16,0	53,6	36,8	1300	1000	7000	3300	10000	50,0	80,0	80,0			
	Murnau-Oberammergau S.S.W. L.F.K.	1905	1	—	2 A	20,0	20,0	10,0	10,0	10,0	200	—	3000	—	—	18,0	—	—			
	Preuß. Staatsbahnen S.S.W. Hanomag.	1911	1	ES 1		73,6	32,8	16,6	46,5	27,1	1030	840	3630	1875	8000	75,0	120				
464	Preuß. Staatsbahnen A.E.G. Hanomag.	1911	1	ES 2	2 — B — 1	71,5	32,0	16,0	44,8	26,7	1200	600	4100	2150	9500	79,0	—	130			
271	Preuß. Staatsbahnen B.E.W. Hanomag.	1912	1	ES 3		72,0	32,0	16,0	45,5	26,5	1500	1100	4450	3500	16500	80,0	85,0				
465	Preuß. Staatsbahnen S.S.W. Borsig	1912	1	ES 6		81,3	50,0	16,7	40,3	41,0	2000	1200	6500	3800	11500	79,0	—				
	Preuß. Staatsbahnen S.S.W. M.S.W.	1912	1	ES 5	1 — C — 1	84,9	51,6	17,2	43,9	41,0	1800	1500	5400	—	10000	85,0	—				
466	Preuß. Staatsbahnen M.S.W.	1912	11	ES $\frac{9}{19}$		84,0	51,0	17,0	46,0	38,0	1800	1250	10000	—	12500	45,0	—	110			
	Preuß. Staatsbahnen A.E.G. L.F.K.	—	1	ES 4	1 — D — 1	96,0	68,0	17,0	—	—	1200	800	4000	—	10500	75,0	—				
	Preuß. Staatsbahnen M.S.W.	—	7	EP $\frac{202}{208}$	1 — C — 1	83,0	51,0	17,0	46,3	36,7	1765	1200	10600	—	16000	45,0	—				
467	Preuß. Staatsbahnen S.S.W. M.S.W.	—	1	EP 201	1 — D — 1	90,0	68,0	17,0	—	—	2600	1550	8200	5250	18000	70,0	83,0				
468	Preuß. Staatsbahnen B.E.W. L.H.W.	1918	1	EP 235	2 — D — 1	108,0	66,0	16,5	55,0	44,8	3000	2250	14750	9375	20000	56,5	65,0	90,0			
469	Preuß. Staatsbahnen B.E.W. L.H.W.	—	13	EP $\frac{209}{12}$	2 — B + B — 1	115,0	70,0	17,5	65,0	50,0	2400	—	11000	—	18000	55,0	—	34			

20	21	22		23		24		25	26	27		28		29		30	31		32		33	34	
		Durch- messer mm	Achsenstand mm	Fester	Gesamter	Stromart	Betriebs- spannung V			Periodenzahl	Anzahl	Art Spannung	Antrieb	Regel- leistung	Dauer- leistung	Gewicht kg je PS	Regelleistung PS jem Lokomotivlänge	Literatur					
		Triebrad- Laufrad-	Länge über Puffer mm																				
1480	990	11960	3600	8100						2	Rep. 1200	Gm, zwei Stangen ohne Blindwelle	81,0	—	75	Sch.B.Z. 1910. Nr. 10. — B.B.C. Mannheim. 1919. Nr. 1.							
1050	850	12250	4000	9000						1	R zweikollektoren	Gm, Schrägstange, Bw	64,0	—	82								
1250	—	12450	2740	9200						2	R 415	Gm, Ü = 1:3,5, Schlitz, Kuppelstange, H 110	68,0	87,3	73	B.B.C. M., 1920. H. 2.							
1100	—	10990	2500	7000	W	15000	16 $\frac{2}{3}$			4	R, Kk Ü	Ugm, Z	63,7	103,0	80								
1100	850	12300	—	9400						1	R, Kk	Gm, Bw	91,0	127,0	74								
1150	850	13400	2600	9750						1	R	Gm, Bw	72,0	94,0	97								
1000	—	7350	3500	3500	W	5000	16 $\frac{2}{3}$			2	R 280	Ugm. Ü = 1:5,3	100,0	68,5	27	Einhart. E.K.B. 1905. H. 20. — E.K.B. 1909. H. 28.							
											R 460		71,5	88,0	83	Heyden, E.K.B. 1910. H. 15. — Kleinow, E.K.B. 1912. H. 22. — Wachsmuth, G.A. 1916. Nr. 947.							
1600	1000	12500	3000	9000						1	Ds 570	Gm, senkrechte Stange, Bw	60,2	120,0	96	G.A. 1916. Nr. 948.							
											R		48,0	65,5	120	E.K.B. 1912. H. 13. — G.A. 1916. Nr. 948.							
1250	1000	12950	3900	8700						1	R 525	Gm, Schrägstange, Bw, Kk	40,7	70,0	154	Organ. 1916. — Z.V.D.I. 1915. Bd. 59. Nr. 28.							
1600	1000	13100	—	—						1	R 525	Gm, Schrägstange, Bw, Kk	47,2	56,6	137	G.A. 1916. Nr. 947.							
1350	1000	12405	3900	8130	W	15000	16 $\frac{2}{3}$			1	R, 2K 640	Gm, Schrägstange, Bw, Kk	46,7	67,0	145	Organ. 1916. — Z.V.D.I. 1915. — Kleinow, E.K.B. 1919. H. 26. — Wachsmuth, G.A. 1917. Nr. 950.							
										2	—	Gm, zwei Schrägstangen, Bw	80,0	120,0	87								
1250	1000	12930	—	—						1	R 640	Gm, Schrägstange, Bw, Kk	47,0	69,2	136	Zehme, E.T.Z. 1919. H. 31. — Döry, Sammlung Vieweg, 1919.							
1050	850	14400	2600	10600						2	R 315	Gm, zwei Schrägstangen, Bw, Kk	36,0	59,4	180	Kleinow, E.K.B. 1912. H. 23. — G.A. 1916. Nr. 947. — Reichel, E.K.B. 1913. H. 6.							
1250	1000	14400	2250	11250						1	R 350	Gm, Dreieckrahmen, zwei Blindwellen, Kk	33,3	44,5	204	Müller, E.K.B. 1918. H. 16. — Ref. E. u. M. 1918. H. 47. — Organ. 1916. — G.A. 1916. Nr. 948. — Anger, Z.V.D.I. 1915. Bd. 59. Nr. 28. — Stengel, E.K.B. 1920							

Abbildung																																						
	Bahnanlage		Jahr der Lieferung		Reihe, Bezeichnung		Achsenfolge		Dienstgewicht		Reibungsgewicht		Achsdruck		Gewicht für den mech. Teil		Leistung PS		Zugkraft am Radumfang kg		Geschwindigkeit km/h		Durchmesser mm		Länge über Puffer mm		Achsstand mm		Motoren		Antrieb		Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je m Lokomotivlängen		Literatur	
	d. elektr. Ausstattung	d. mech. Teile							t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	Festiger	Gesamter	Anzahl	Art Spannung	Regel-leistung	Dauer-leistung	Regelleistung PS	je m Lokomotivlängen								
470	Preuß. Staatsbahnen B.E.W. L.H.W.	—	11	EP 213 — 234	D	1—D—1	101,0	70,0	16,2	54,2 8,2	38,6	3000	—	14000	—	20000	55,0	—	90	1250	1000	13160	3950	10000		1	R 350	Gm, Dreieckstange, zwei Bw Kk	33,0	—	225	Loewentraut. E.K.B. 1921. H. 17 * Heizkessel						
	Preuß. Staatsbahnen A.E.G. Hanomag.	1912	2	EG 502 — 503			66,0	66,0	16,5	36,0 35,2	30,0 29,5	800 800	600 600	6500 5400	—	10000	37,5	—	70	1050	—	10500	3500	4800		1	R WE		82,5	100,0	76	Eng. 1912.						
	Preuß. Staatsbahnen B.B.C. Hanomag.	—	1	E.G. 504			62,0	62,0	15,5	35,5	26,5	600	500	5400	—	12000	30,0	—	60	1050	—	10500	3500	4800		1	Déri					Wachsmuth, G.A. 1916. Nr. 948.						
	Preuß. Staatsbahnen S.S.W. Hanomag.	—	1	E.G. 505			65,6	65,6	16,4	34,1	26,5	800	475	5000	3000	—	40,0	60,0	60	1050	—	10500	3500	4800		1	R 315	Gm, Schrägstange, Bw	82,0	138,0	76	Kleinow, E.K.B. 1912. H. 23. — E.K.B. 1910. H. 15.						
	Preuß. Staatsbahnen M.S.W.	—	3	E.G. 506—8			63,2	63,2	15,8	35,2	28,0	800	500	6500	—	12000	30,0	—	60	1050	—	10500	3650	4950	15000	16 ² / ₃	1	R 500		79,0	126,0	76	E.T.Z. 1911. H. Nov. — Richter, E.T.Z. 1913. H. 32. — G.A. 1916. Nr. 947. — E.K.B. 1912. H. 6.					
	Preuß. Staatsbahnen A.E.G. L.F.K.	1910	1	E.G. 509—10		1—B+ + B—1	94,4	71,9	17,9	44,6	49,8	1600	1200	8000	—	13500	40,0	—	75	1270	850	15750	—	12450		2	WE 1235		58,8	78,5	101	E.K.B. 1910. H. 15. — G.C. 1911. Bd. 58. Nr. 17. — E.T.Z. 1910. H. 21. — G.A. 1916. Nr. 949.						
471	Preuß. Staatsbahnen A.E.G.	1914—1921	27	E.G. 511—37	B+B	65,0	65,0	14,3	30,5	34,5	1200	1000	8800	7300	16000	34,0	34,0	50	1350	—	11200	2900	7900		2	R 510	Gm, Ü = 1:4,45, Kk, Schlitzkuppelstange	54,1	81,2	107	A.E.G.-Mitteil. 1918. H. 1. — u. 1920. H. 3. — Wachsmuth, G.A. 1916. Nr. 949.							
472	Preuß. Staatsbahnen S.S.W. L.H.W.	1915—1921	13	E.G. 538—50	B+B+B	103,0	103,0	17,1	58,2	44,8	—	1170	—	10500	20000	—	30,0	50	1350	—	17210	2900	13600		3	R	Gm, 2 Z. Ü = 1:5,19, Kuppelstange, Ar.	—	88,0	—	Z.V.D.E.V. 1913. — Wachsmuth, G.A. 1916. Nr. 949. — Winkler, E.K.B. 1919. H. 20. — Stengel, 1920. H. 27. — G.A. 1921. Nr. 1050.							
473	Preuß. Staatsbahnen B.B.C.	1920—1921	10	E.G. 551—52	C+C	96,0	96,0	16,0	54,0	42,0	1400	1240	—	10500	16500	—	32,3	50	1250	—	15934	4300	11430		4	R	Gdm, 2 Z. Ü = 1:4,89, Kuppelstange, Ar.	68,5	77,5	88	Z.V.D.E.V. 1913. — Wachsmuth, G.A. 1917. Nr. 950. — B.B.C.M.M., 1920. H. 1. B.B.C.M. 1921. H. 5.							
475	Oranienburg A.E.G.	1908	1	—	2A+1—A	59,5	45,0	15,9	32,5	27,0	1050	900	9000	—	13000	31,5	—	60	1450	1450	14140	3300	9600	6000	25	3	WE	Ü, Kk, Ugm	—	—	—	Wechmann, E.T.Z. 1908. H. 17.						
476	Französische Südbahn B.B.C. C.E.M.	1911	1	E 3301	1—C—1	84,0	53,0	13,3	—	—	1500	—	5950	—	8500	50,0	—	—	1600	850	13140	—	9200		16 ² / ₃	2	Déri 1250	Gm, Zwei-stangenantr. ohne Bw	56,0	—	114	Jullian, R.G.C.F. 1911. März.						
477	Französische Südbahn At. Jeumont	1912	1	E 3401	1—3A—1	86,0	54,0	18,0	—	—	1500	1200	9270	—	—	43,7	—	—	1400	1000	14270	3800	—		16 ² / ₃	3	R	Gm, gefederte Hw Ü = 1:2,72	57,4	71,6	105	Cauwenbergh E.T.Z. 1912. H. 42. — E.K.B. 1912. H. 27.						
—	Französische Südbahn T.H.	1911	1	E 3001	1—C—1	88,0	54,0	18,0	—	—	1500	1200	8140	5840	15000	50,0	56,0	78	1310	850	13740	3900	7600	12000	16 ² / ₃	2	Ds 360	Gm, zwei Schrägstangen, zwei Bw	58,6	73,3	109	G.C. 1912. Bd. 72. Nr. 9. — T.H. 1912. Nov. Nr. 7.						
478	Französische Südbahn West	1912	1	—	1—C—1	81,0	54,0	18,0	38,0	43,0	1500	1200	—	6900	15000	—	47,0	75	1200	850	11370	4000	—		16 ² / ₃	2	R 420	Gm, 2 Z. Ü = 1:1,62, Kandorahmen, Kk	54,0	67,5	132	Simej, L.E. 1912. Nr. 43. — G.C. 1912. Bd. 72. Nr. 9. — G.C. Dez. 1912. — E. u. M. 1913. Nr. 29. — B.J.E.K.V. 1912. — Bd. 7.						
—	Französische Südbahn	Entwurf	20	—	2A+2A	72,0	72,0	18,0	—	—	1400	1000	12600	—	—	30,0	50,0	65	1400	—	11850	2800	8350		1500	—	4	R 750	Ü, Kk, Ugm	51,5	72,0	118	T.M. 1920. Nr. 12.					
479	Paris-Orléans T.H.	1900	—	—	2A+2A	50,0	50,0	12,5	31,5	18,5	900	—	11350	—	—	21,2	—	—	1245	—	10600	2390	7050	G	600	—	4	R 600	Ugm	55,6	—	85	Pforr, G.A. 1901. Nr. 586. — G.E.B. Nr. 9125. — Z.I.E. 1901. Nr. 24.					
480	Paris-Orléans B.B.C. S.L.F.W.	1918—1919	5	C 21—25	1—D—1	83,8	66,0	16,5	45,5	38,3	1800	1200	7250	4050	17000	67,0	80,0	—	1500	860	12200	5150	8700		600	—	2	R 600	Gm, Zweistangen, Schlitzstange ohne Bw, Kk, Federkopplung	46,5	70,0	147						
481	Paris-Lyon Méditerranée Allioth —	1910	—	—	2—2A+ + 2A—2	136,0	72,0	18,0	64,0	72,0	1800	—	8000	—	—	60,0	—	70	1500	1000	20650	2400	16900	W G	12000	25	4	R	Ugm, Ü = 1:3	75,3	—	87	Sch.B.Z. 1910. Nov.					

Abbildung	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Bahnanlage	Jahr der Lieferung	Stückzahl	Reihe, Bezeichnung	Achsenfolge	Dienstgewicht t	Reibungsgewicht t	Achsdruck t	Gewicht für den mech. Teil	Leistung PS	Zugkraft am Radumfang kg	Regel-Dauer-Dauer-Höchstdauer	Regel-Dauer-Dauer-Höchstdauer	Regel-Dauer-Dauer-Höchstdauer	Geschwindigkeit km/h			
	Erbauer für d. elektr. Ausstattung																	
—	Italienische Staatsbahnen B.B.C. Sar.	1918	18	Gr. E. 331	2 — C — 2	91,9	49,5	16,5	50,0	41,9	2640	—	9500	—	12000	75,0	—	100
482	Italienische Staatsbahnen M.F.O. Sar.	1917	6	Gr. 332	2 — C — 2	92,0	54,0	18,0	49,3	42,7	2640	—	9500	—	12000	75,0	—	100
483	Italienische Staatsbahnen West. (Vado)	1915	16	Gr. 30	1 — C — 1	73,0	48,0	16,0	33,0	40,0	2780	—	9500	—	12000	75,0	—	100
484	Italienische Staatsbahnen West. (Vado)	1909	180	Gr. 50	E	60,2	60,2	12,0	30,2	30,0	2000	—	12300	—	13400	44,0	—	—
485	Italienische Staatsbahnen Ganz. M.A.G.	1906	4	Gr. 38	1 — C — 1	62,0	42,0	14,0	31,5	30,5	1500 850	—	6500 9200	—	9300	62,0 25,0	—	—
486	Italienische Staatsbahnen Ganz. M.A.G.	1903	3	Gr. 36	1 — C — 1	62,0	42,0	14,0	30,0	32,0	1200 1000	—	8700 5200	—	9300	31,0 32,0	—	—
487	Italienische Staatsbahnen Ganz. M.A.G.	1902	2	Gr. 34	2A + 2A	46,0	46,0	11,5	21,0	25,0	900	600	8400	5800	10000	29,0	28,0	—
488	Italienische Staatsbahnen B.B.C. Silvestri	1913	5	Gr. 32	1 — C — 1	71,5	45,0	15,0	45,0	26,5	2000	—	9000	—	9350	60,0	—	95
489	Usui-Toge A.E.G. M.F.E.	1913	—	Ge-mischt Z.u.Reib.	C/b	42,0	42,0	14,0	—	—	700	—	—	—	—	—	—	—
490	Nordmark A.E.G. (1076 mm Spurw.)	1920	—	—	1 — C — 1	40,5	25,3	8,4	22,7	17,8	435	320	4500	3300	5600	25,0	25,0	60
	Rjukanbahn A.E.G.	1912	3	R. B. 1	2A + 2A 2A	46,0	46,0	11,5	20,0	26,0	500	260	9300	—	—	14,5	—	45
	Rjukanbahn A.S.E.A. W.M.F.	1918	—	—	B + B	43,0	43,0	10,8	24,5	18,5	560	440	6400	3700	10500	22,0	30,0	—
	Norwegische Staatsbahnen B.B.C. Nord. Mask. Jud	1922	2	—	1 — B + B — 1	77,5	28,0	14,0	47,5	30,0	—	1000	—	7350	—	—	33,0	50
267	Mariazell Ö.S.S.W. L.F.K.	1910	11	Nr. 1 —	C + C	47,0	47,0	7,8	24,0	23,0	600	—	5000	—	8400	35,0	—	50
268	Wien-Preßburg A.E.G.U. W.L.F.	1914	3	14	76 cm Spurw.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
491	Mittenwald Wien-Preßburg A.E.G.U. W.L.F.	1912	9	S. 1060	1 — C	53,0	42,0	14,0	29,0	24,0	800	500	7500	—	11000	30,0	—	45
492	Wien-Preßburg A.E.G.U. G.W.F.	1914	8	E. P. 1—8	1 — B — 1	53,3	28,0	14,0	27,1	26,2	750	750	5200	3460	7000	39,0	58,5	75

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Durchmesser mm	Laufrad.	Länge über Puffer mm	Achsstand mm	Fester	Gesamter	Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Anzahl	Motore	Regelspannung	Antrieb	Regelleistung PS je PS jemLokomotivlängen	Literatur
1630	960	13 370	3600	10600	D	3 000	15	2	J 3000	Gm, zwei Schrägstangen, zwei Bw	35,0	—	198	Gubler, B.B.C.M. 1918. Nr. 5.
1630	960	13 370	3600	10600	D	3 000	15	2	J 3000	Gm, zwei Schrägstangen, zwei Bw	—	—	—	E.T.Z. 1920. H. 7. — Periodische Mitt. Oerlikon. 1919. Nr. 7.
1630	900	11 000	—	—	D	3 000	15	2	J 3000	Gm, Kandgrahmen	27,2	—	253	Verebely, E. u. M. 1919. H. 21. — Pontecorvo, E.R.J. 1915. Bd. 45. Nr. 6. — Z.O.J.A.V. 1915. Nr. 19. — Huldschiner, E.T.Z. 1921. H. 21.
1070	—	9 500	3840	6120	D	3 000	15	2	J 3000	Gm, Kandgrahmen	30,0	—	210	Verole, R.T. 1914. Nr. 6. — R.G.C.F. 1912. Nr. 2. — Kummer, Sch.B.Z. 1911. Bd. 58. Nr. 22. — Kand 6, Z.V.D.I. 1909. S. 1249. — Heyden, E.T.Z. 1910. H. 28. — E. u. M. 1909. H. 88. — Eng. Aug. 1918. — E.R.J. 1915. Bd. 45. Nr. 10.
1500	850	11 540	—	—	D	3 000	15	2	J 3000	—	41,5 73,0	—	130 74	E.K.B. 1907. H. 6.
1500	850	11 540	—	—	D	3 000	15	2	J 3000	—	51,7 62,0	—	104 86	Cserháti, Z.f.E. 1905. H. 15. — Sch.E.T.Z. 1905. H. 48. — Zehme, E.B.T.Z. 1905. Nr. 2 u. 18.
1396	—	10 306	—	—	D	3 000	15	2	J 3000	Am, Hw	51,0	—	87	Cserháti, E.T.Z. 1903. H. 8. — Z.f.E. 1903. — Verebely, E. u. M. 1919. H. 20.
1500	950	12 770	—	10000	G	650	—	2	R 650	Gm, zwei Schrägstangen, zwei Bw	36,0	—	157	Buchli, E.K.B. 1913. H. 12. — M.T., 1913.
1000	700	9 320	3500	6600	W	12 000 bis 16 000	25	1	R 500	Gm, Ü, Schrägstange	93,0	126,0	47,0	
1000	—	10 400	1600	6600	W	16 000	25	4	Ds 220	Ugm, Ü = 1:4,22	92,0	177,0	48,0	Marguerre, E.K.B. 1912. H. 39. A.E.G.Z. 1913. Nr. 2.
1000	—	9 050	2300	6400	W	6 600	25	4	R	Gm, Ü, Schlitzkuppelstange, H = 120	77,0	98,0	62,0	
1445	988	14 500	3050	11500	W	15 000	15	2	R	Gm, Ü = 1:5,24 Schlitzkuppelstange H.	—	77,5	—	B.B.C.M. 1921. Nr. 5.
800	—	11 020	2400	7900	W	6 000	25	2	R 220	Gm, Ü = 1:3, KK, Schlitzkuppelstange	78,0	—	53	D.S.V.B.Z. 1912. H. 1. — E.K.B. 1913. H. 17. — E.K.B. 1910. H. 15. — E.K.B. 1912. H. 15.
1034	870	10 300	4000	5900	W	15 000	15	1	WE 810	Gm, Schrägstange, Bw, Schlitzkuppelstange H = 0	66,5	106,0	78	Seefehlner-Popp, E. u. M. 1913. H. 18. — E.K.B. 1913. H. 6. — E.T.Z. 1912. H. 17.
1034	870	10 526	4000	5900	W	—	—	1	Ds 490	Gm, Schrägstange, Bw	71,0	71,0	71	Seefehlner, E.K.B. 1914. H. 32. — E. u. M. 1914. H. 45.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Abbildung	Bahnanlage	Jahr der Lieferung		Reihe, Bezeichnung	Achsenfolge	Dienstgewicht	Reibungsgewicht	Achsdurchdruck	Gewicht t für den mech. Teil	Leistung PS	Zugkraft am Radumfang kg			Geschwindigkeit km/h				
	Erbauer für d.elektr. Ausrüstung	d. mech. Teil	Stückzahl			t			t	die elektr. Ausführung	Regel-Dauer-t	Regel-Dauer-t	Höchst-Höchst-	Regel-Dauer-t	Höchst-Höchst-			
493	Öst.Bundesbahnen B.B.C. W.L.F.	1922	3	—	1-C+C-1	113,5	87,0	14,5	68,5	45,0	2500	1850	12500	10000	16500	54,0	50,0	65
494	Öst.Bundesbahnen A.E.G.U. Steg	1922	20	—	1-C-1	67,2	43,5	14,5	31,6	35,6	1120	800	6900	4800	14500	42,0	42,0	65
495	Öst.Bundesbahnen Ö.S.S.W. L.F.K.	1922	20	—	E	72,5	72,5	14,5	—	—	1300	960	11200	7300	14000	31,2	35,6	50
—	Riksgränsen A.E.G. u. S.S.W. Motala	1922	11	—	1-C+C-1	13,2	102,0	17,0	79,0	53,0	2900	2340	19000	13600	29000	39,0	45,0	60
496	Schwed. Staatsbahnen A.E.G.	1920	2	R. 40	B+B	68,0	68,0	17,0	41,0	27,0	1000	800	11400	8900	14000	23,0	23,0	60
497	Schwed. Staatsbahnen S.S.W. u. A.S.E.A.B.	1914	13	G.O.	1-C+C-1	138,0	105,0	17,5	78,0	60,0	1700	1052	16200	5050	17300	28,3	—	60
498	Schwed. Staatsbahnen S.S.W. u. A.S.E.A.B.	—	2	P.	2-B-2	90,0	34,4	16,5	54,0	36,0	1000	—	5400	—	—	50,0	—	100
499	Bernina B.B.C. S.L.F.W. (Meterspur)	1917	1	P.	C+C	42,6	42,6	7,1	25,6	17,0	800	620	11000	8000	13700	15,8	18,0	50
500	Bernische Dekretsbahnen B.B.C. S.L.F.W. M.F.O.	1920	20	R. 302	1-B+B-1	68,5	51,0	12,8	39,6	28,9	1290	1050	8000	6500	—	35,0	35,0	75
—	Burgdorf-Thun B.B.C. S.L.F.W.	1918	1	Nr. 4	B+B	43,8	43,8	11,0	29,3	15,2	500	—	9650	—	—	14,0	—	45
501	Burgdorf-Thun B.B.C. S.L.F.W.	1910	1	Nr. 3	B+B	42,0	42,0	10,5	24,0	18,0	500	—	8700	—	—	15,5	—	42
502	Burgdorf-Thun B.B.C. S.L.F.W.	1899	2	Nr. 1/2	B	30,0	30,0	15,0	20,0	10,0	300	—	2200	4400	—	36,0	—	—
503	S.B.B. Gotthard B.B.C. S.L.F.W.	1919	1	R 14201	1-C+C-1	121,0	102,0	17,1	69,8	51,2	2200 $1\frac{1}{2}$ h	1720	17000	13100	22000	35,0	40,0	65
504	S.B.B. Gotthard M.F.O. S.L.F.W.	1920	23	R 12251	1-C+C-1	129,0	104,0	18,2	72,0	57,0	2200 $1\frac{1}{2}$ h	1700	17000	13100	24000	35,0	35,0	65
505	S.B.B. Gotthard M.F.O. S.L.F.W.	1919	1	R 11301	1-B+B-1	113,0	80,0	20,0	58,5	54,5	2250 $1\frac{1}{2}$ h	1720	12000	7100	18000	50,0	60,0	75
506	S.B.B. Gotthard B.B.C. S.L.F.W.	1919	41	R 11302	1-B+B-1	107,6	78,0	19,5	49,6	58,0	2160 $1\frac{1}{2}$ h	1720	9700	7100	16000	60,0	60,0	75
507	S.B.B. Gotthard M.F.O. S.L.F.W.	1919	20	R 11201	1-C-1	91,0	58,5	19,5	46,5	44,5	1650 $1\frac{1}{2}$ h	1350	8900	7300	13500	50,0	—	75
—	S.B.B. M.F.O. S.L.F.W.	1921	13	R 10401	2-C-1	95,0	57,0	19,0	53,5	41,0	2000	1600	8300	6180	12000	65,0	70,0	90
508	S.B.B. B.B.C. S.L.F.W.	1921	8	R 10301	2-3A-1	92,0	57,0	19,0	49,5	42,5	2100	1740	8300	6800	10400	65,0	65,0	90

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
Durchmesser mm	Länge über Puffer mm	Achsstand mm	Fester	Gesamter	Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Motoren	Antrieb	Gewicht kg je PS	Regelleistung PS jen Lokomotivlänge	Literatur			
1350	870	19700	3850	17100						4	R 575	Gm, Ü = 1:3,218, 2 Z, Kk, Kuppelstangen, H = 30	46,5	62,7	127
1740	870	13700	5670	10800			16 ^{2/3}	2	R 520	Gm, Ü = 1:4,21, 2 Z, Kk, Kuppelstangen H = 0	57,5	79,5	92,5	E.u.M. 1920. H.44. — Dittes, Z.O.L.A.V. 1921. H. 15. — E. u. M. 1921. H. 16. — E.K.B. 1921. H. 12.	
1450	—	12500	3900	8000				3	R 380	Ugm, Ü = 1:6,3, 2 Z, Kk	55,7	75,5	104	E.u.M. 1921. H. 7. — Dittes, Z.O.L.A.V. 1921. H. 15. — E. u. M. 1921. H. 16. — E.K.B. 1921. H. 12.	
1530	850	20890	4900	16600	W	15000		4	R 365	Gdm, Ü = 1:4,9, 2 Z, Kk, Kuppelstangen, H = 0					
1350	—	12900	2900	8300			15	2	R 510	Gm, Ü, 2 Z, Kk, Schlitzkuppelstange, H = 75	68,0	85,0	77,3	Wist. E. u. M. 1921. H. 19 u. A.E.G. Mitt. 1921. Nr. 4.	
1100	750	18620	4300	14600				2	R	Gm, Schrägstange, Bw	82,5	133,0	92	E.K.B. 1915. H. 20 u. H. 25. — E.K.B. 1919. H. 23. — GA. 1920. Nr. 1041. — Zolland, E.K.B. 1914. H. 9. — Z.f.K.B. 1915. Nr. 4. — R.T.W. 1916. Nr. 16. — Z.V.D.I. 1920. Bd. 64. Nr. 9. — E.T.Z. 1915. H. 32. — Hoepner, V.T. 1921. Nr. 17.	
1575	970	14050	2900	10100				2	R	Gm, Schrägstange, Bw	89,0	—	71	B.B.C.M. 1917. H. 8. — E.T.Z. 1917. H. 52. — E. u. M. 1918. H. 12. — B.B.C.M. 1918. H. 1.	
850	—	13900	2100	9800	G	750		4	R 750	Gm, Ü = 1:4,67, Kk, Dreieckstange	53,3	68,6	57	B.B.C.M. 1917. H. 8. — E.T.Z. 1917. H. 52. — E. u. M. 1920. H. 43. — Sch.B.Z. 1920. Bd. 76. Nr. 8. — B.B.C.M. 1920. H. 7. — E. u. M. 1920. H. 43.	
1230	850	14390	2900	10550	W	15000	16 ^{2/3}	2	R	Gm, Ü = 1:3,86, Kk, Schlitzkuppelstange	52,7	64,8	90	Sch.B.Z. 1920. Bd. 76. Nr. 8. — B.B.C.M. 1920. H. 7. — E. u. M. 1920. H. 43.	
1230	—	13800	2600	10600				2	I 750	Gm, Ü = 1:6, Schlitzkuppelstange	87,6	—	36	B.B.C.M. 1919. Nr. 4. — Sachs, E. u. M. 1919. H. 23.	
1230	—	12600	2600	9400	D	750	40	2	I 750	Gm, Ü = 1:4	84,0	—	54	Wyßling-Kummer, B.I.E.K.V. 1910. — Sch.B.Z. 1910.	
1230	—	7800	3140	3140				2	I 750	Gm, Ü = 1:1,88 u 1:3,72, Kuppelstange, schliefer Achsgabeln	100,0	—	38	Herzog, Die elektrischen Anlagen der Schweiz. 1905.	
1350	930	19240	4700	15840				4	R	Gdm, Ü = 1:3,16, Kk, 2 Z, Schrägstange ohne Bw	60,0	70,5	114	Studer, E. u. M. 1918. H. 27 und Sch.B.Z. Bd. 71. Nr. 20. — Sachs, E. u. M. 1919. H. 24. — B.B.C.M. 1919. H. 4. — E.R.J. 1919. Bd. 53. Nr. 24. — Sch.B.Z. 1909. Bd. 44. Nr. 21. — Z.V.D.I. 1921. Bd. 55. Nr. 14.	
1350	930	19400	4700	16500				—	R	Gdm, Ü = 1:4,03 Kk, 2 Z, schiefer Kuppelrahmen Bw	58,3	76,0	113	Sch.B.Z. 1920. Bd. 75. Nr. 7 u. Nr. 21. E. u. M. 1920. H. 32. — Period. Mitt. Oerlikon. 1920. Nr. 102. — Heyden, E.K.B. 1921. H. 5. — Z.V.D.I. 1921. Bd. 65. Nr. 14.	
1350	930	16500	2900	13200	W	15000	16 ^{2/3}	4	R 660	Gdm, Ü = 1:3,47, Kk, 2 Z, Schlitzkuppelstange, H	49,0	60,0	136	Sch.B.Z. 1918. Bd. 71. Nr. 20. — Sch.B.Z. 1919. Bd. 74. Nr. 7. — Period. Mitt. Oerlikon. 1919. Nr. 97. — Sachs, E. u. M. 1919. H. 24. — Behn-Eschenburg, Sch.B.Z. 1920. Bd. 74. Nr. 7. — Z.V.D.I. 1921. Bd. 65. Nr. 14.	
1350	950	16500	3300	13500				4	R 480	Gdm, Ü = 1:3,47, Kk, 2 Z, Kuppelstangen	49,8	62,6	131	B.B.C.M. 19	

Abbildung	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Bahnanlage	Jahr der Lieferung	Stückzahl	Reihe, Bezeichnung	Achsenfolge	Dienstgewicht t	Reibungsgewicht t	Achstdruck t	Gewicht t für den mech. Teil	Leistung PS	Zugkraft am Radumfang kg	Geschwindigkeit km/h						
	Erbauer für d.elektr. Ausführung								die elektr. Ausführung	Regel.	Dauer-	Höchst-	Regel.	Dauer-	Höchst-	Regel.	Dauer-	
509 281	Lötschberg M.F.O. S.L.F.W. B.B.C.	1914	12	R 153	1 — E — 1	107,0	80,0	16,0	48,0	59,0	2500	—	13500	—	18000	50,0	—	75
510 269	Lötschberg M.F.O. S.L.F.W.	1910	1	Nr. 121	C + C	90,0	90,0	15,0	46,0	44,0	2000	—	13000	—	17000	42,0	—	70
511	S.B.B. Sécheron S.L.F.W.	1921	6	S.Z.	1 — 3 A — 1	82,6	57,0	19,0	39,0	43,6	1800	1440	7800	6300	—	62,0	62,0	75
512	S.B.B. Sécheron S.L.F.W.	1921	—	S.Z.	1 — B — 1 + + B — 1	113,0	74,0	19,0	55,5	57,5	2400	1920	11920	9680	19680	54,0	—	75
513	Valle Maggia M.F.O. S.L.F.W. (Meterspur)	—	1	Ge 2/2	B	20,8	20,8	18,5	11,5	9,3	250	—	3100	—	—	22,0	—	—
—	Rhätische Bahn B.B.C. S.L.F.W. (Meterspur)	1913	1	Nr. 301	1 — D — 1	55,2	42,1	11,0	26,7	28,5	600	—	—	—	—	28,0	—	—
—	Rhätische Bahn B.B.C. S.L.F.W. (Meterspur)	1913	7	Nr. 201/7	1 — B — 1	36,7	21,8	11,0	18,9	17,8	300	—	—	—	—	28,0	—	—
514	Rhätische Bahn A.E.G. S.L.F.W. (Meterspur)	1913	1	Nr. 391	1 — D — 1	55,4	41,4	10,7	30,2	25,2	600	—	—	—	—	28,0	—	45
515	Rhätische Bahn M.F.O. B.B.C. S.L.F.W. (Meterspur)	1914	4	Nr. 355/7 302	1 — D — 1	56,4	44,0	11,0	30,5	25,9	800	—	7400	—	10000	30,0	—	50
—	Rhätische Bahn M.F.O. S.L.F.W. (Meterspur)	1913	2	Nr. 351/2	1 — D — 1	49,6	39,2	9,9	27,6	21,7	600	—	5750	—	—	28,0	—	45
—	Rhätische Bahn B.B.C. S.L.F.W. (Meterspur)	1921	6	401—406	C + C	66,0	66,0	11,0	38,0	28,0	1200	1000	10000	9000	12000	30,0	28,0	45
516	Seebach-Wetting. M.F.O. S.L.F.W.	1905	—	Nr. 2	B + B	42,0	42,0	10,5	—	—	500	—	3400	—	—	40,0	—	60
517	Simplon B.B.C. S.L.F.W.	1906	3	364	1 — C — 1	62,0	44,0	14,7	32,0	29,0	800	—	6400	9000	—	34,0	—	—
518	Simplon B.B.C. S.L.F.W.	1907	2	367	D	68,0	68,0	17,0	33,0	35,0	1100	—	11500	6700	—	13000	26,0	69,0
519	Simplon B.B.C. S.L.F.W.	1915	1	371	1 — D — 1	88,4	69,4	17,4	44,4	44,0	1050	2800	—	10800	—	17000	26,0	71,0
—	Gergal-St. Fé B.B.C. —	1911	5	—	2A	26,0	26,0	13,0	13,0	13,0	320	220	3450	2850	—	25,0	25,0	—
520	Vác-Gödöllő S.S.W. Ringhoffer	1911	4	—	B + B	47,0	47,0	11,8	24,0	23,0	480	—	4320	—	—	30,0	—	50
—	Wiener Stadtb. Krizik Steg	1906	1	—	2A	29,0	29,0	14,5	—	—	520	—	5200	—	—	26,0	—	—

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Durchmesser mm	Laufrad-Länge über Puffer mm	Achsstand mm	Fester	Gesamter	Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Motorenanzahl	Art Spannung	Antrieb	Regelleistung je PS	Dauerleistung je PS	Regelleistung je PS jem Lokomotivläufe	Literatur
1350	950	16000	4500	11340	2	R 420	Gm, Ü = 1:2,25, Kk, Kandörahmen	42,8	—	156	Thormann, Sch.B.Z. 1914. Bd. 53. Nr. 2. — E.T.Z. 1913. H. 45. — Jacquin, G.C. Nov. 1913. — Behn. Eschenburg, E.T.Z. 1912. H. 10. — R.T. 1914. — B.J.E.K.V. 1913. Nr. 4. — Kummer, Sch.B.Z. 1916. Bd. 68. Nr. 14.			
1350	—	15020	4050	10700 W	15000 16 ² / ₃ 2	R 420	Gm, Ü = 1:3,25, Schrägstange ohne Bw	45	—	183	Stix, Sch.B.Z. 1911. Bd. 57. Nr. 6. — G.C. 1911. Bd. 58. Nr. 76. — Mittl. der M.F.O. Nr. 553. — E.T.Z. 1920. H. 21.			
1610	930	12260	4200	9300	6	R	Gdm, gefederte Hw Ü = 1:5, 2 Z, Kk	46,0	57,0	117	Sch.B.Z. 1921. Bd. 76. Nr. 18.			
1610	930	16240	2400	13640	8	R	Gdm, gefederte Hw Ü = 1:5,72, 2 Z, Kk	47,1	59,0	147				
835	—	7450	3300	3300 W	5000 800 20 1	R 225	Gm, Ü = 1:3,9, Schlitzkuppelstange	83,2	—	33	Zindel, Sch.B.Z. 1911. Bd. 58. Nr. 3 u. E.K.B. 1911. H. 21.			
1070	710	11500	1550	8000	2	Déri 950	Gm, Zweistangen ohne Bw	92,0	—	52	Die Rhätische Bahn. Orell-Füssli, Zürich. 1915. — Sachs, E. u. M. 1919. H. 23.			
1070	710	8700	2600	6000	1	Déri 950	Gm, Schrägstange, Bw	122,0	—	35	Eng., 1913. Okt. — Z.f.K.B. 1914. Nr. 1. Die Rhätische Bahn. Orell-Füssli, Zürich. 1915.			
1070	710	11000	2400	8200 W	11000 16 ² / ₃ 2	Rd 300	Gm, Ü = 1:2,65, 2 Z, Schrägstange, Bw	92,3	—	55	Engel, Sch.E.T.Z. 1914. H. 9. — Königshagen, A.E.G.-Mittl. 1919. Nr. 7. — Sch.B.Z. 1917. Bd. 70. Nr. 16. Die Rhätische Bahn. Orell-Füssli, Zürich. 1915.			
1070	710	11104	2400	8200	2	R	Gm, Ü 2 Z, Kk, Schrägstange, Bw	70,5	—	72				
1070	710	10800	2400	8200	2	R 390	Gm, Ü 2 Z, Kk, Schrägstange, Bw	82,6	—	55	E.R.J. 1914. Bd. 43. Nr. 26. — Sch.E.T.Z. 1916. H. 11. — E. u. M. 1915. H. 36.			
1070	—	13300	3275	10350 W	11000 16 ² / ₃ 2	R 510	Gm, Ü Schrägstange	55,0	66,0	90				
1050	—	9400	2000	6300 W	15000 15 2	R	Gm, Ü = 1:3,08, Schlitzkuppelstange	84	—	53	E.T.Z. 1907. H. 4. — Sch.E.T.Z. 1908. Nr. 15. — Sch.B.Z. 1909. Bd. 54. Nr. 4. — E. u. M. 1919. H. 23.			
1640	850	12320	2400	9700 D	3000 15 2	J 3000	Gm, Kandörahmen	77,5 56,9	—	90	E.T.Z. 1906. H. 8. — 1907. H. 10. — Verebely, E. u. M. 1919. H. 10.			
1250	—	11640	4600	8000 D	3000 15 2	J.K 3000	Gm, Kuppelrahmen	61,8 46,0	—	95	Thomann-Schnetzler, Z.V.D.I. 1909. S. 607. — E.K.B. 1909. H. 29. — Sch.E.T.Z. 1907. H. 37. — Kummer, Sch.B.Z. 1909. Bd. 54. Nr. 17.			
1250	850	12500	1800	8800 D	3000 15 2	J 3000	Gm, Zwei-stangen, Schlitzkuppelstange	82,0 31,6	—	89	Verebely, E. u. M. 1919. H. 20.			
1200	—	7700	4000	4000 D	5200 25 2	J 450	Ugm, Ü = 1:4,5	81,4	118,0	42	T.M. Bd. VIII. Nr. 5.			
800	—	10340	2000	6640 W	15000 15 2	R	Gm, Ü = 1:3,44, Schlitzkuppelstange	98,0	—	46	E.K.B. 1912. H. 15. — E.K.B. 1913. H. 17.			
—	—	—	—	— G	2 × >1500 4 750	Ugdm, Ü = 1:4,33	55,8	—	—	Rosa-List, E. u. M. 1906. H. 46. — E.T.Z. 1906. H. 46.				

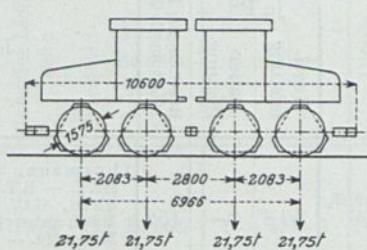


Abb. 432. Baltimore—Ohio, 1895, L.E. — 1.

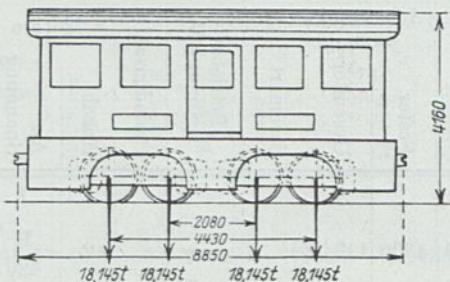


Abb. 433. Baltimore—Ohio, 1903/6, L.E. — 2.

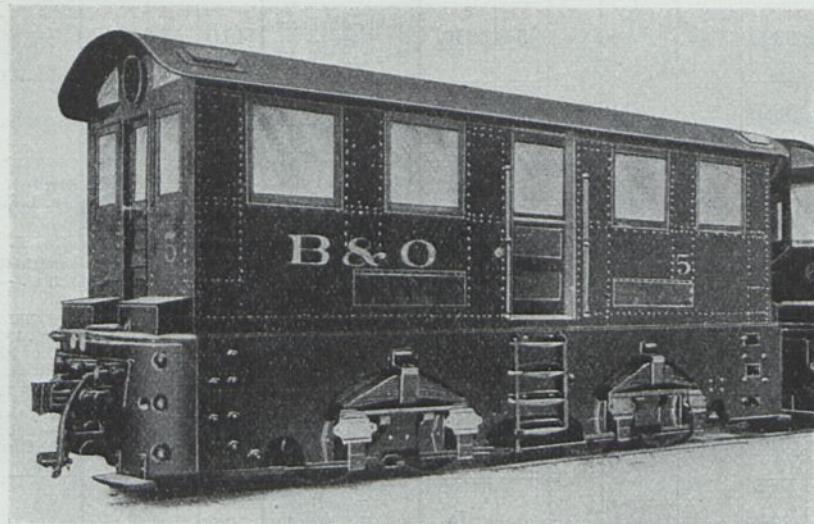


Abb. 433 a. Baltimore—Ohio, 1903/6, L.E. — 2.

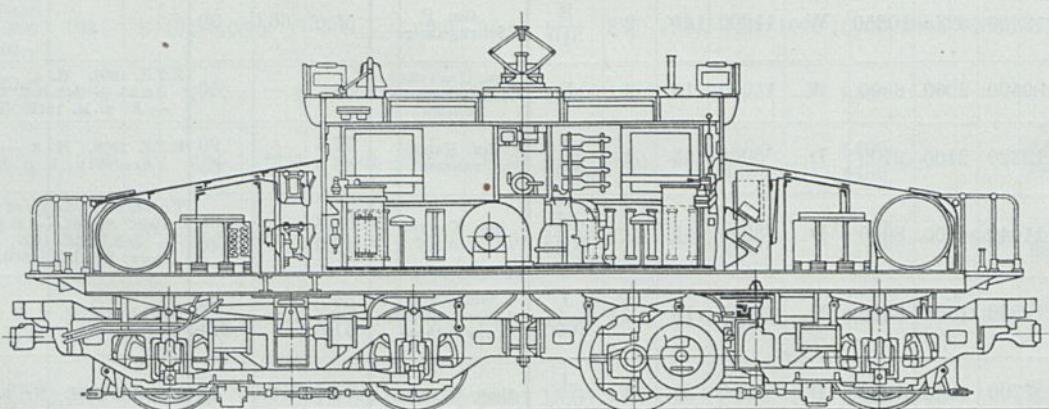


Abb. 434. Baltimore—Ohio, 1910/12, O.E. 1.

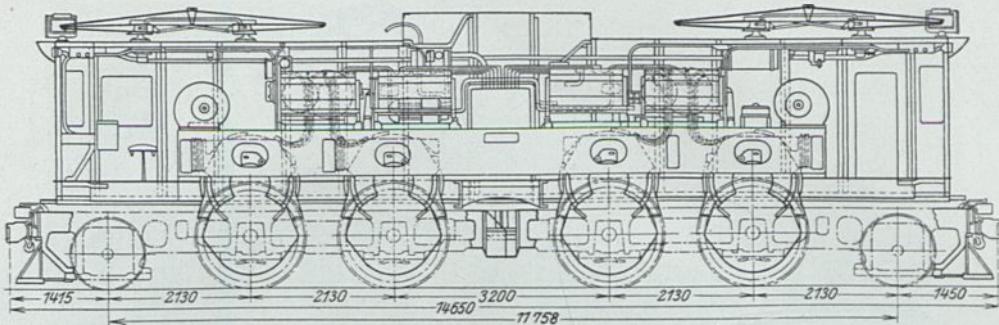


Abb. 435. Boston—Maine, Hoosac-Tunnel, 1911.

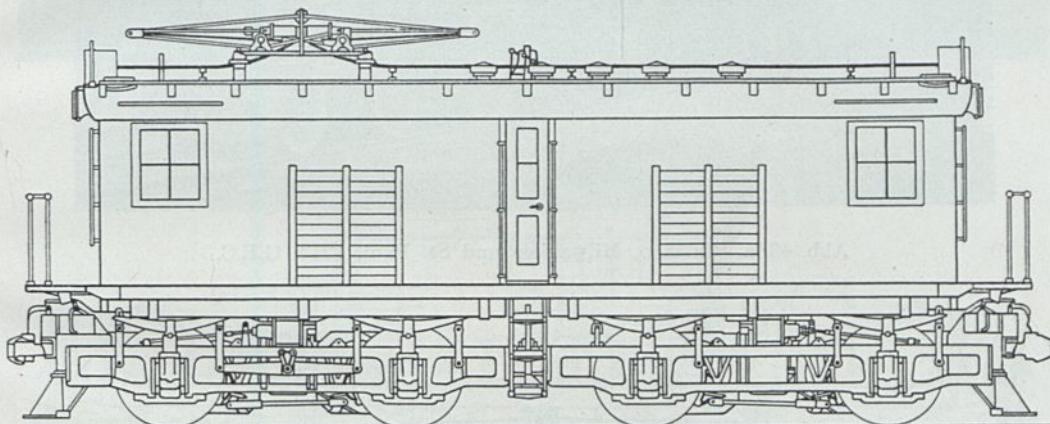


Abb. 436. Butte, Anaconda und Pacific, 1913, S. 46. — Canadian Northern.

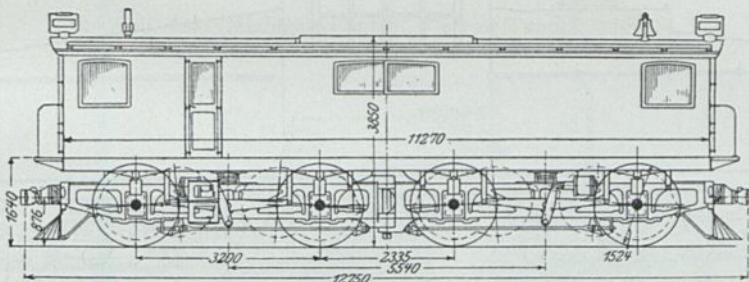


Abb. 437. Great Northern, Cascade-Tunnel, 1904.

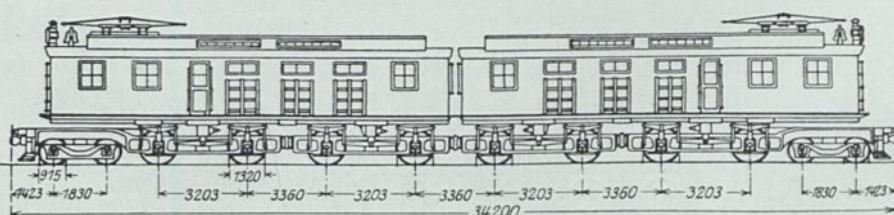


Abb. 438. Chicago, Milwaukee und St. Paul, 1914, G.E.C.

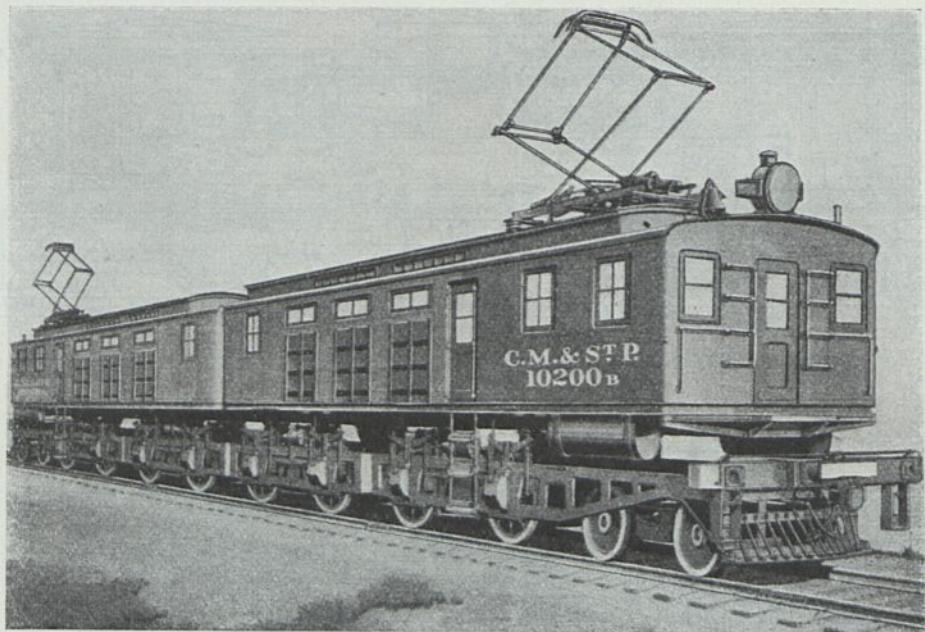


Abb. 438a. Chicago, Milwaukee und St. Paul, 1914, G.E.C.

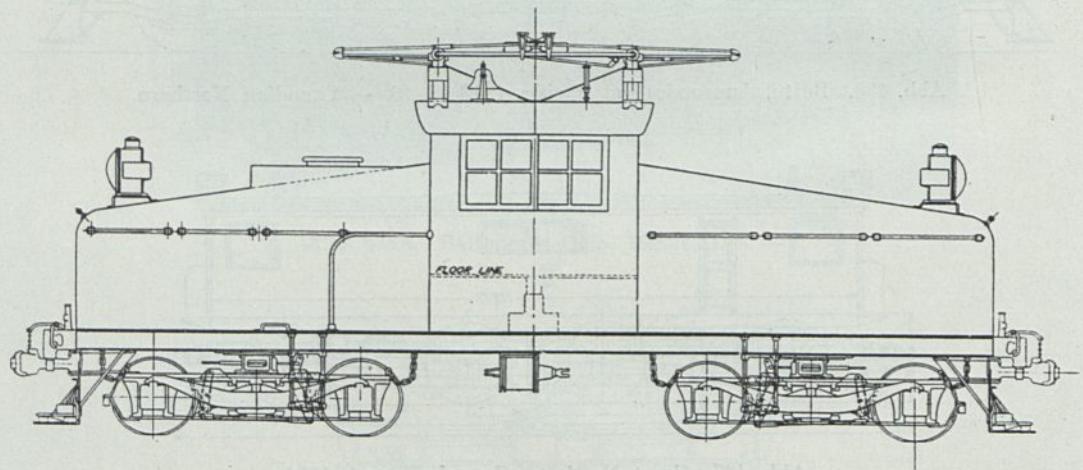


Abb. 439. Chicago, Milwaukee und St. Paul, Verschub, 1916.

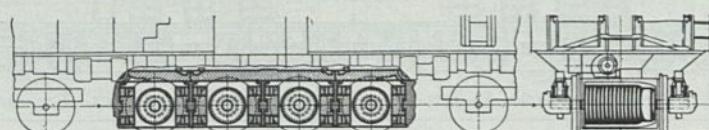


Abb. 440. Chicago, Milwaukee und St. Paul, 1918, Reihe 10251. G.E.C.

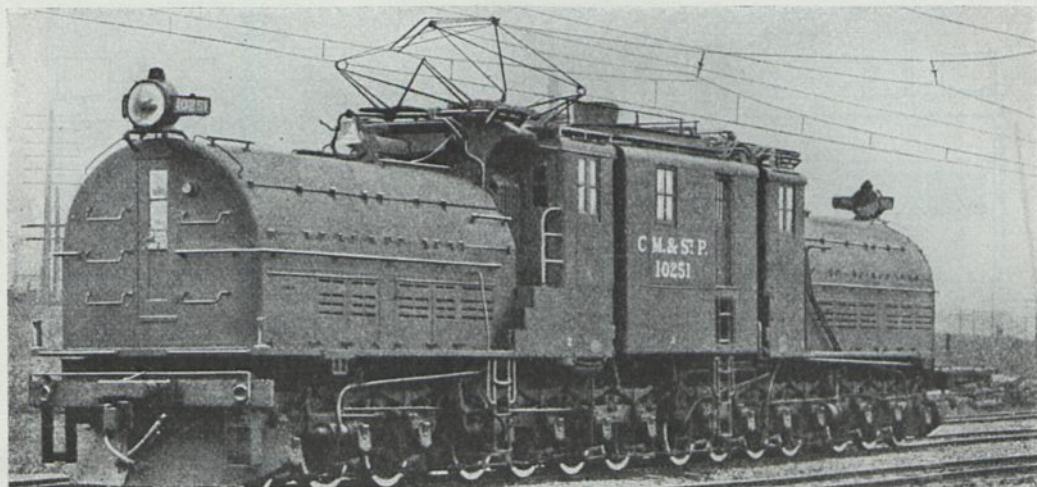


Abb. 440a. Chicago, Milwaukee und St. Paul, 1918, Reihe 10251. G.E.C.

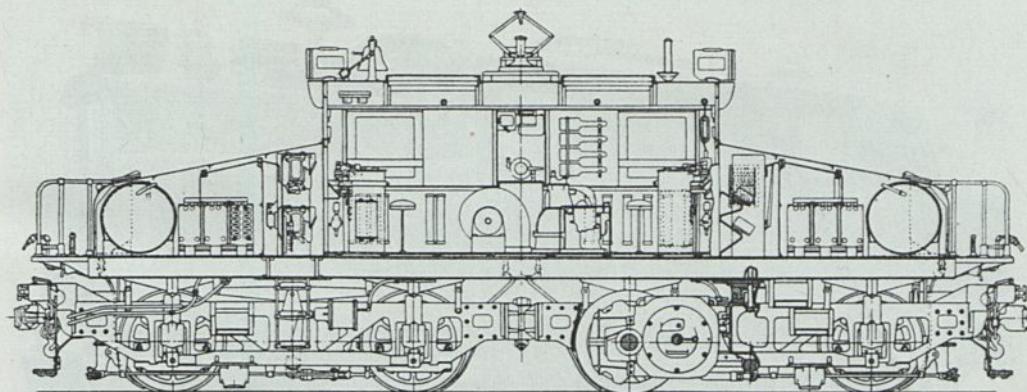


Abb. 441. Michigan Central, Detroit-Tunnel, 1909/14.



Abb. 441a. Michigan Central, Detroit-Tunnel, 1909/14.

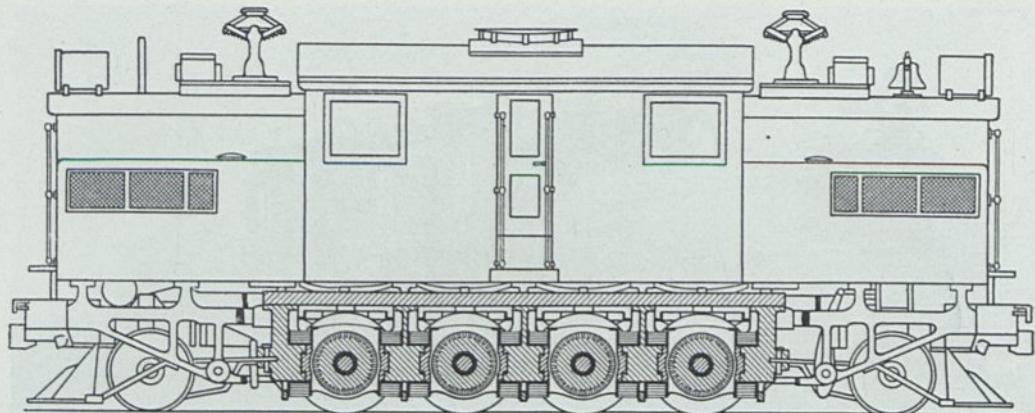


Abb. 442. New York-Central—Hudson River, 1906 (umgebaut).

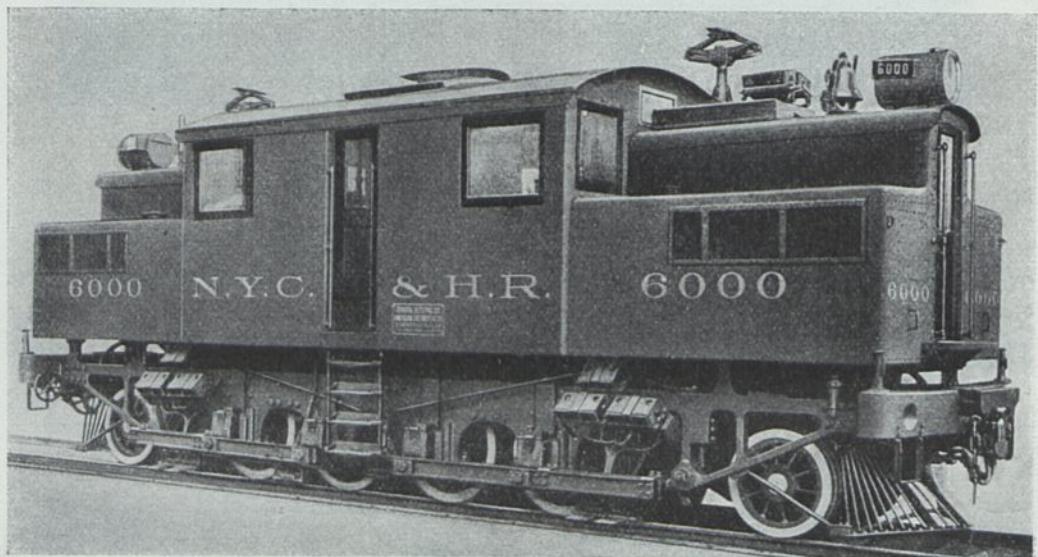


Abb. 442a. New York-Central—Hudson River, 1906.

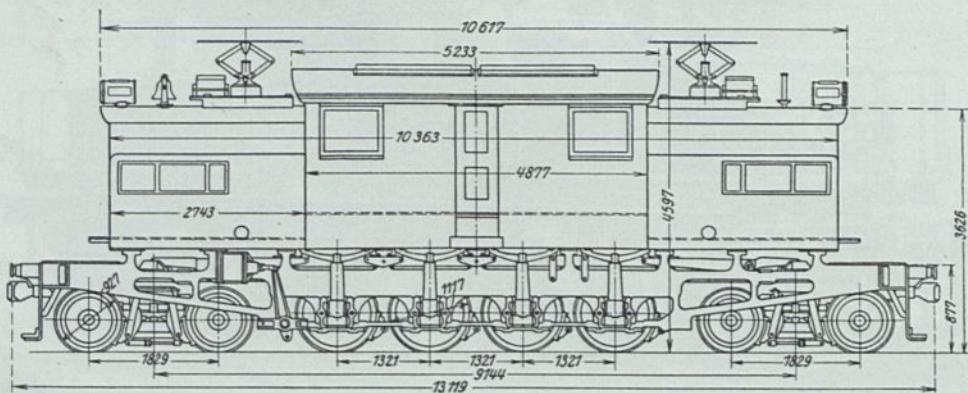
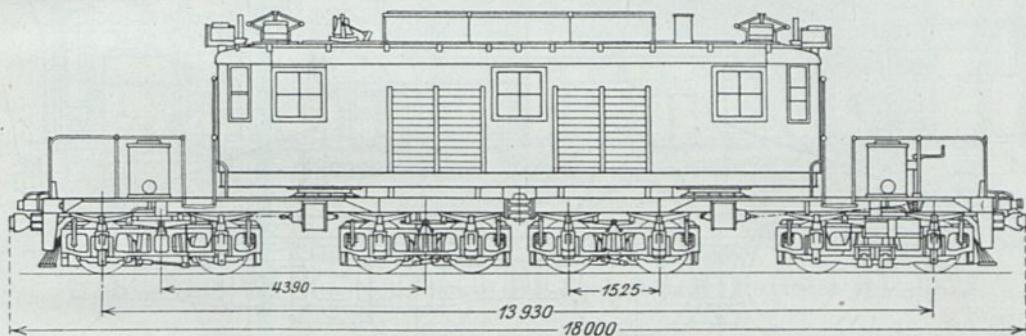
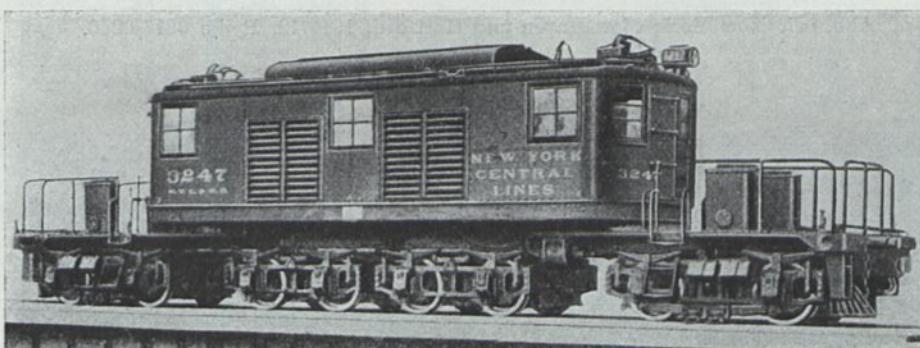
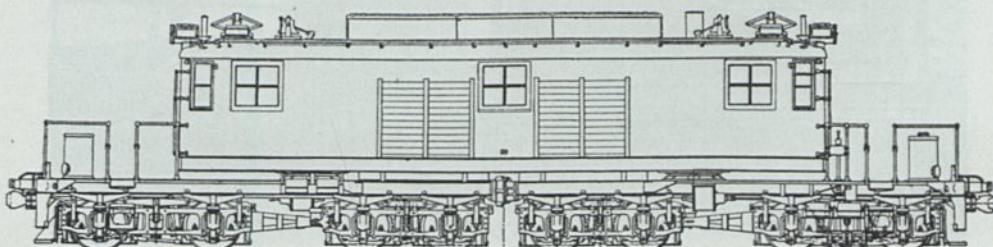


Abb. 443. New York-Central—Hudson River, 1906/9.



Abb. 443 a. New York-Central—Hudson River, 1906/9.

Abb. 444. New York-Central—Hudson River, 1914 — T₂.Abb. 445 a. New York-Central—Hudson River, 1913 — T₁.Abb. 445. New York-Central—Hudson River, 1913 — T₁.

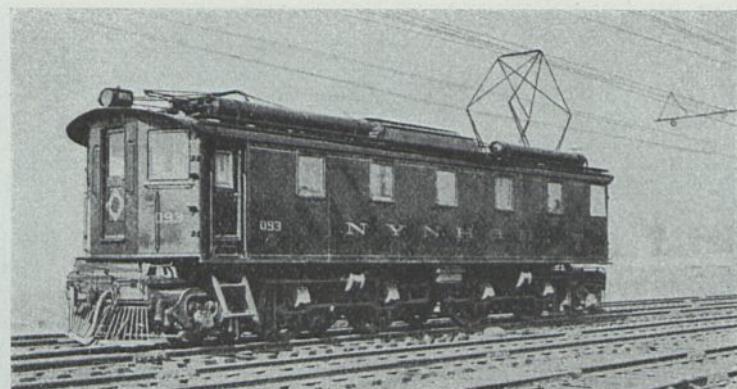


Abb. 446. New York, New-Haven und Hartford, 1916, Reihe 1897/98.

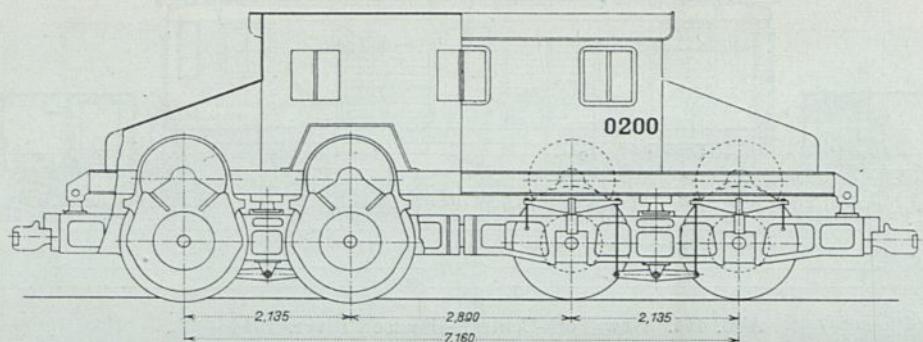


Abb. 447. New York, New-Haven und Hartford, 1911/12, Reihe 0215/0200.

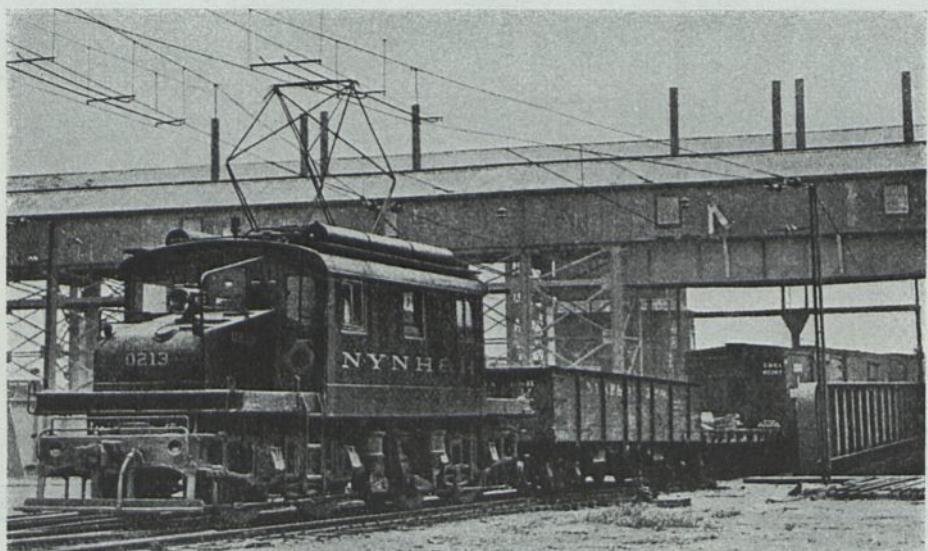


Abb. 447 a. New York, New-Haven und Hartford, 1911/12, Reihe 0215/200.

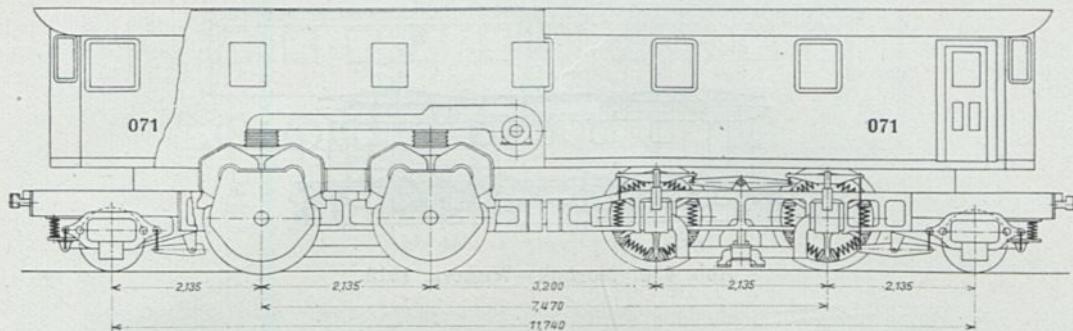


Abb. 448. New York, New-Haven und Hartford, 1910/13, Colonial — 073.

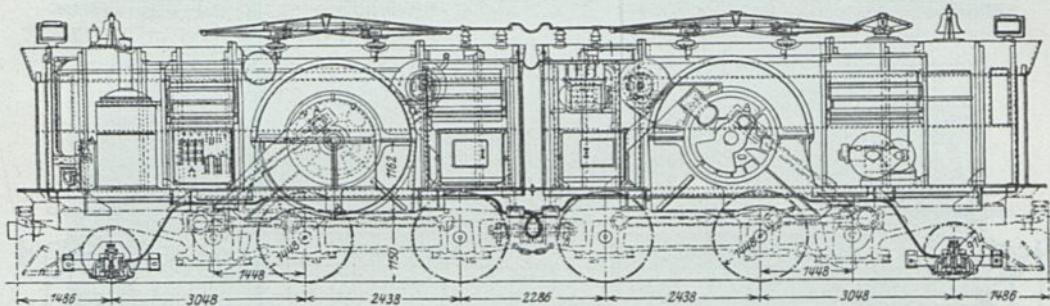


Abb. 449. New York, New-Haven und Hartford, 1910, Reihe 070.

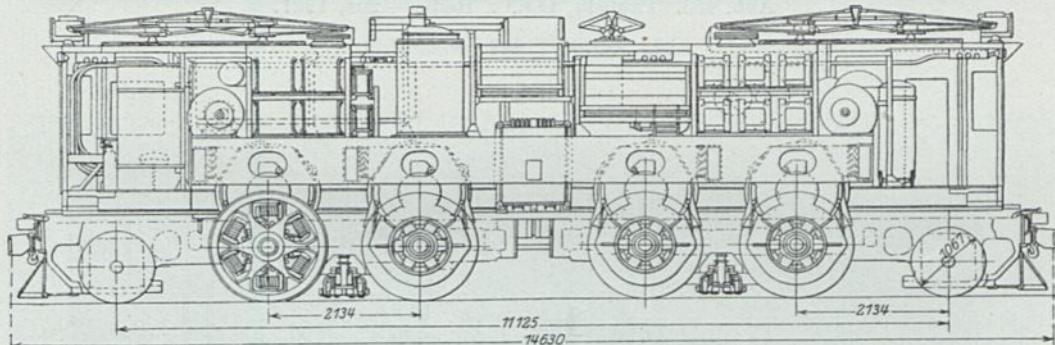


Abb. 450. New York, New-Haven und Hartford, 1910/11, Reihe 071/072.

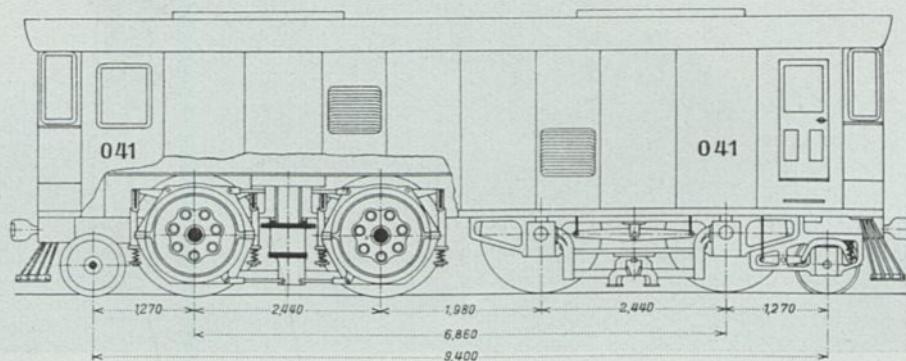


Abb. 451. New York, New-Haven und Hartford, 1907, Reihe 0—41.

Seefehlner, Elektr. Zugförderung.

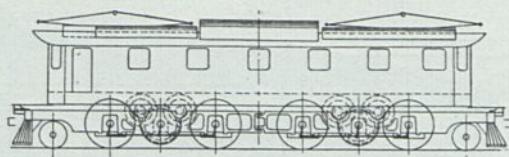


Abb. 452. Norfolk—Western, 1915.

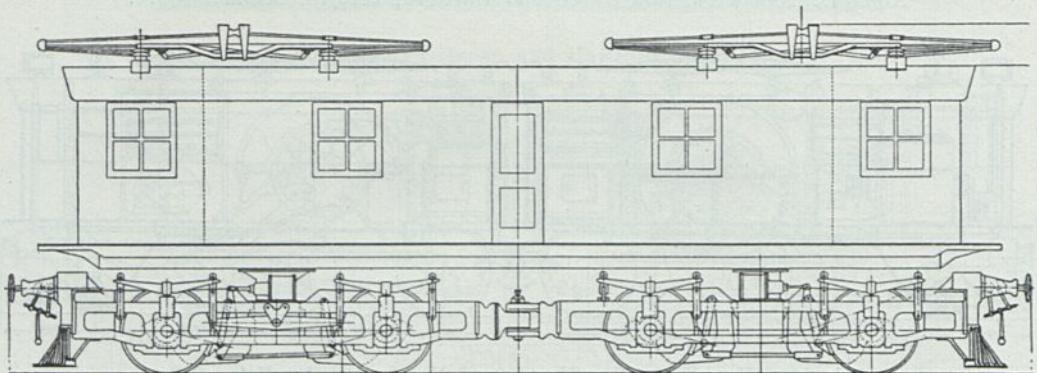


Abb. 453. Paulista, G.E.C., Reihe — 204, 1921.

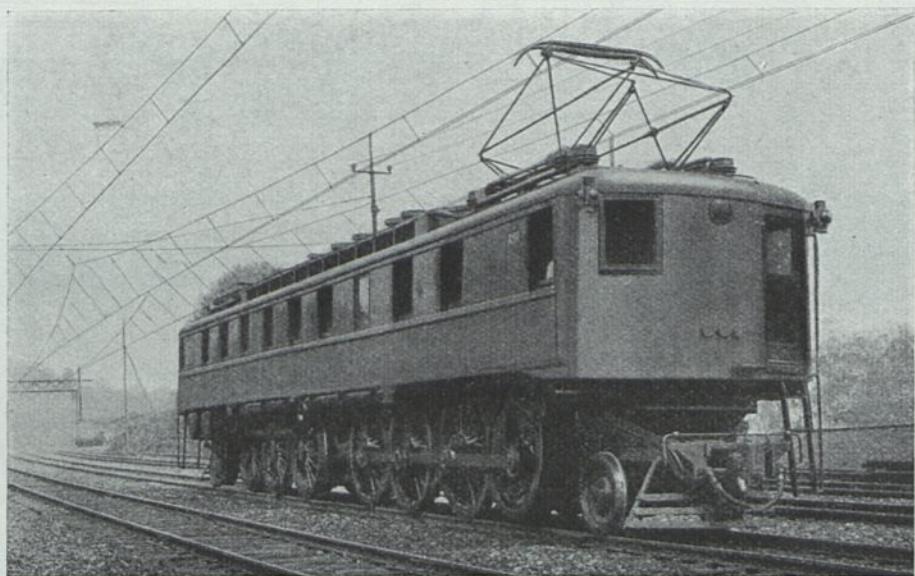


Abb. 454. Pennsylvania, 1917.

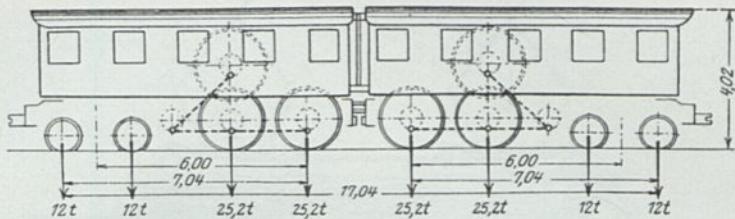


Abb. 455. Pennsylvania, 1910.



Abb. 455 a. Pennsylvania, 1910.

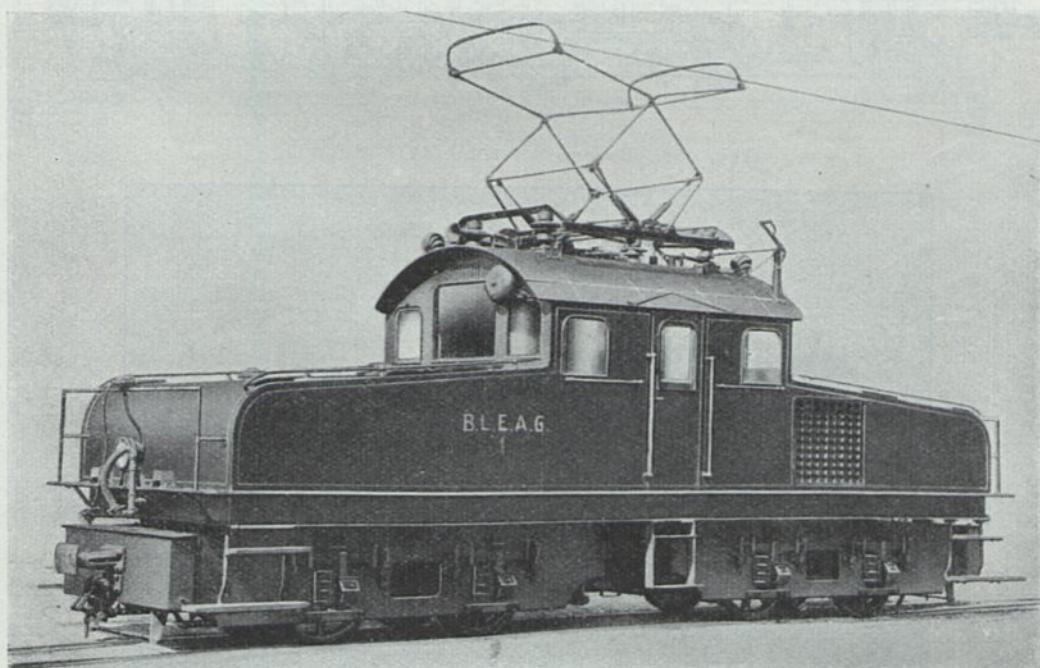


Abb. 456. Albtal, 1915.

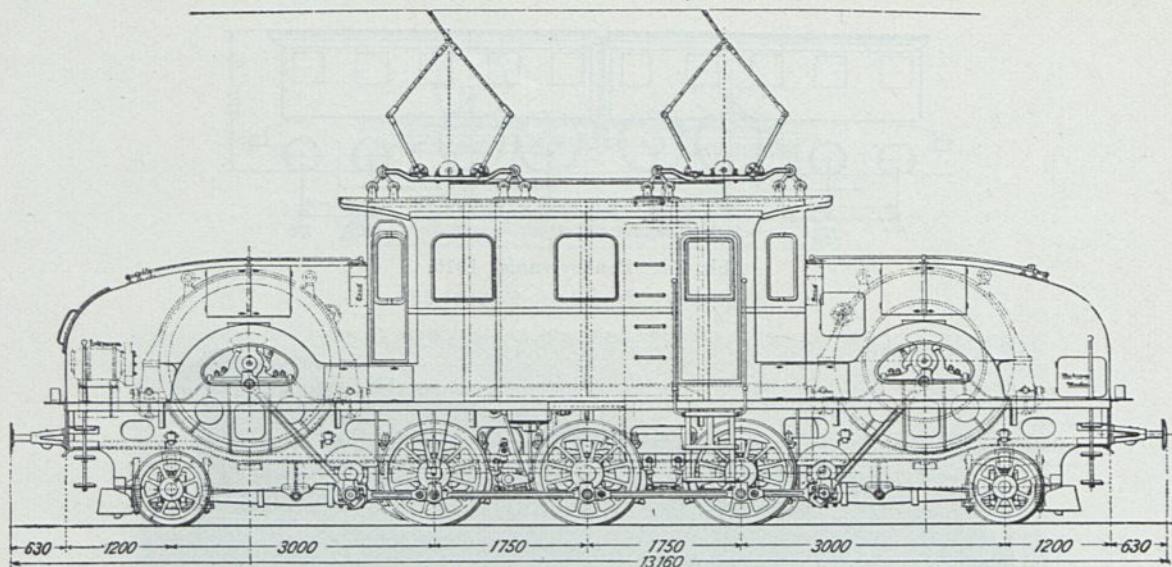


Abb. 457. Baden, Wiesental (Probemaschine 1911.)

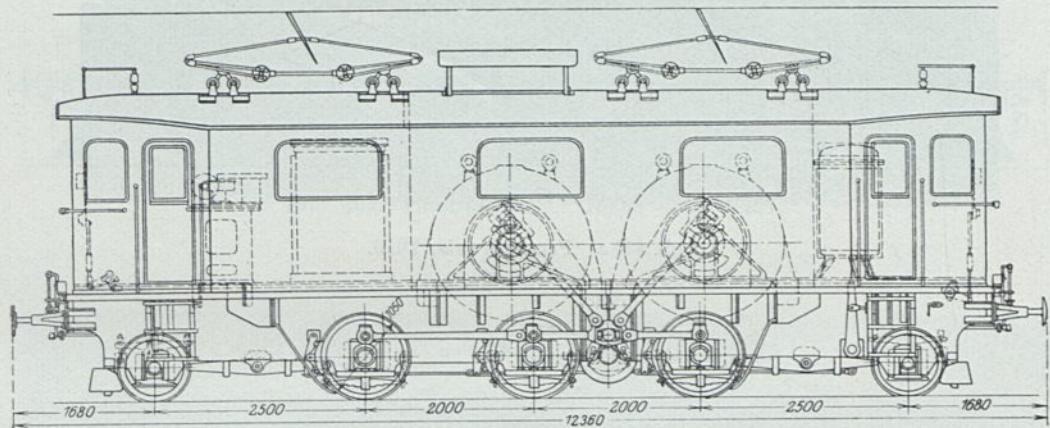


Abb. 458. Baden, Wiesental, 1912, S.S.W.

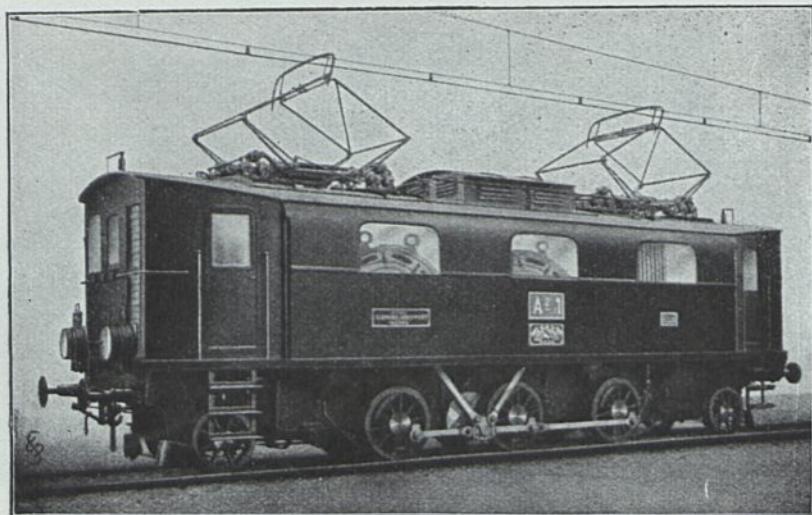


Abb. 458 a. Baden, Wiesental, 1912, S.S.W.

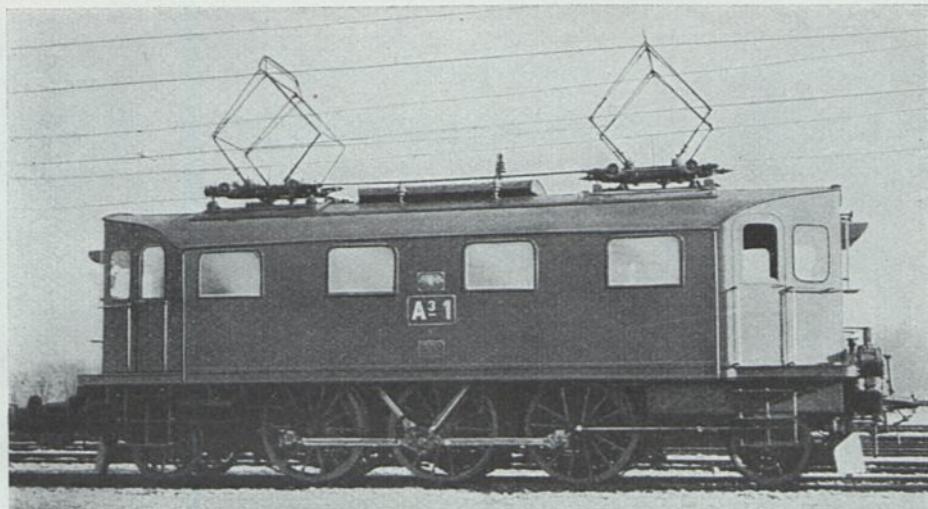


Abb. 459. Baden, Wiesental, 1913, B.B.C.M.

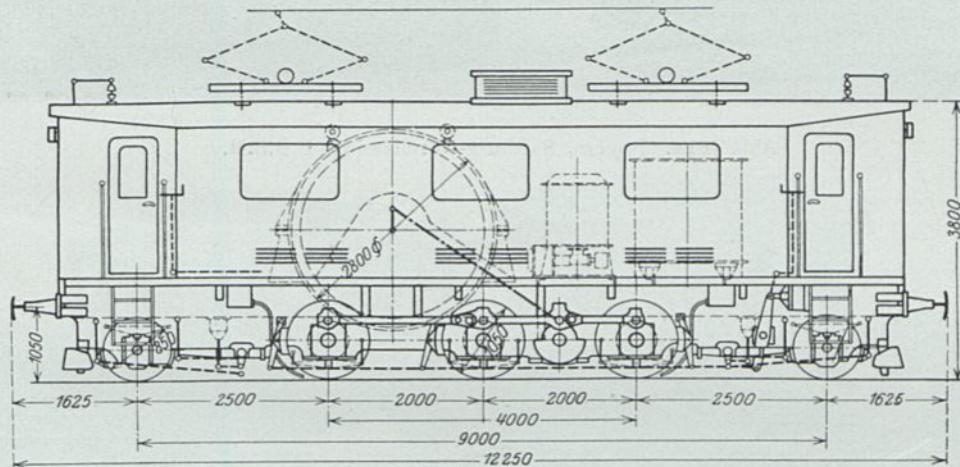


Abb. 460. Bayern, Mittenwald, 1913.

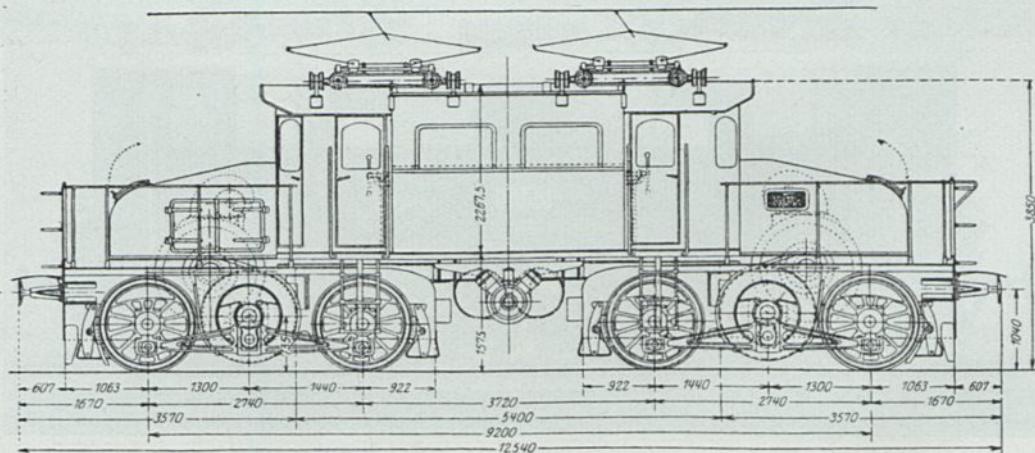


Abb. 461. Bayern, Salzburg—Freilassing.

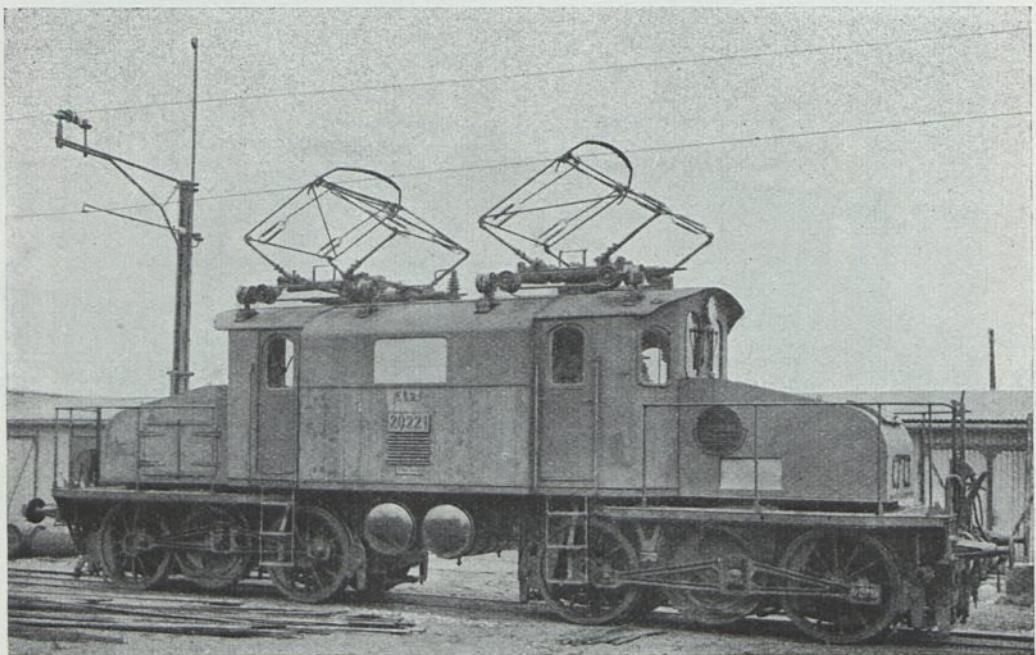


Abb. 461 a. Bayern, Salzburg—Freilassing, B.B.C.M.

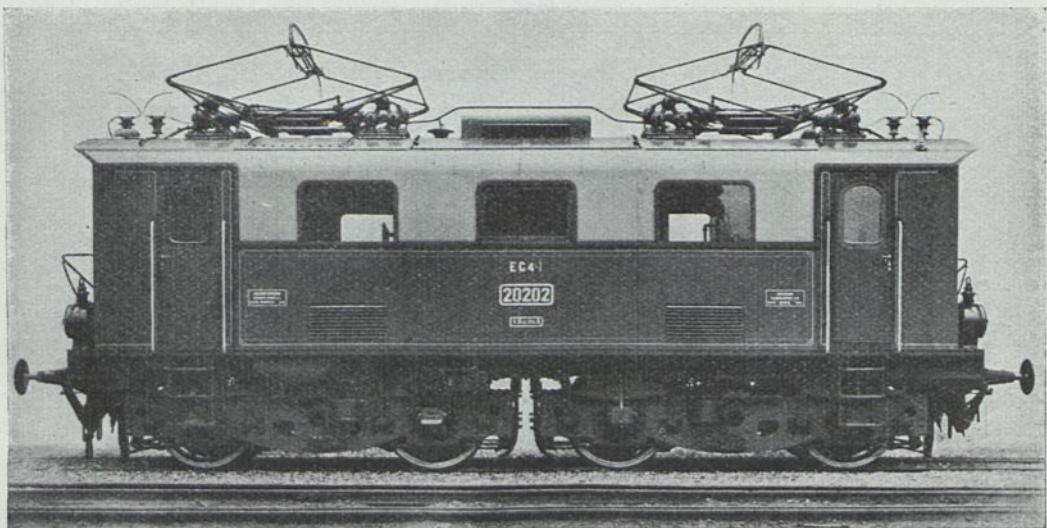


Abb. 462. Bayern, Salzburg—Freilassing, S.S.W.

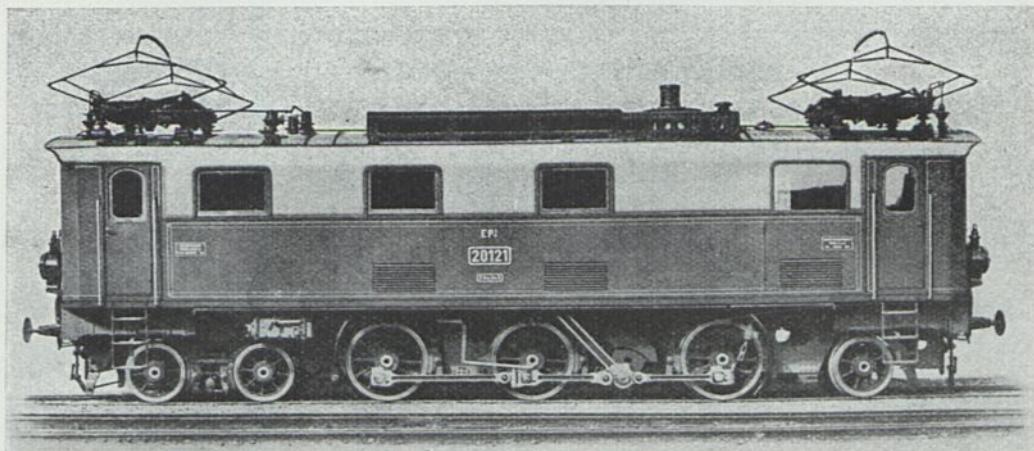


Abb. 463. Bayern, Salzburg—Freilassing.

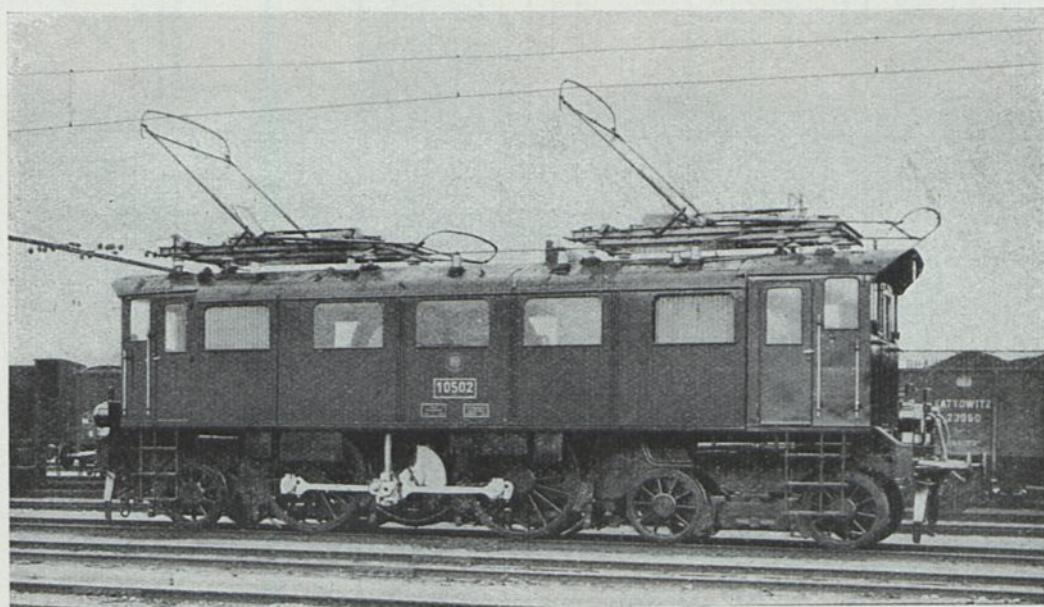


Abb. 464. Preußen, E.S. 3.

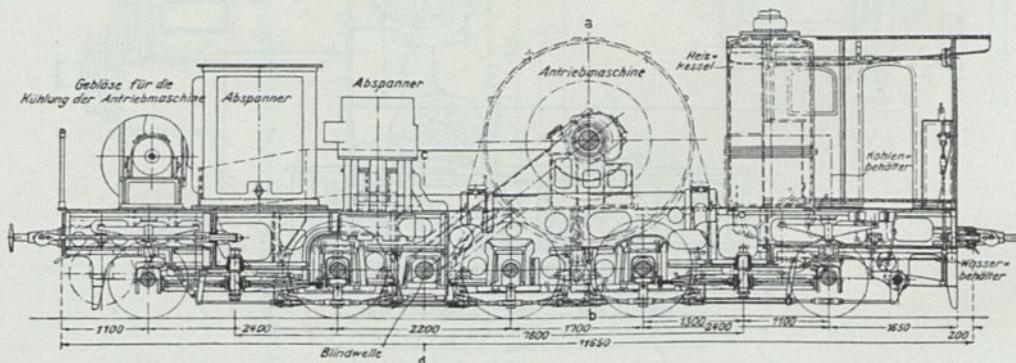


Abb. 465. Preußen, E.S. 6.

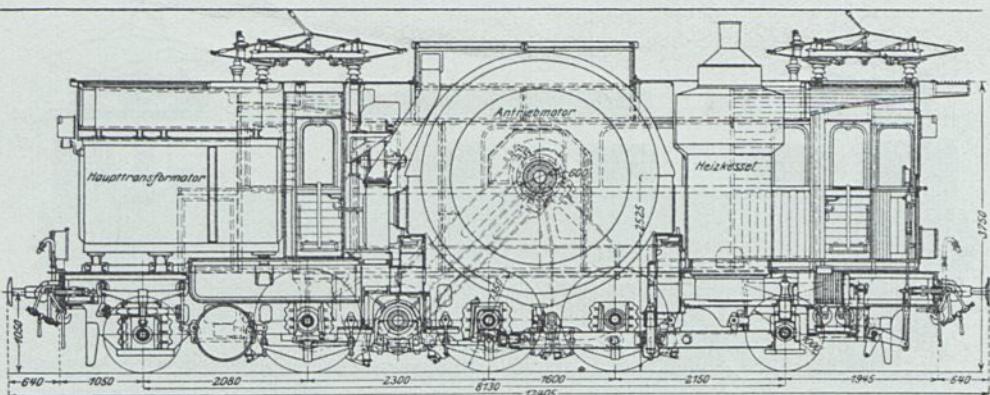


Abb. 466. Preußen, E.S. 9—19.

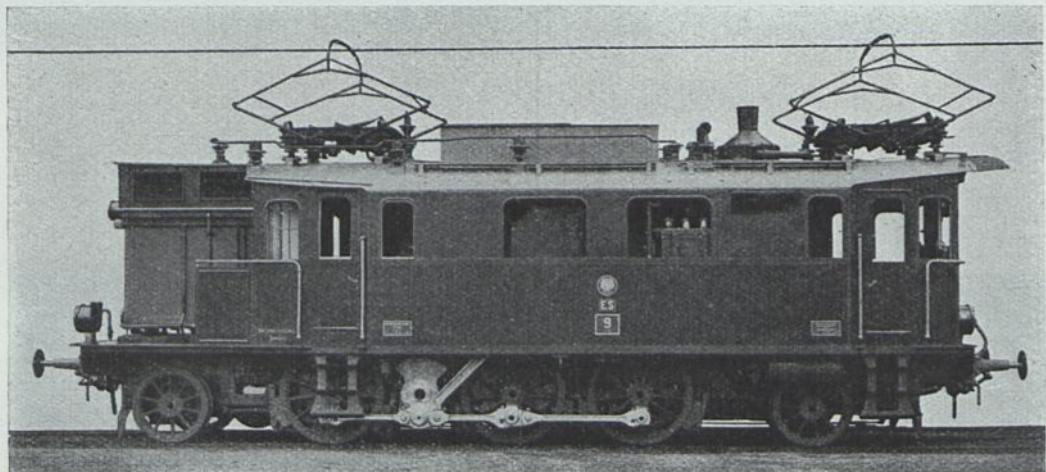


Abb. 466a. Preußen, E.S. 9—19.

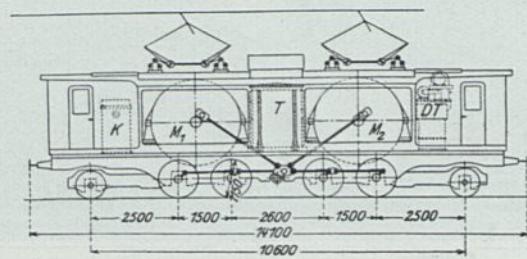


Abb. 467. Preußen, E.P. 201.

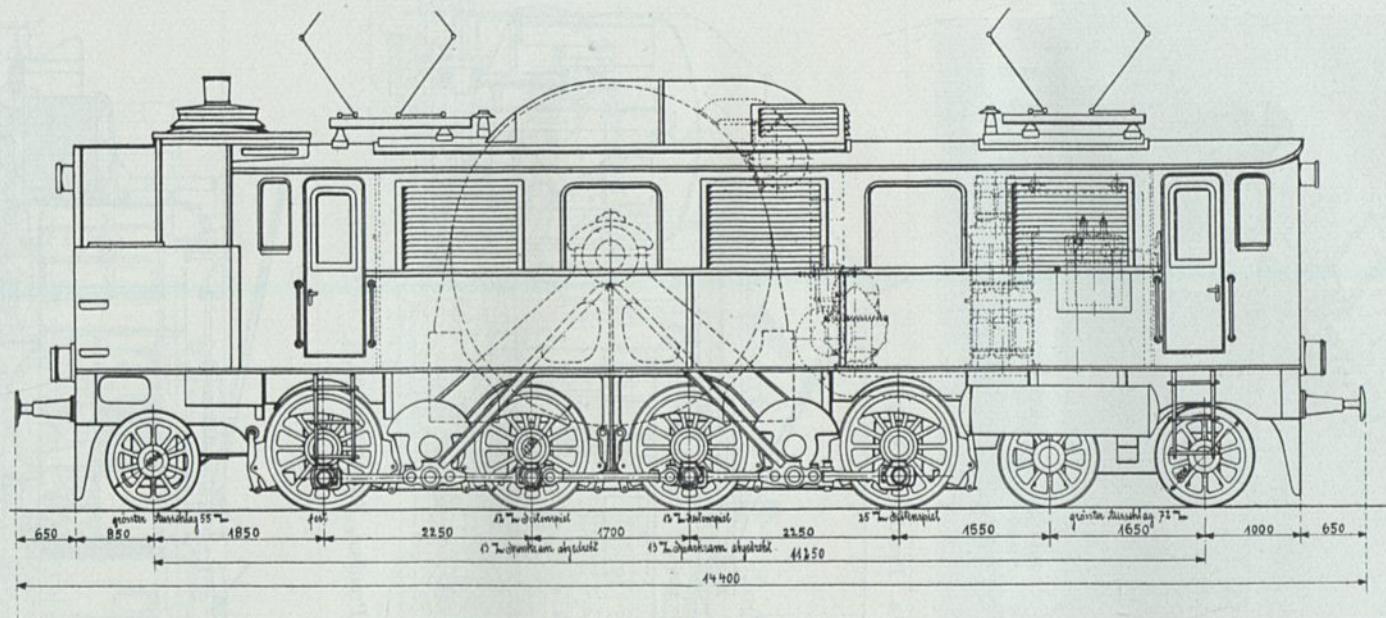


Abb. 468. Preußen, E.P. 235.

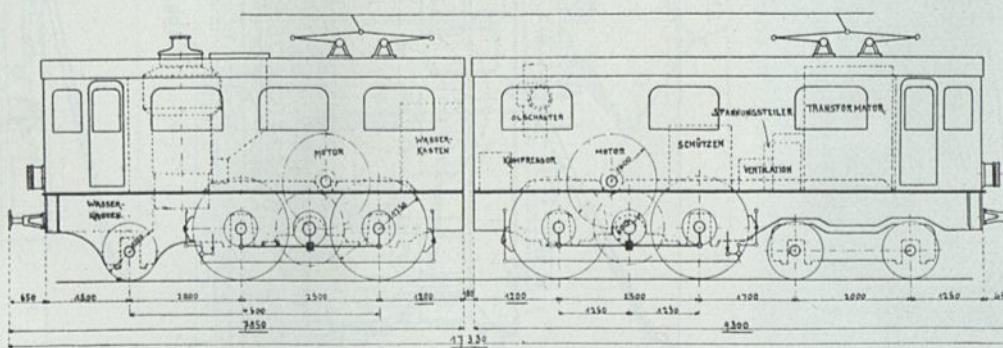


Abb. 469. Preußen, E.P. 209—212, 213—284.

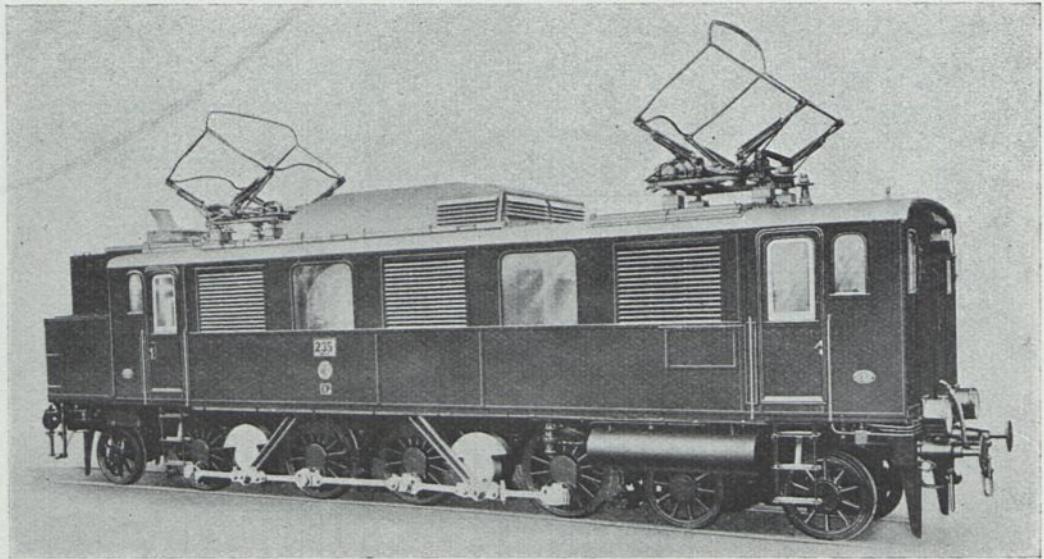


Abb. 468 a. Preußen, E.P. 235.

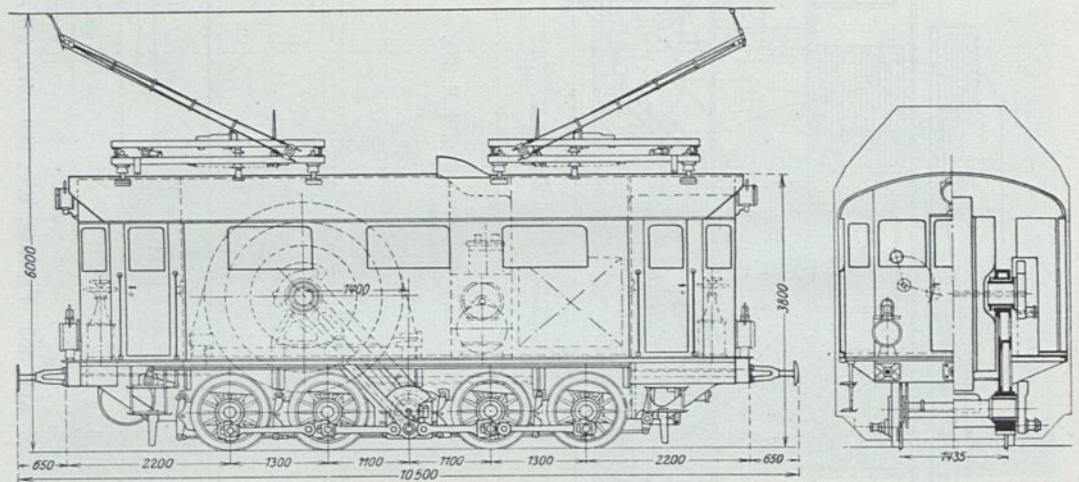


Abb. 470. Preußen, E.G. 502—508.

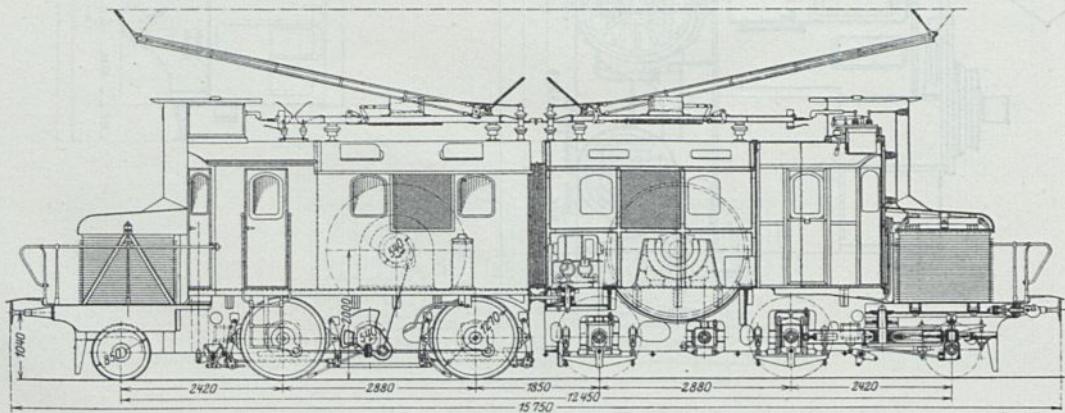


Abb. 471. Preußen, E.G. 509/10.

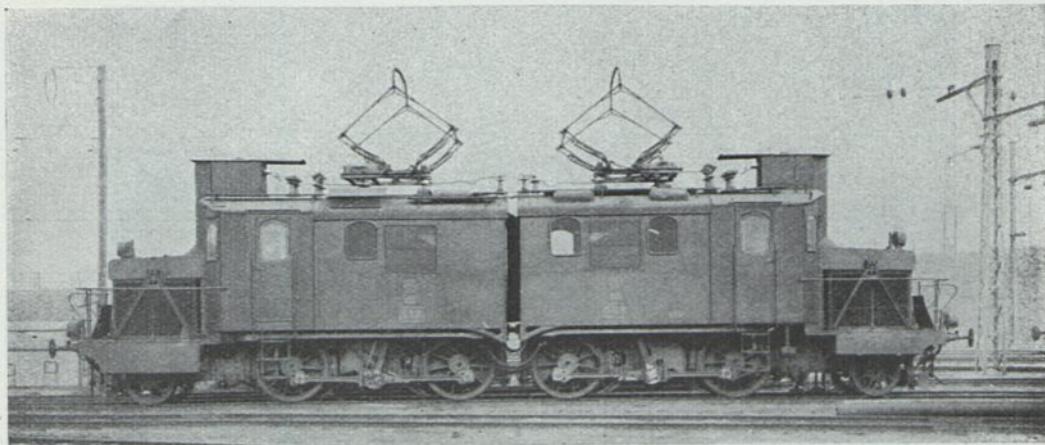


Abb. 471 a. Preußen, E.G. 509/10.

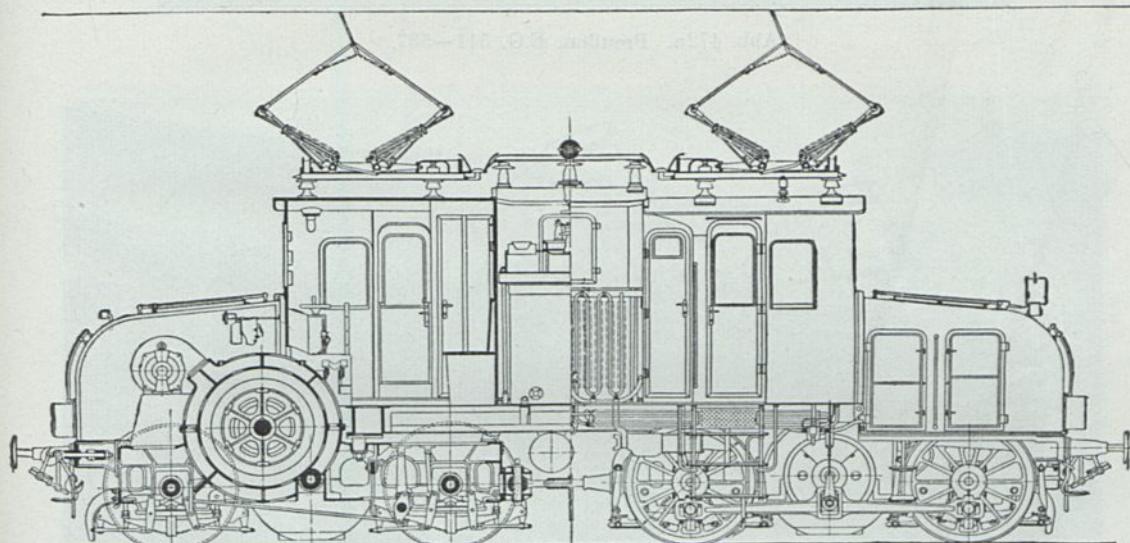


Abb. 472. Preußen, E.G. 511—537.

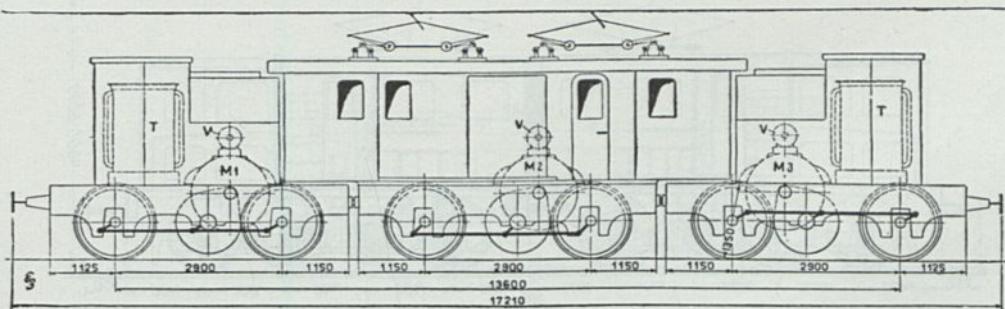


Abb. 473. Preußen, E.G. 538—550.

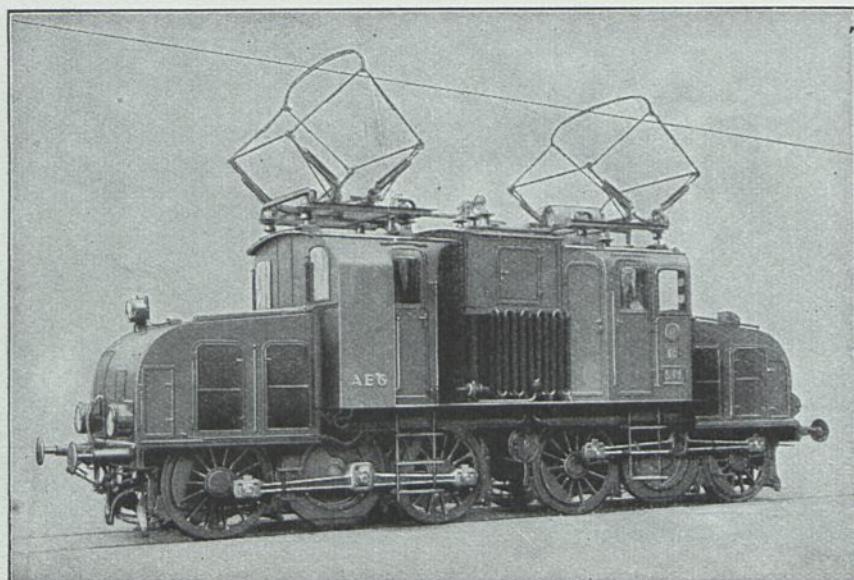


Abb. 472 a. Preußen, E.G. 511—537.

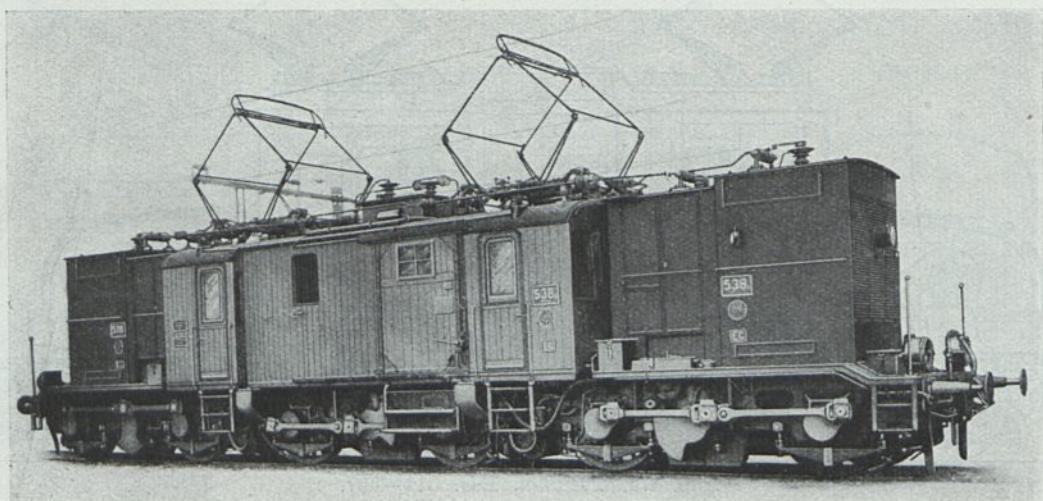


Abb. 473 a. Preußen, E.G. 538—550.

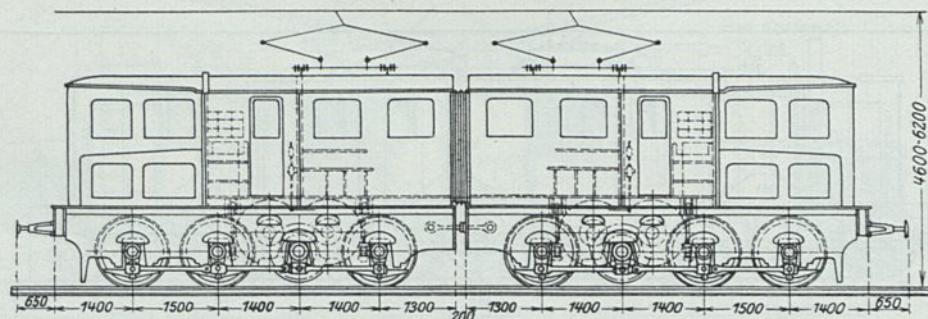


Abb. 474. Preußen, 551—552.

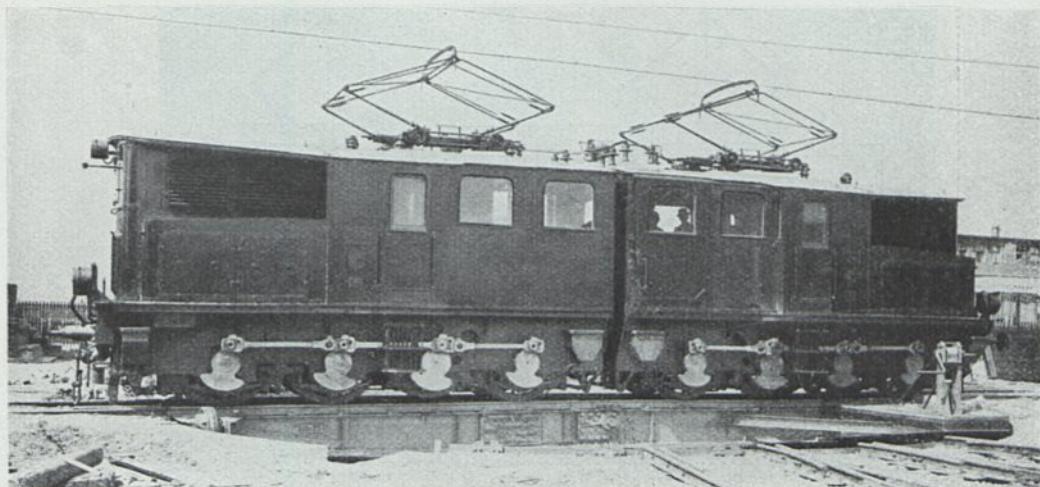


Abb. 474a. Preußen, 551—552.

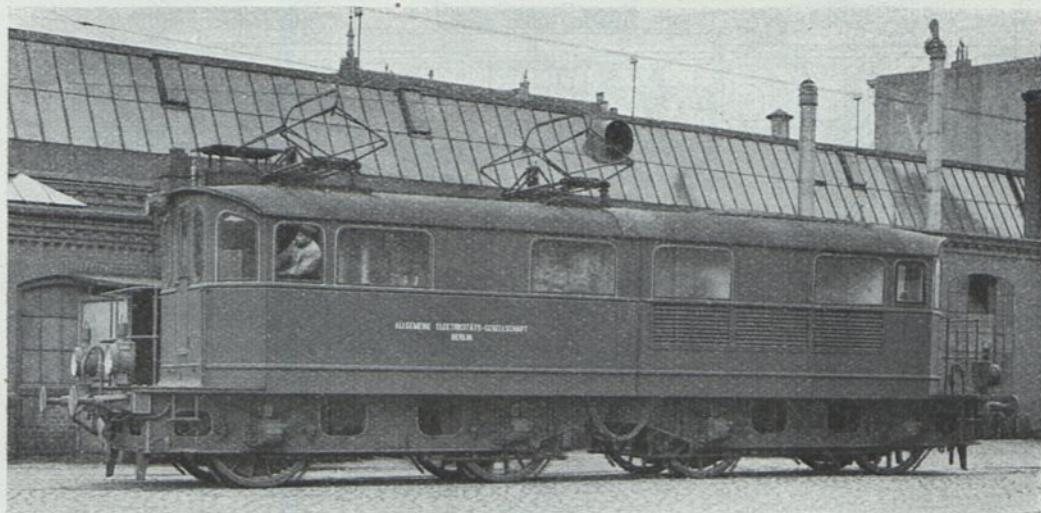


Abb. 475. Preußen, Oranienburg, 1908.

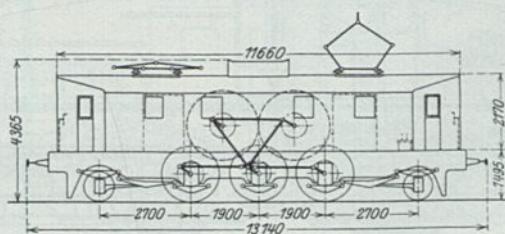


Abb. 476. Französische Südbahn, B.B.C. 1911.

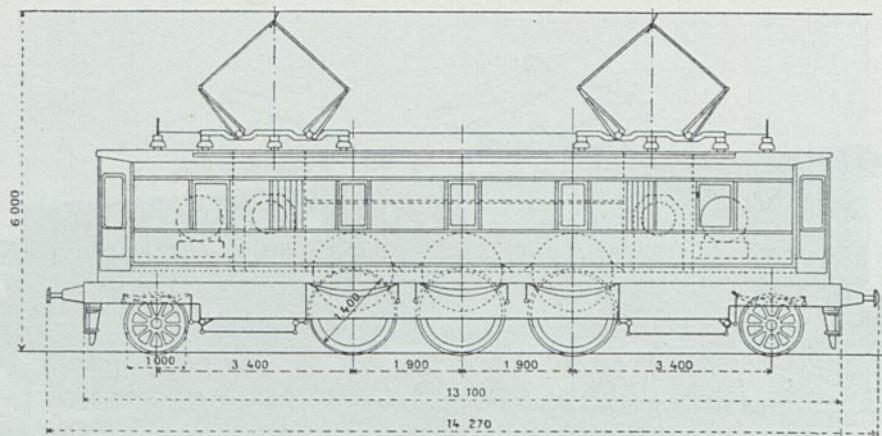


Abb. 477. Französische Südbahn, Jeumont, 1912.

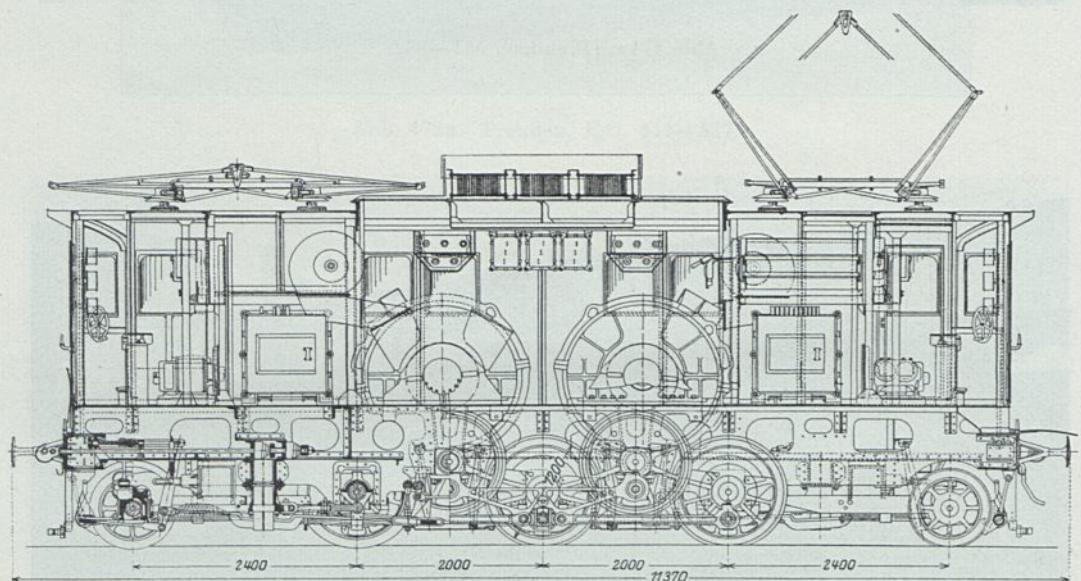


Abb. 478. Französische Südbahn, Westinghouse.

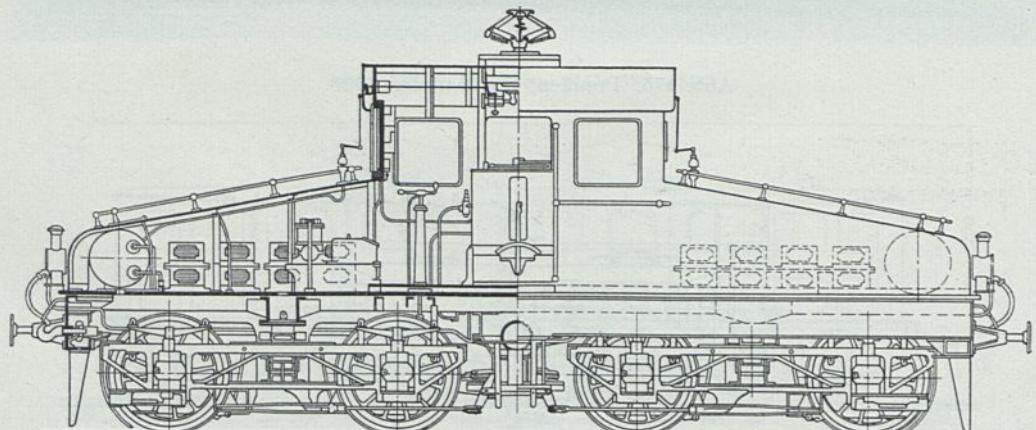


Abb. 479. Paris—Orléans, 1900.

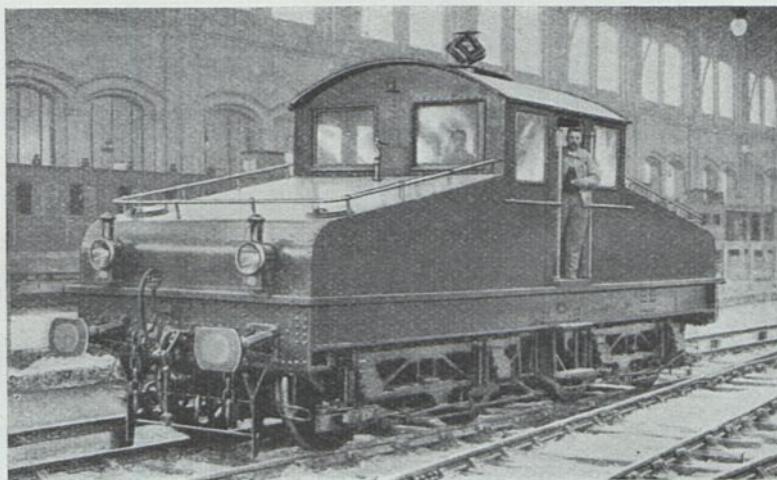


Abb. 479 a. Paris—Orléans, 1900.

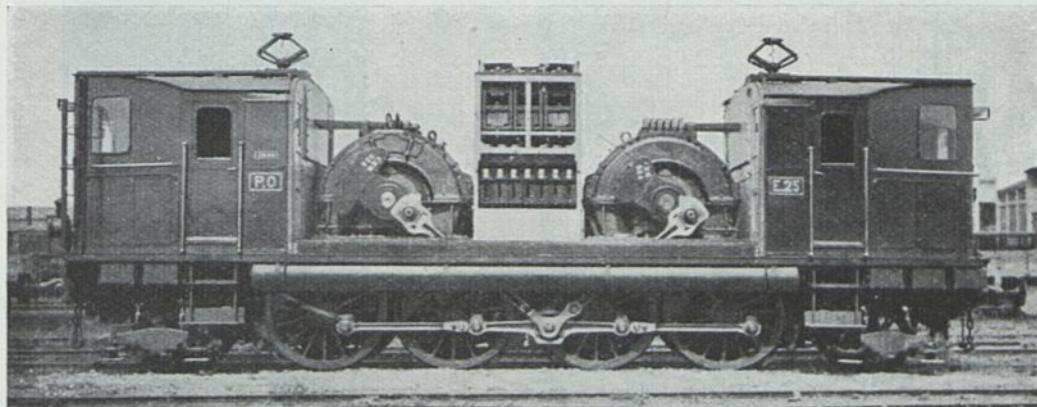


Abb. 480. Paris—Orléans, 1918.

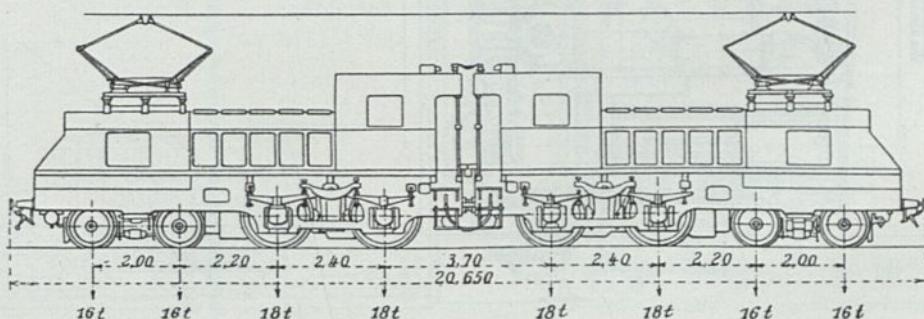


Abb. 481. Paris—Lyon—Méditerranée.

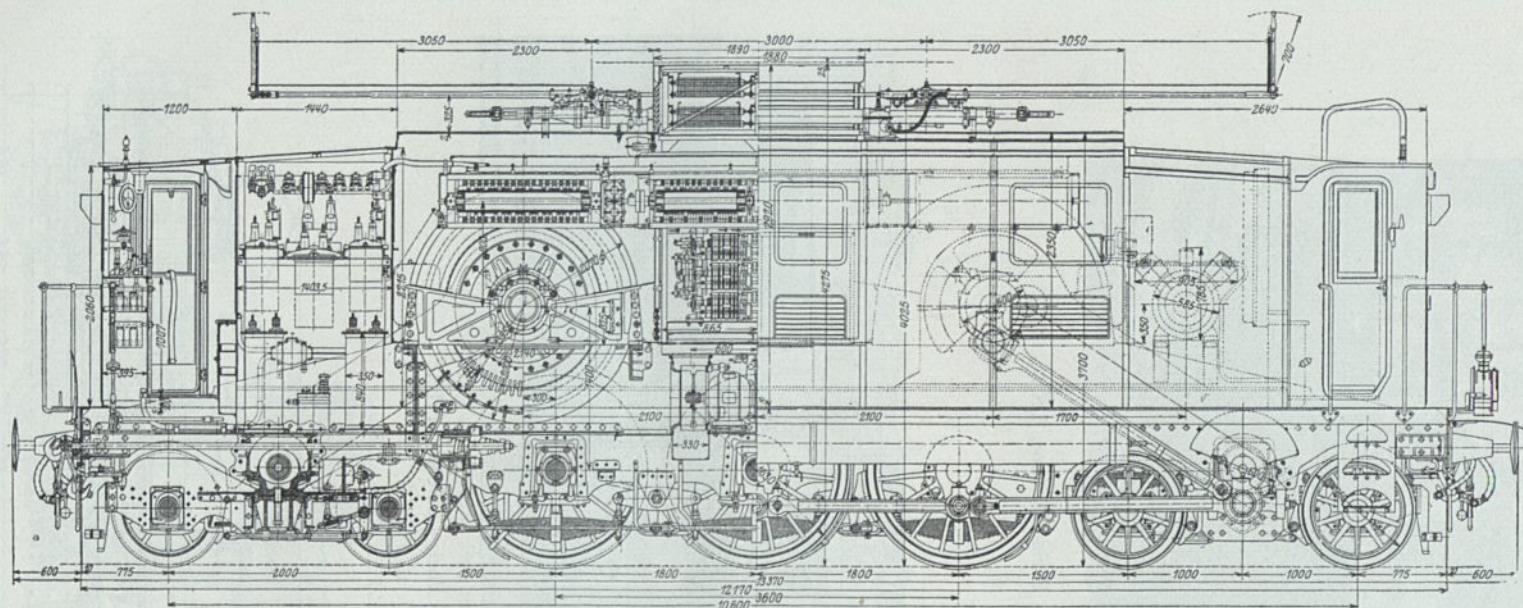


Abb. 482. Italien, 1918, Gr. 33.

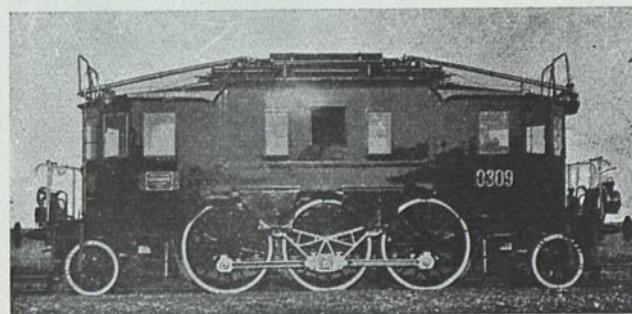


Abb. 483 a. Italien, 1915, Gr. 30.

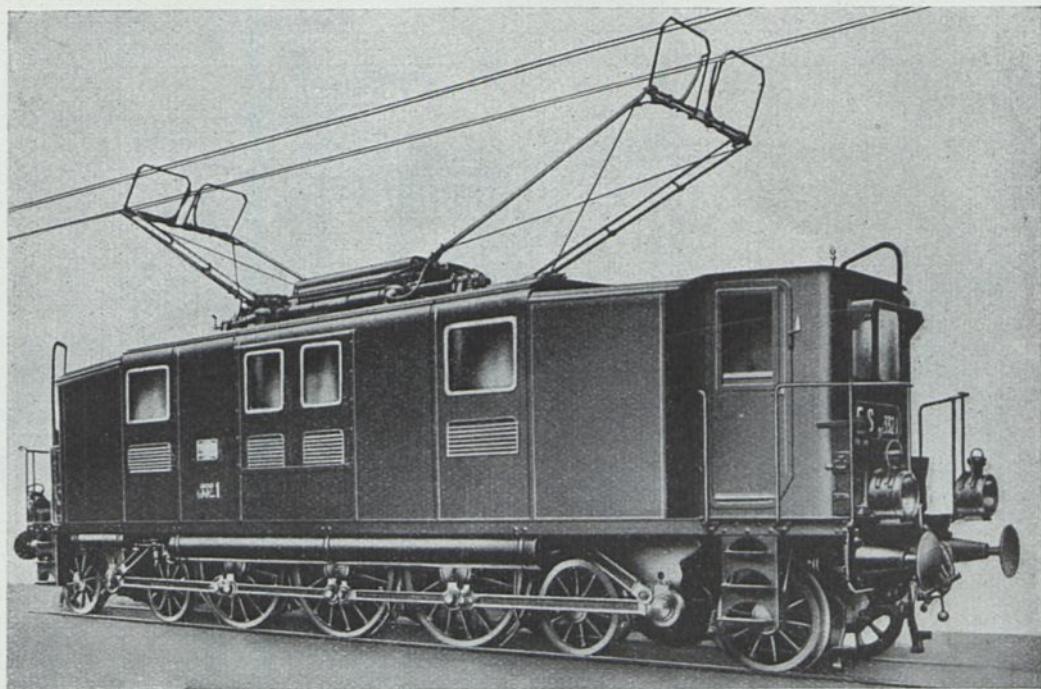


Abb. 482 a. Italien, 1918, Gr. 33.

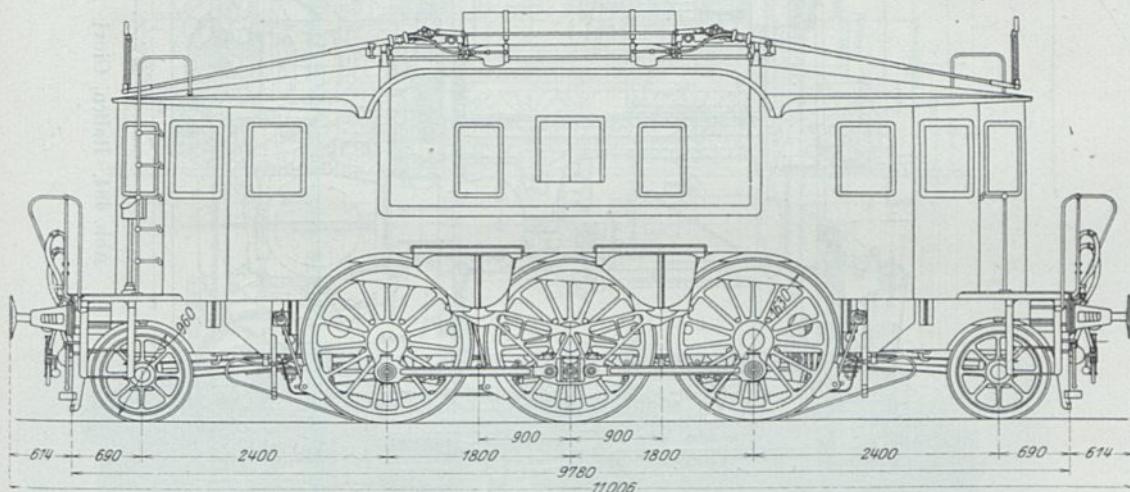


Abb. 483. Italien, 1915, Gr. 30.

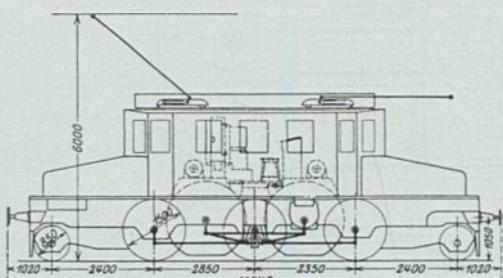


Abb. 485. Italien, Valtellina, 1906, Gr. 38.

Seefehlner, Elektr. Zugförderung.

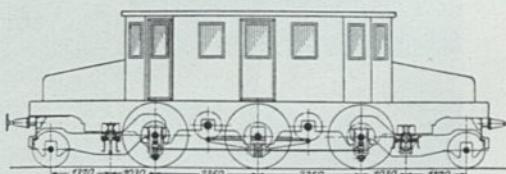


Abb. 486. Italien, Valtellina, 1903, Gr. 36.

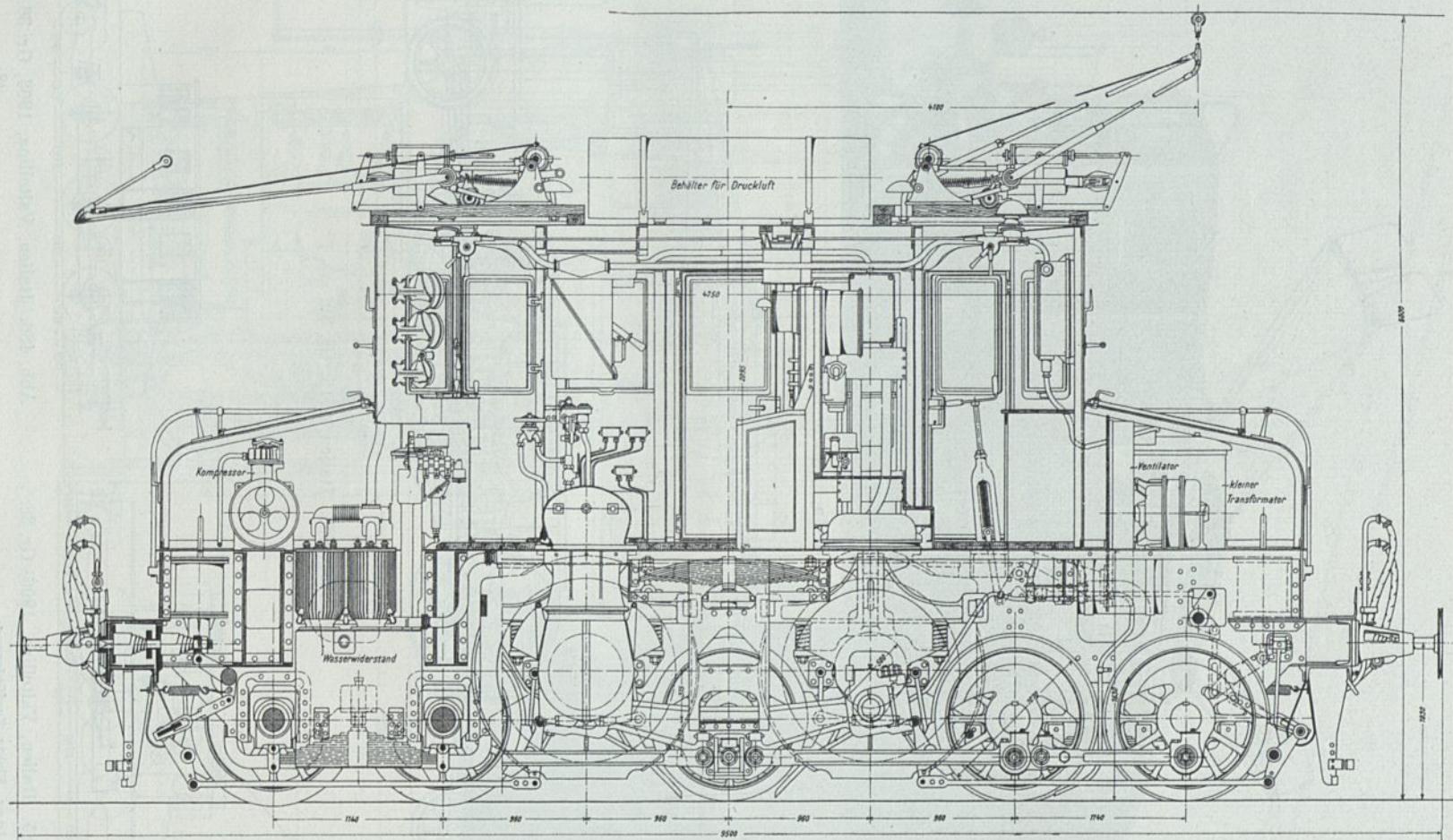


Abb. 484. Italien, Giovi, 1909, Gr. 50.

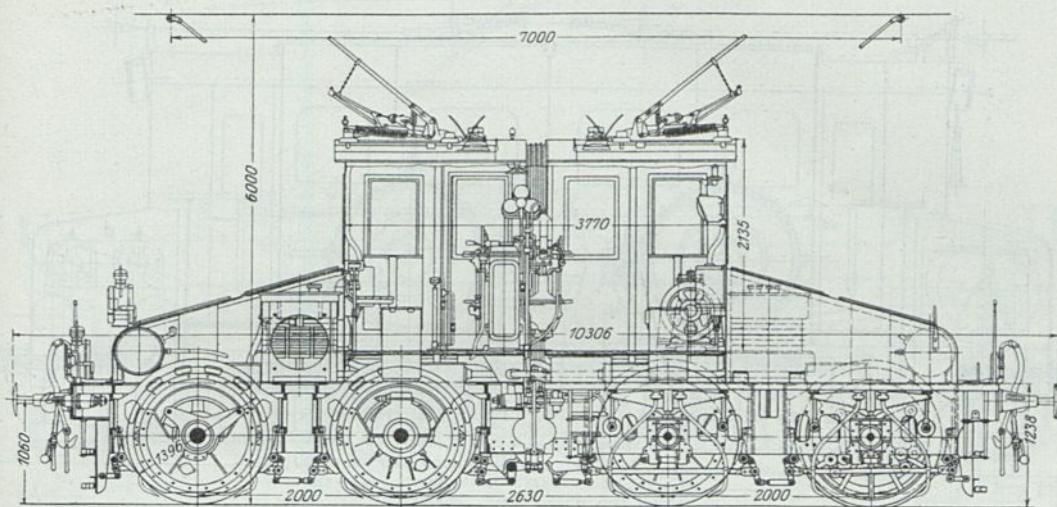


Abb. 487. Italien, Valtellina, 1902, Gr. 34.

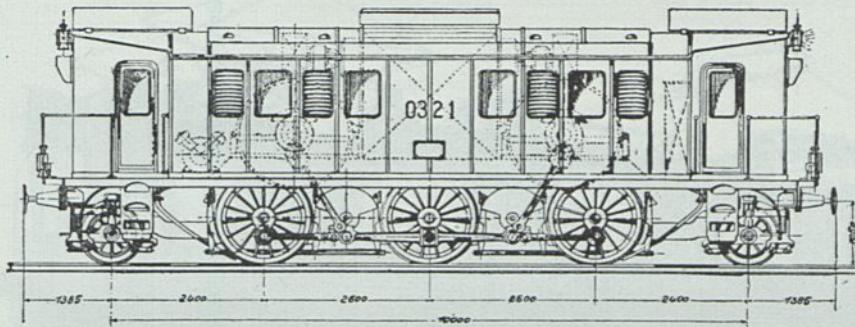


Abb. 488. Italien, Varesina, 1913, Gr. 32.

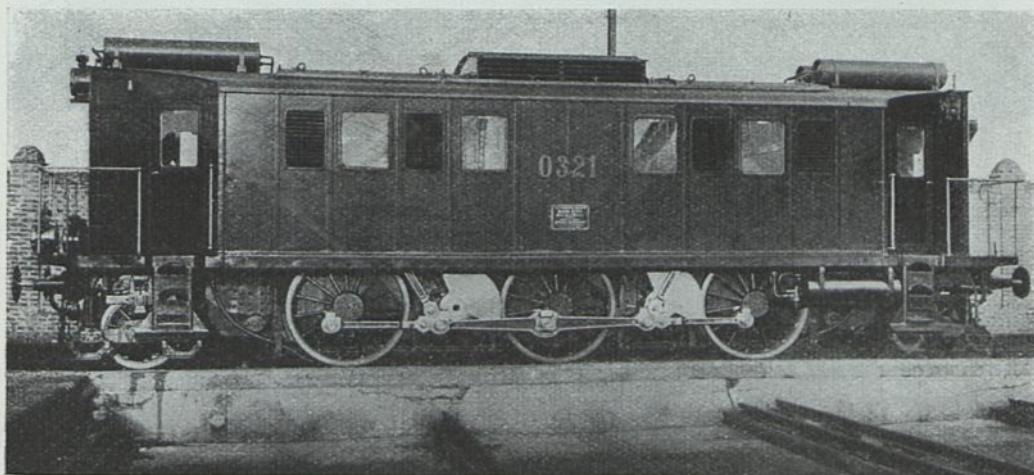


Abb. 488a. Italien, Varesina, 1913, Gr. 32.

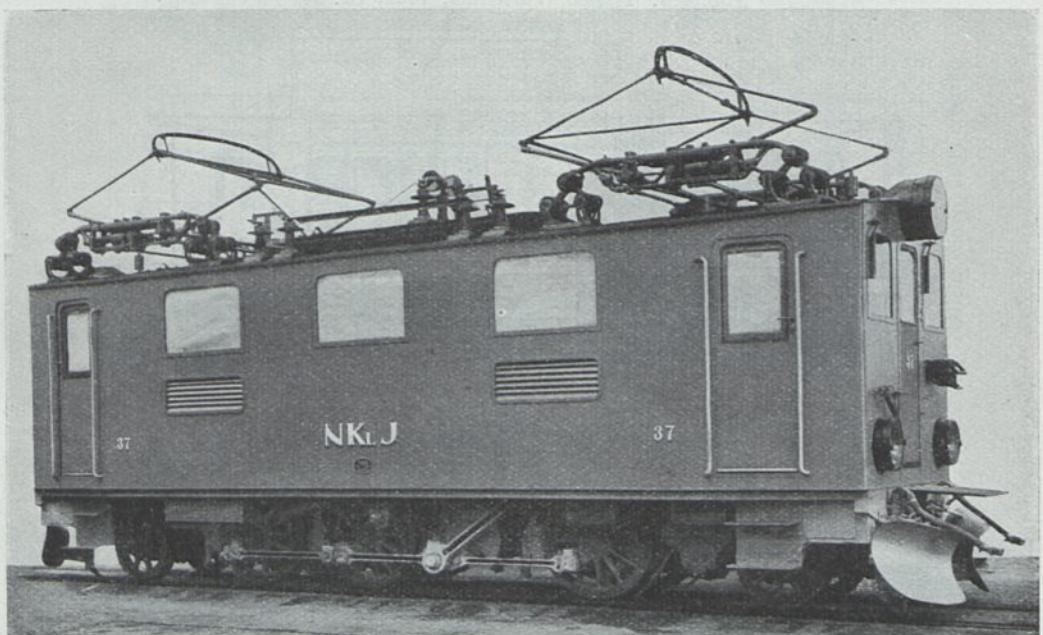
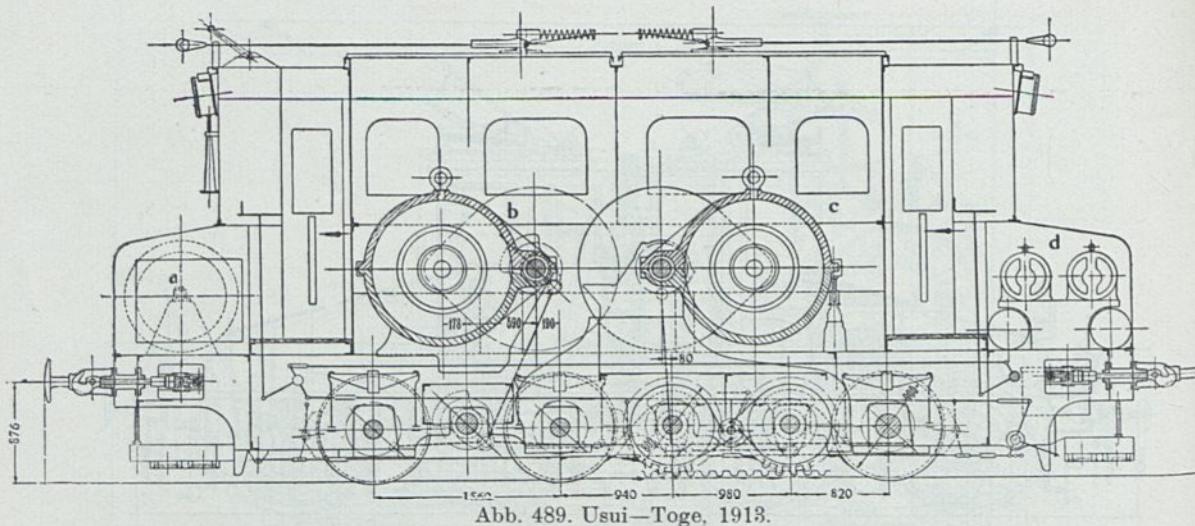


Abb. 490. Nordmark, 1920.

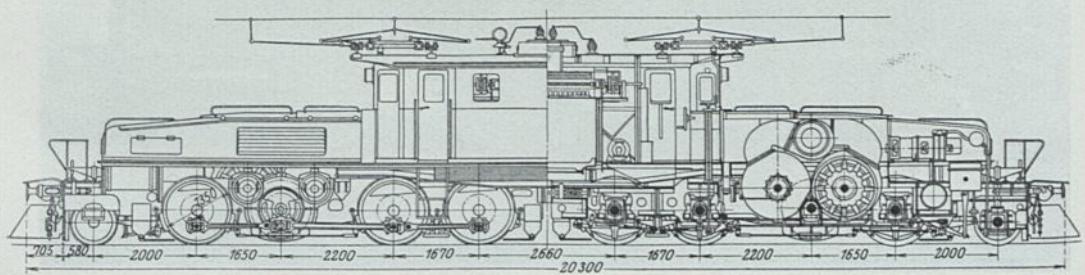


Abb. 493. Oesterreich, Arlberg, B.B.C., 1922.

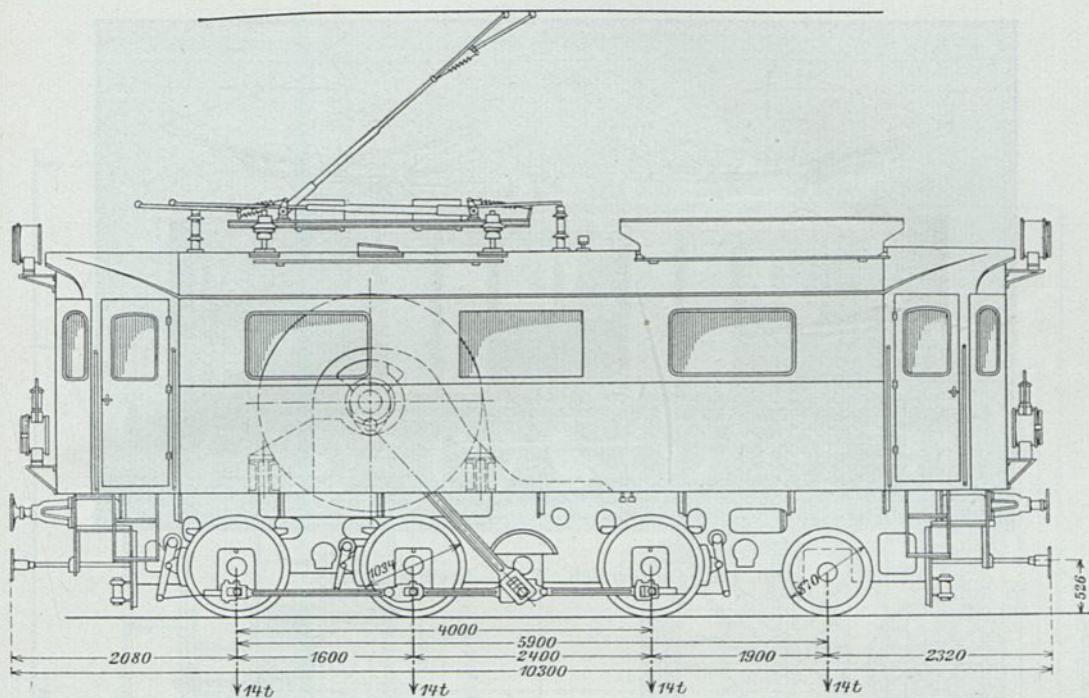


Abb. 491: Oesterreich, Mittenwald, 1912. Wien—Preßburg, 1914.

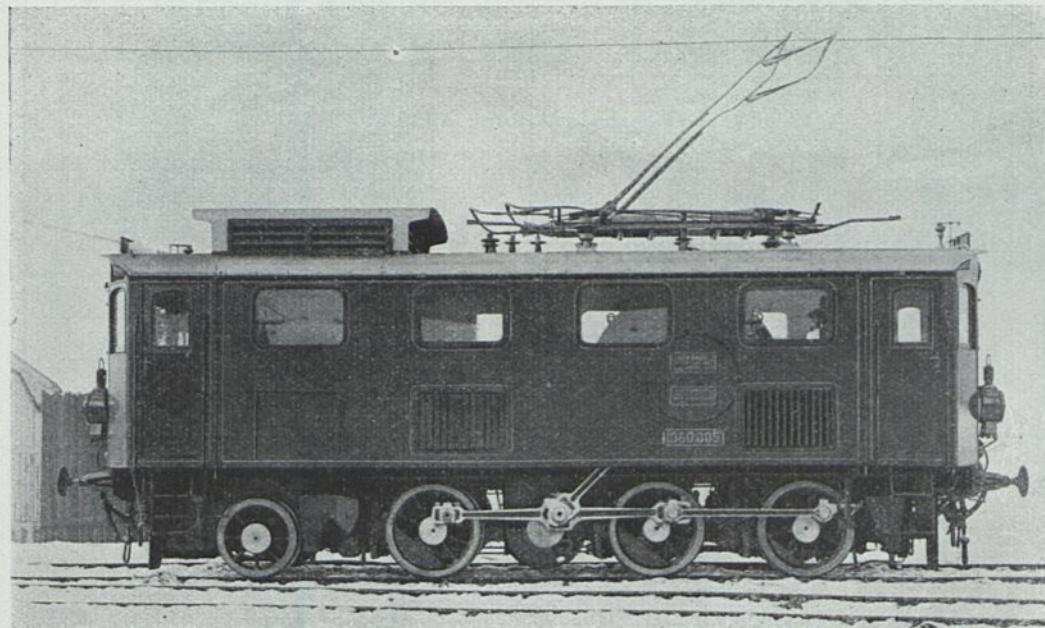


Abb. 491a. Oesterreich, Mittenwald, 1912. Wien—Preßburg, 1914.

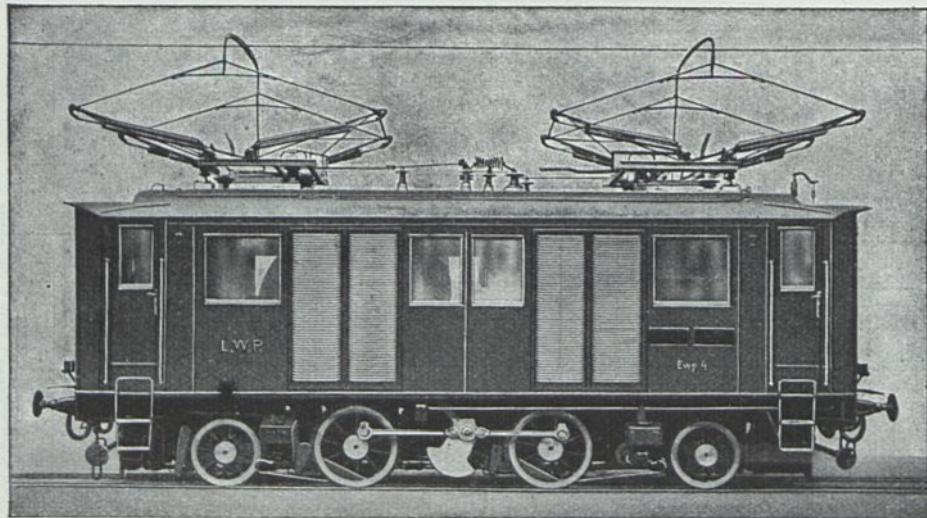


Abb. 492. Oesterreich, Wien—Preßburg, 1914.

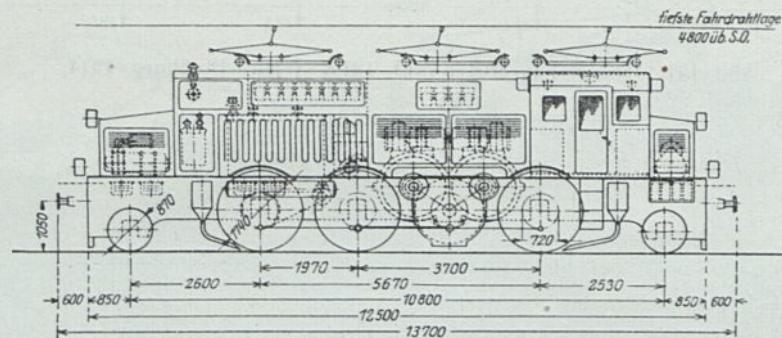


Abb. 494. Oesterreich, Arlberg, A.E.G.U. 1922.

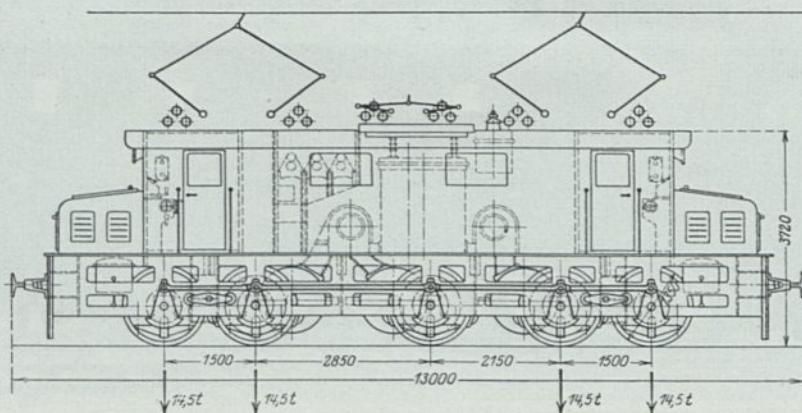


Abb. 495. Oesterreich, Arlberg, O.S.S.W. 1922.

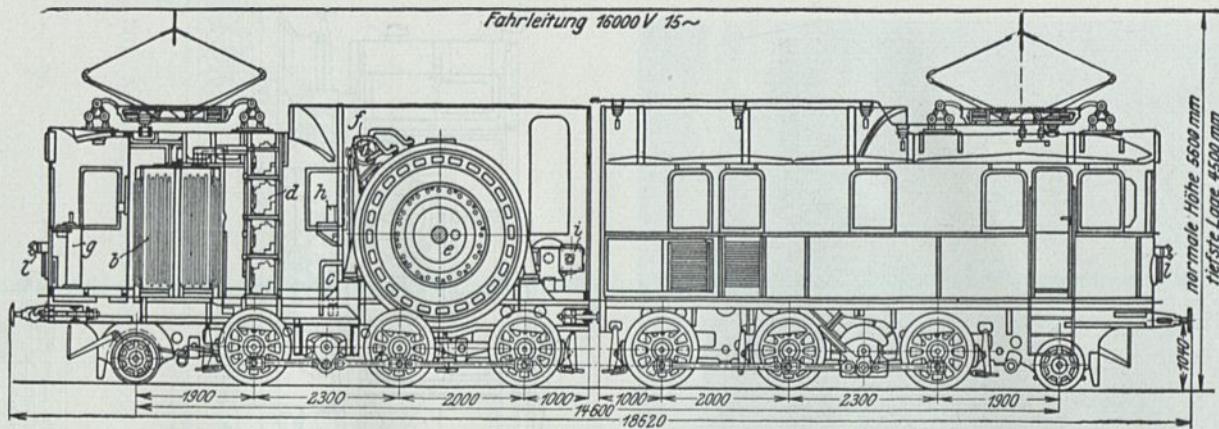


Abb. 497. Schweden, Riksgränsen, G.O.

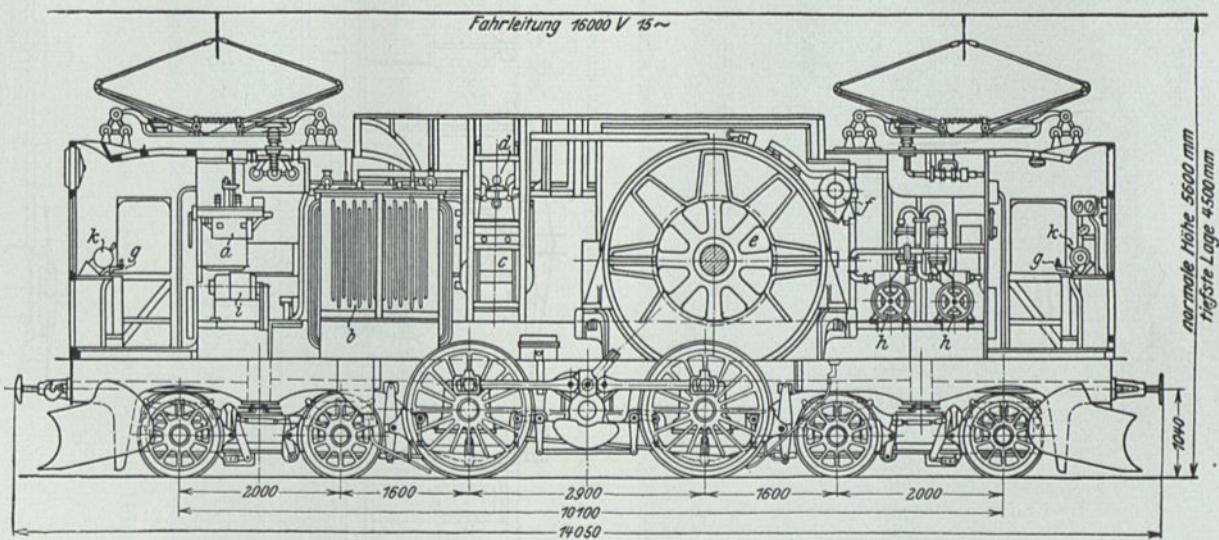


Abb. 498. Schweden, Riksgränsen, P.

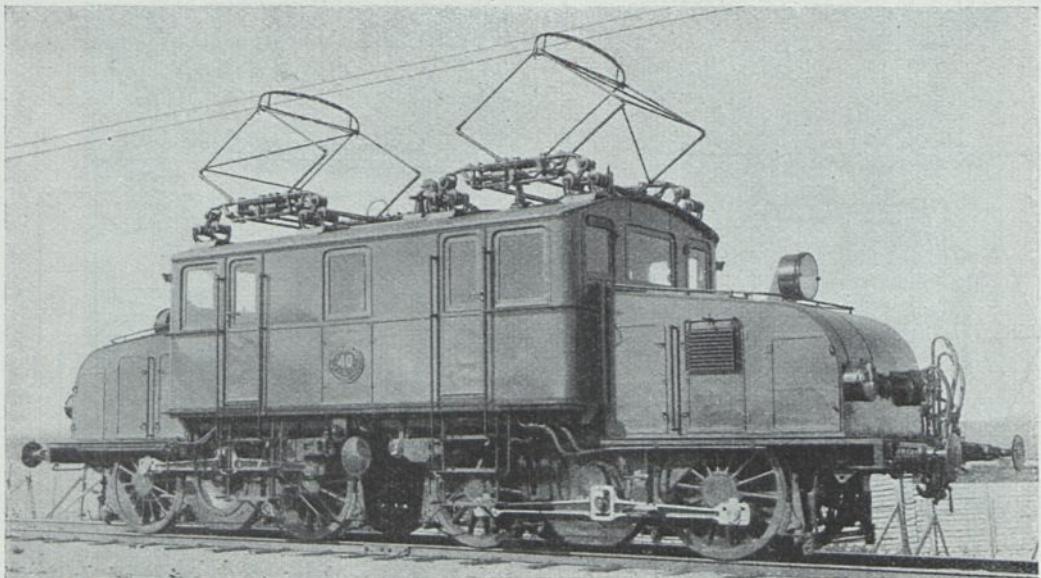


Abb. 496a. Schweden, Riksgränsen, 1920.

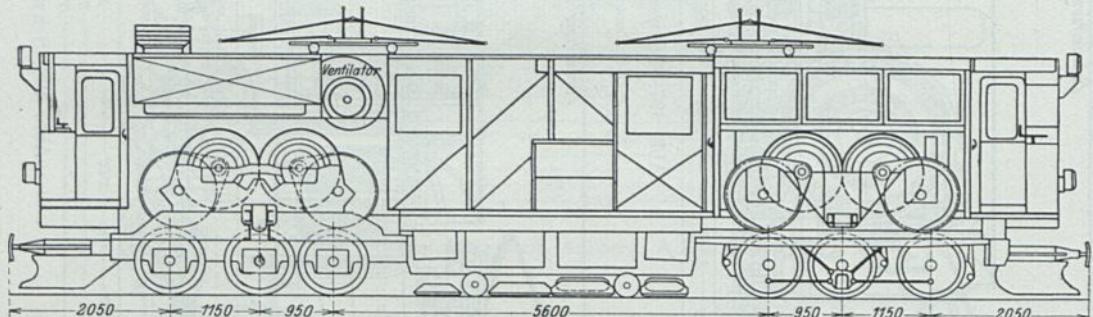


Abb. 499. Schweiz, Bernina, 1917.

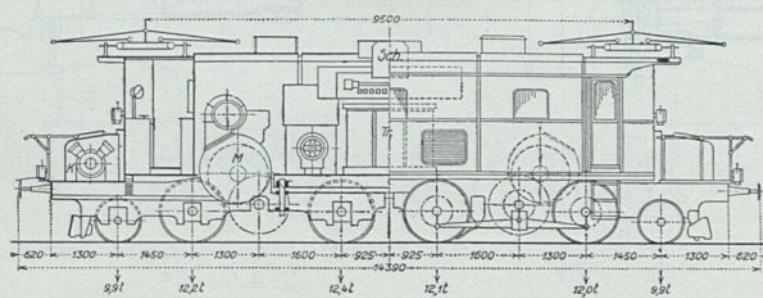


Abb. 500. Schweiz, Bernische Dekretsbahnen.

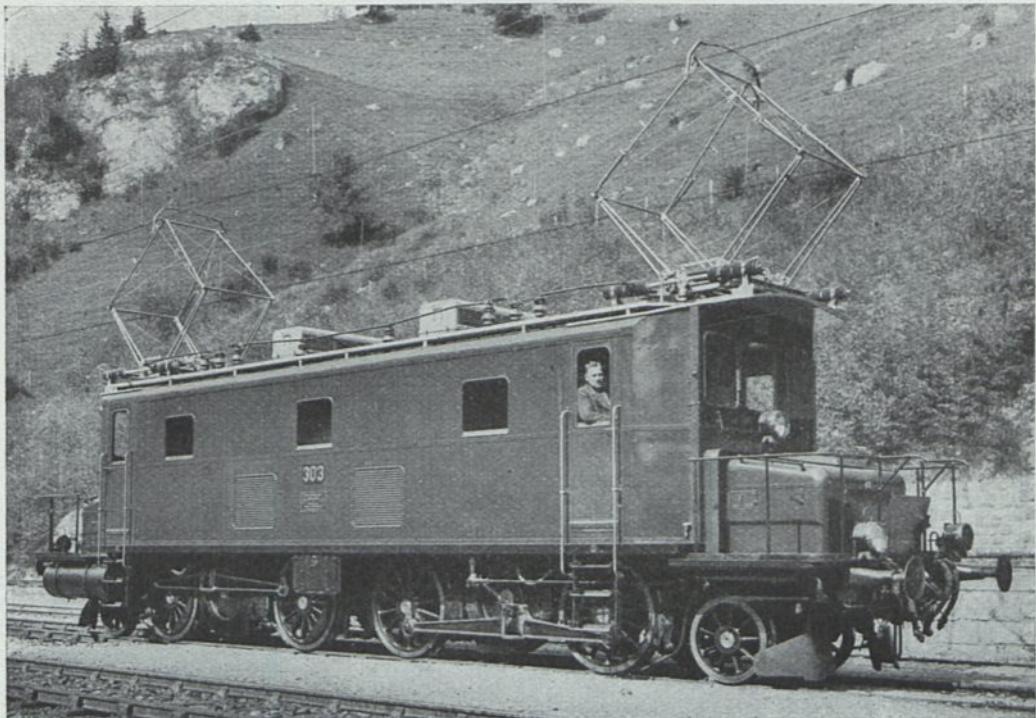


Abb 500a. Schweiz, Bernische Dekretsbahnen.

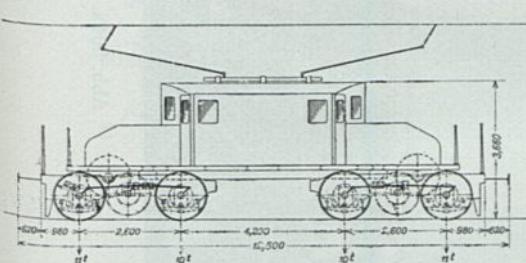


Abb. 501. Schweiz, Burgdorf—Thun, 1918.

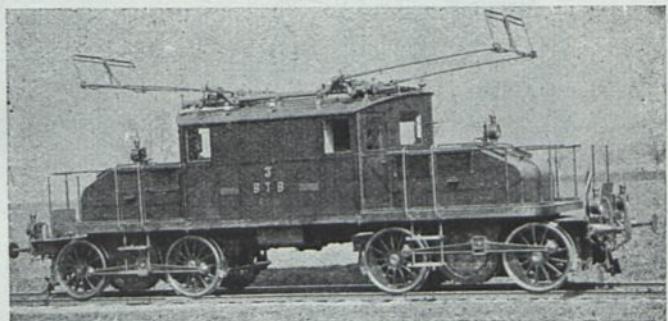


Abb. 501a. Schweiz, Burgdorf—Thun, 1910.

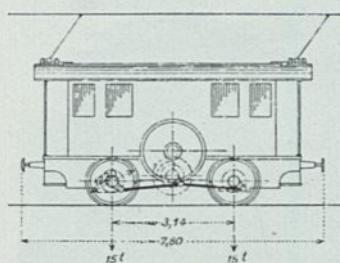


Abb. 502. Schweiz, Burgdorf—Thun, 1899.

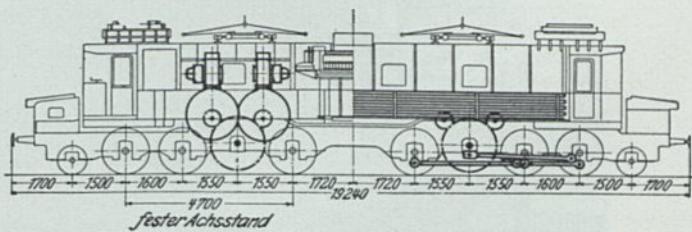


Abb. 503. Schweiz, Gotthard, R. 14 201.

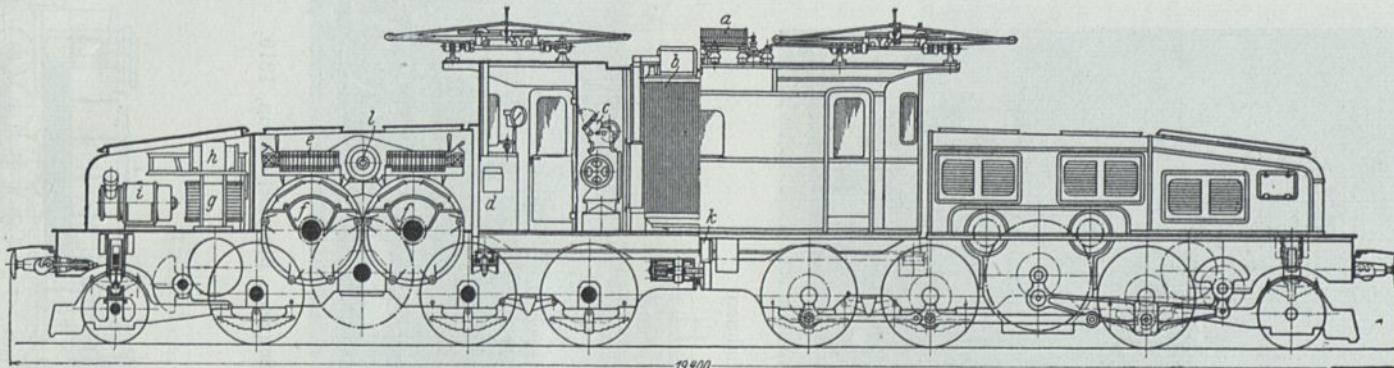


Abb. 504. Schweiz, Gotthard, 1919, R. 12251.

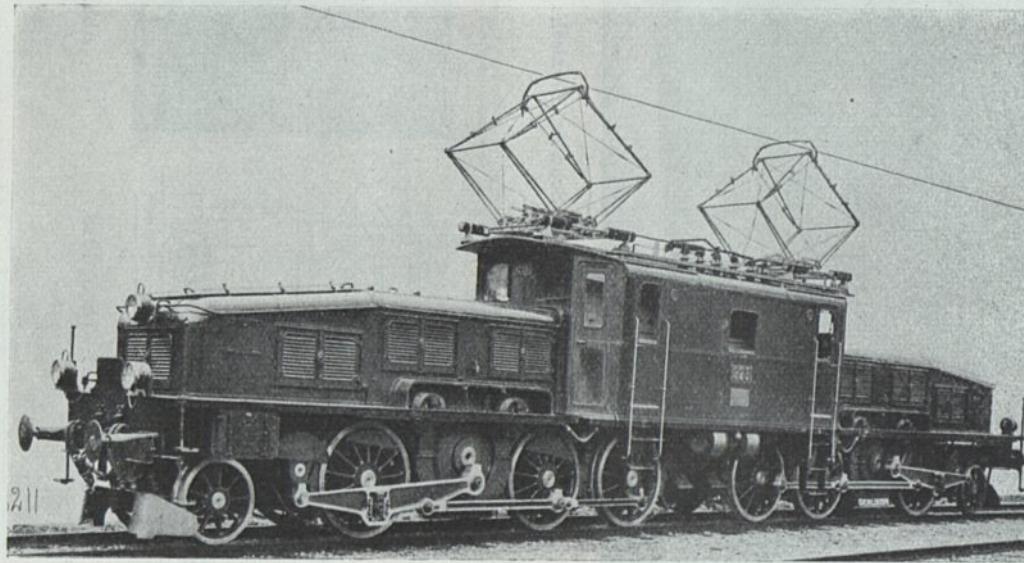


Abb. 504a. Schweiz, Gotthard, 1919, R. 12251.

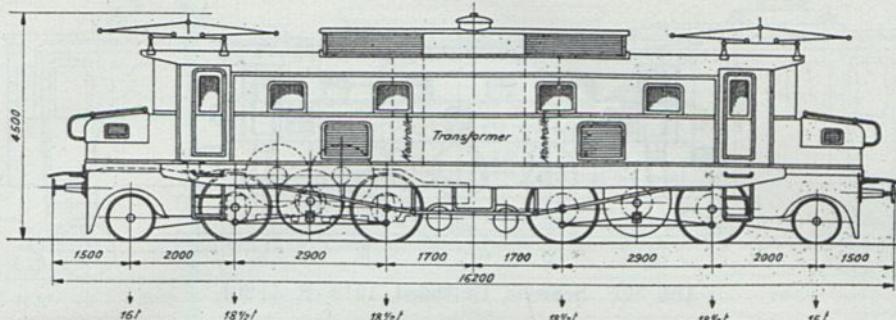


Abb. 505. Schweiz, Gotthard, 1920, R. 11301.

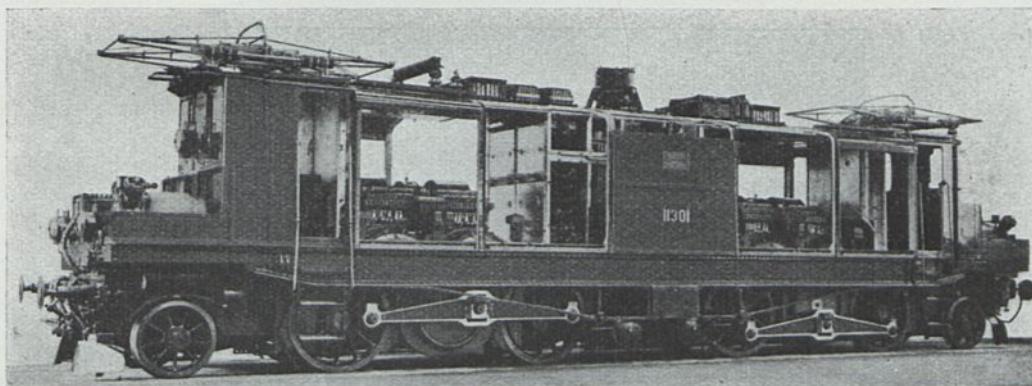


Abb. 505a. Schweiz, Gotthard, 1920, R. 11301.

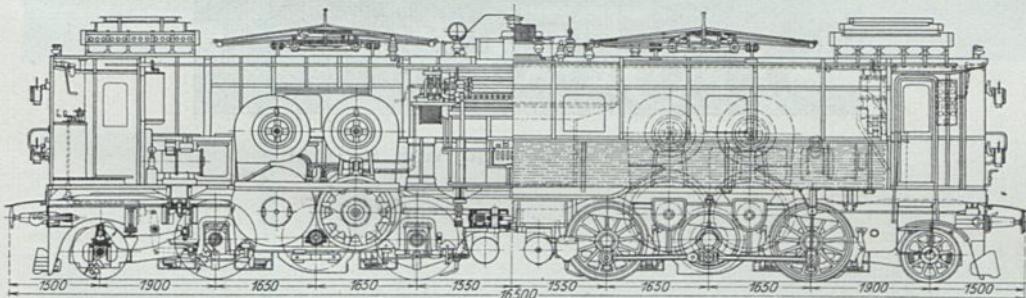


Abb. 506. Schweiz, Gotthard, 1919, R. 11302.

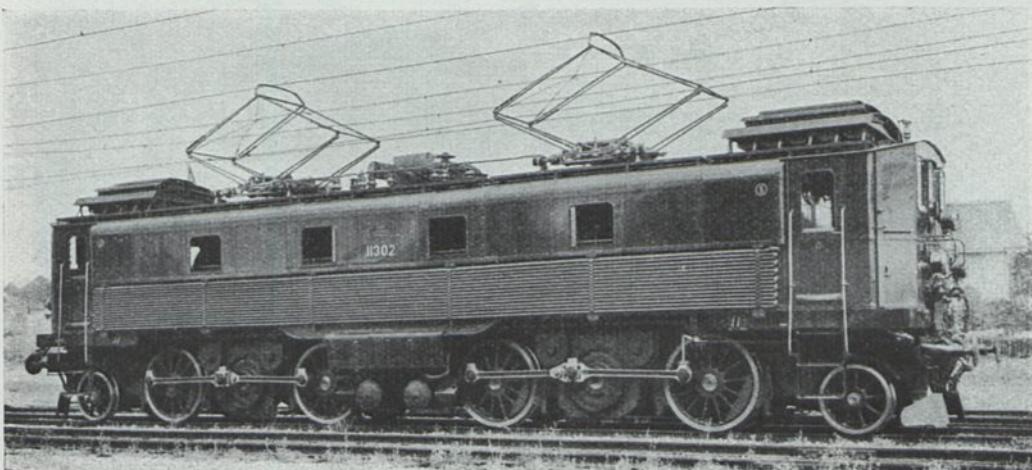


Abb. 506a. Schweiz, Gotthard, 1919, R. 11302.

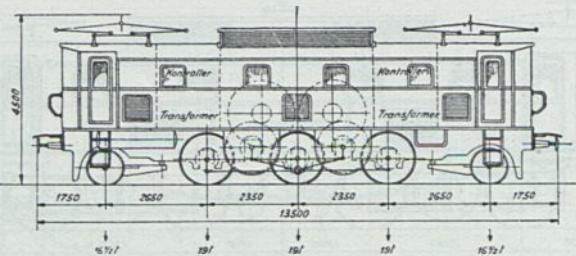


Abb. 507. Schweiz, Gotthard, 1919, R. 11201.

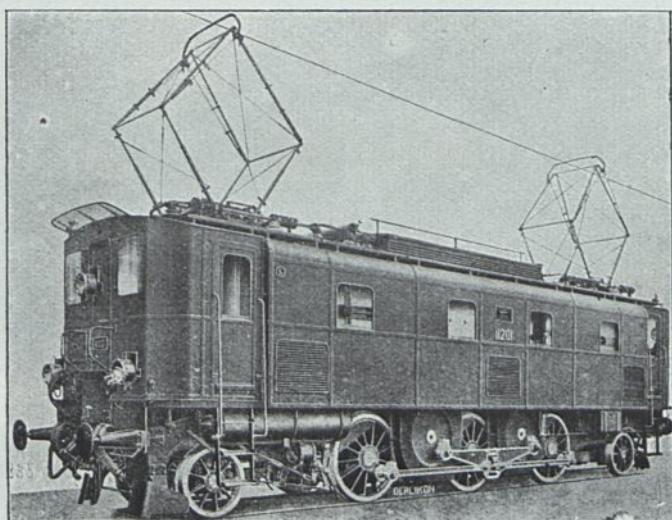


Abb. 507a. Schweiz, Gotthard, 1919, R. 11201.

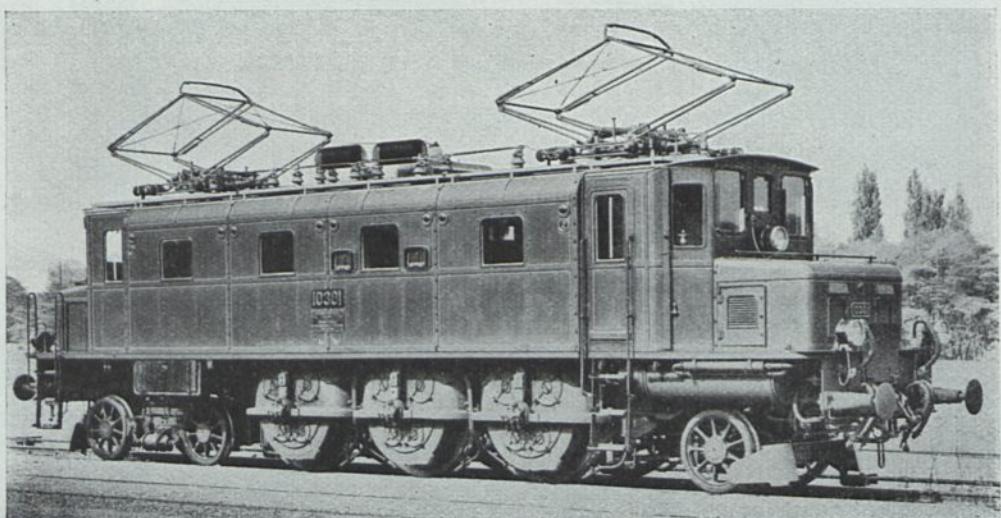


Abb. 508. Schweiz, B.B., R. 10301.

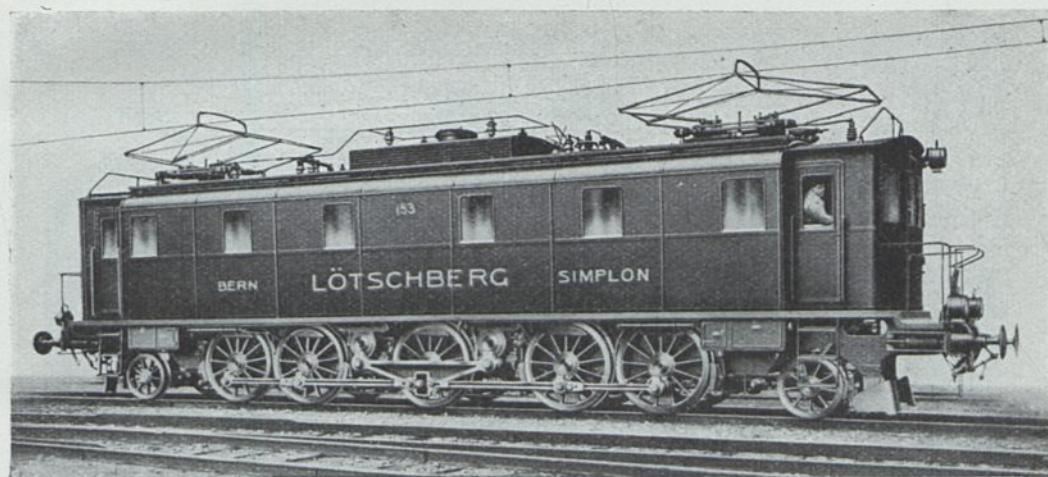
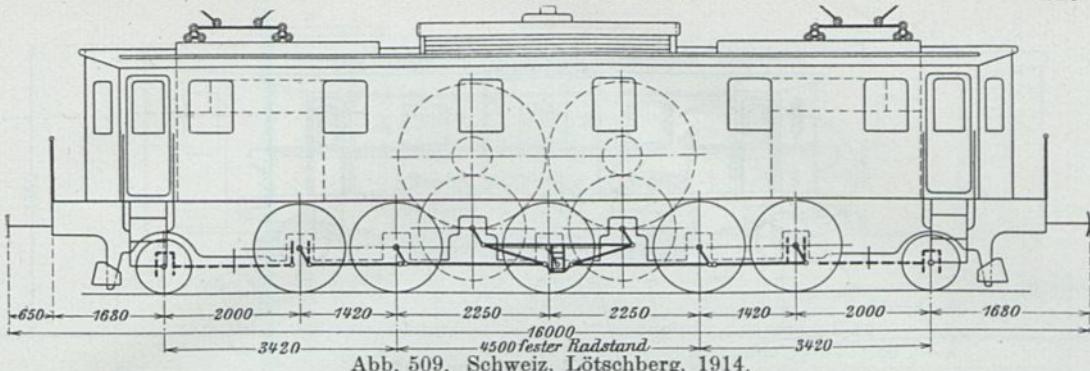


Abb. 509a. Schweiz, Lötschberg, 1914.

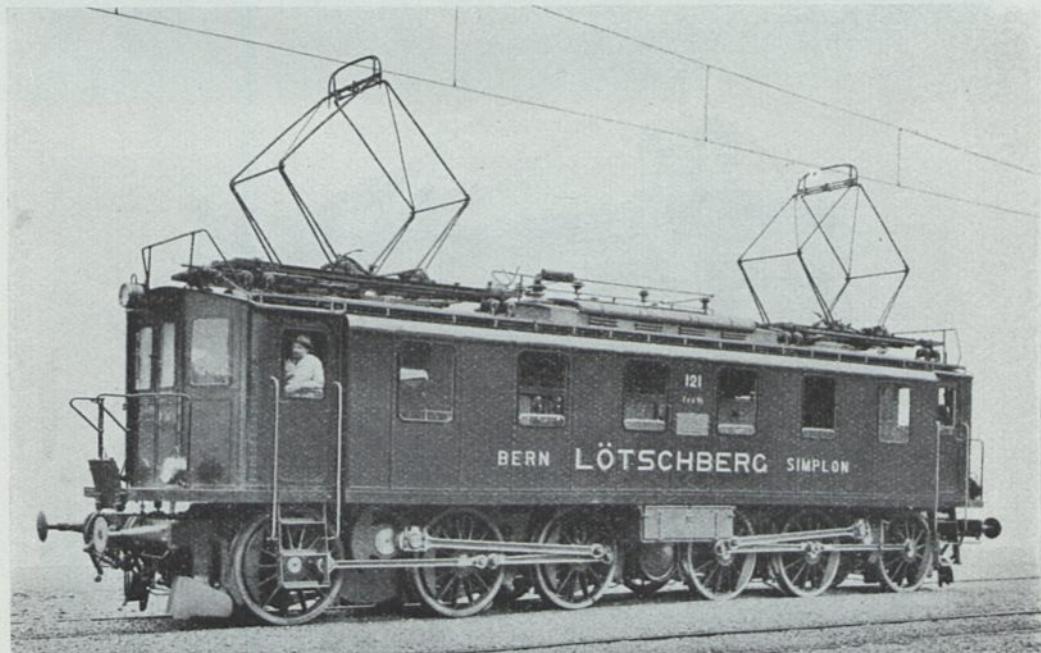


Abb. 510. Schweiz, Lötschberg, 1910.

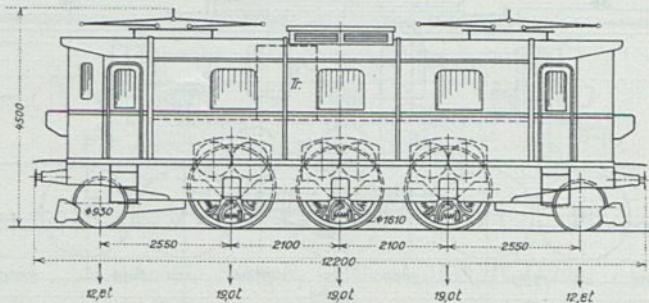


Abb. 511. S.B.B., Secheron, 1921.

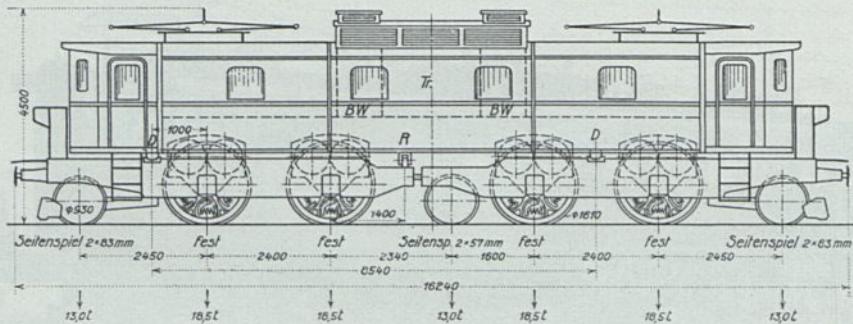


Abb. 512. S.B.B., Secheron, 1921.

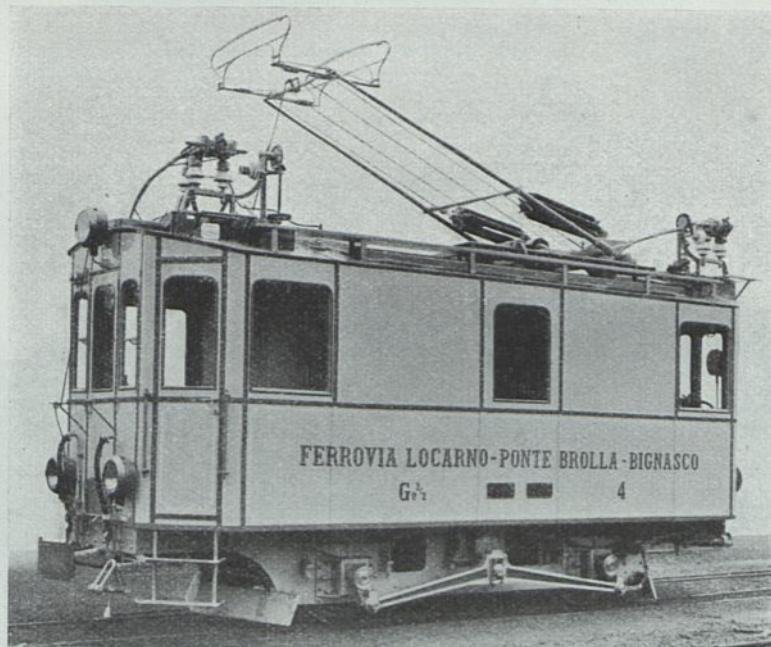


Abb. 513. Schweiz, Valle Maggia.

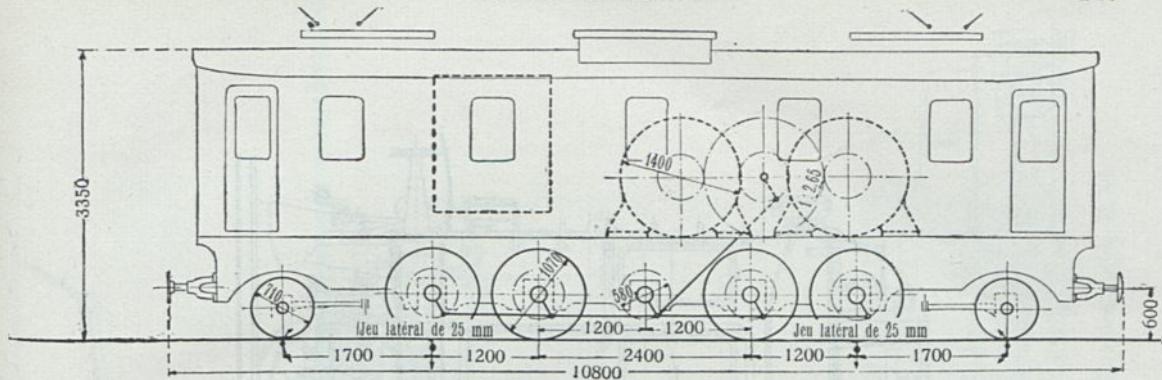


Abb. 514. Rhätische Bahn, R. 391.

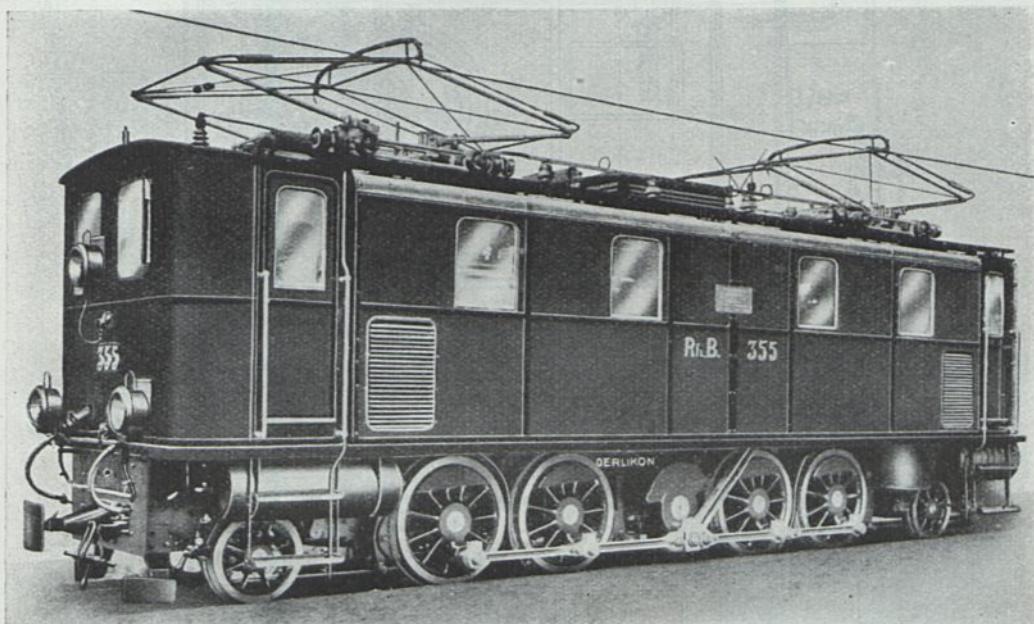


Abb. 515. Rhätische Bahn, R. 355.

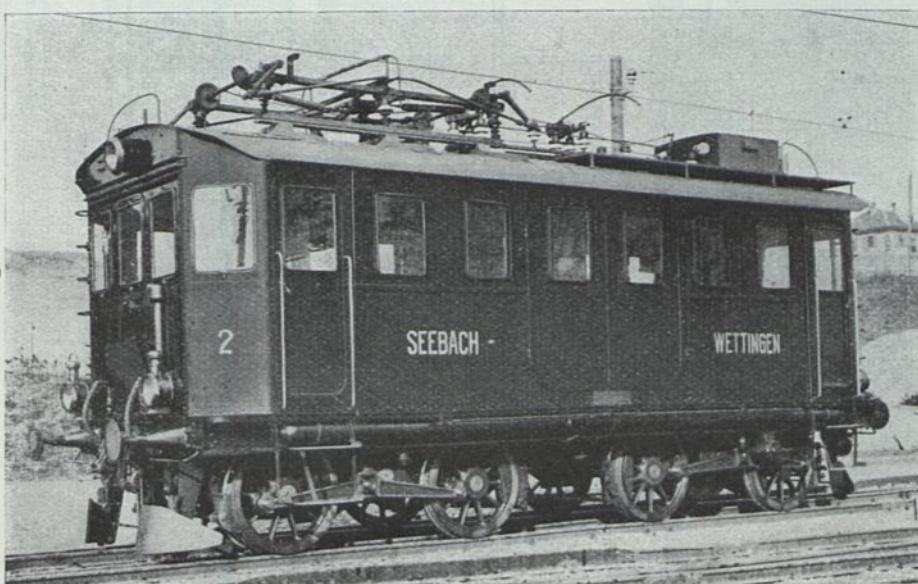


Abb. 516a. Seebach—Wettingen, Nr. 2.

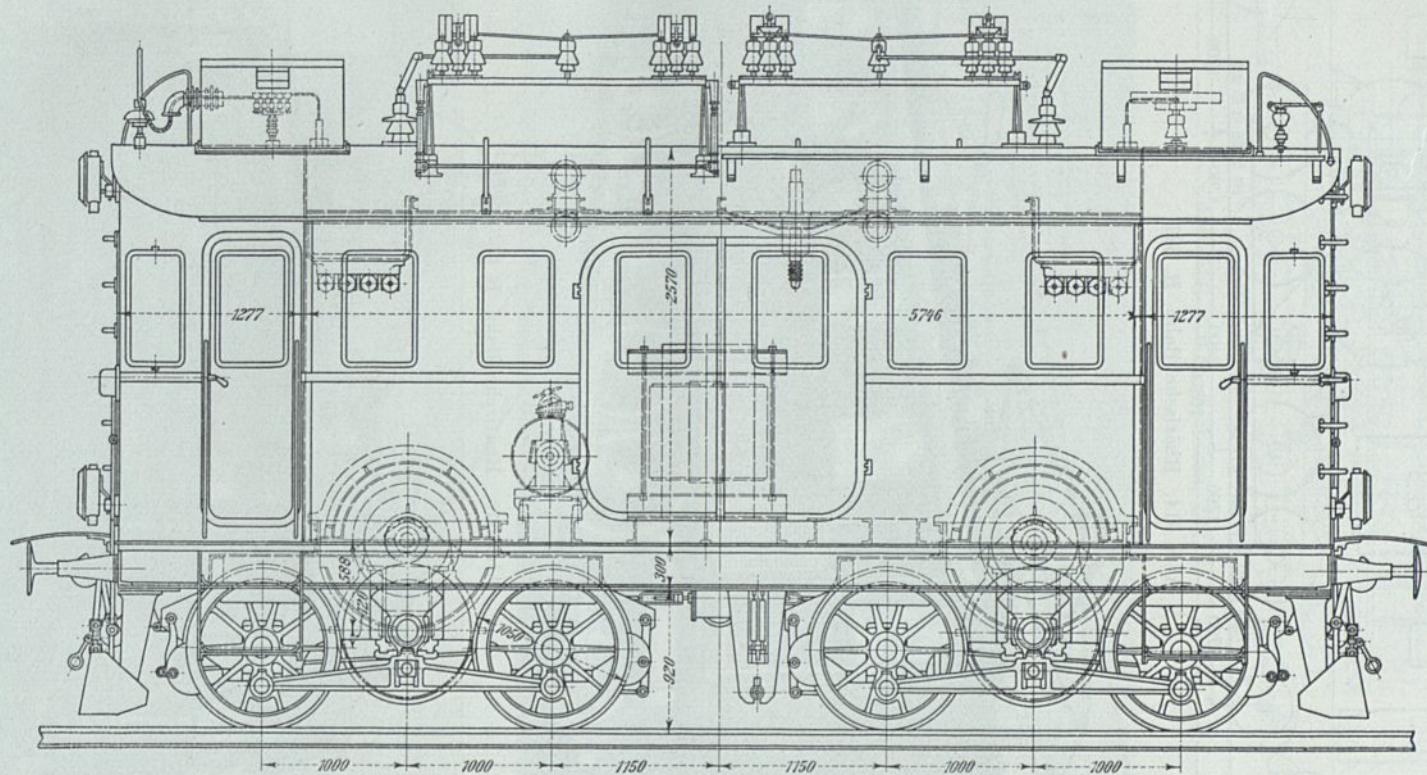


Abb. 516. Seebach—Wettingen, Nr. 2.

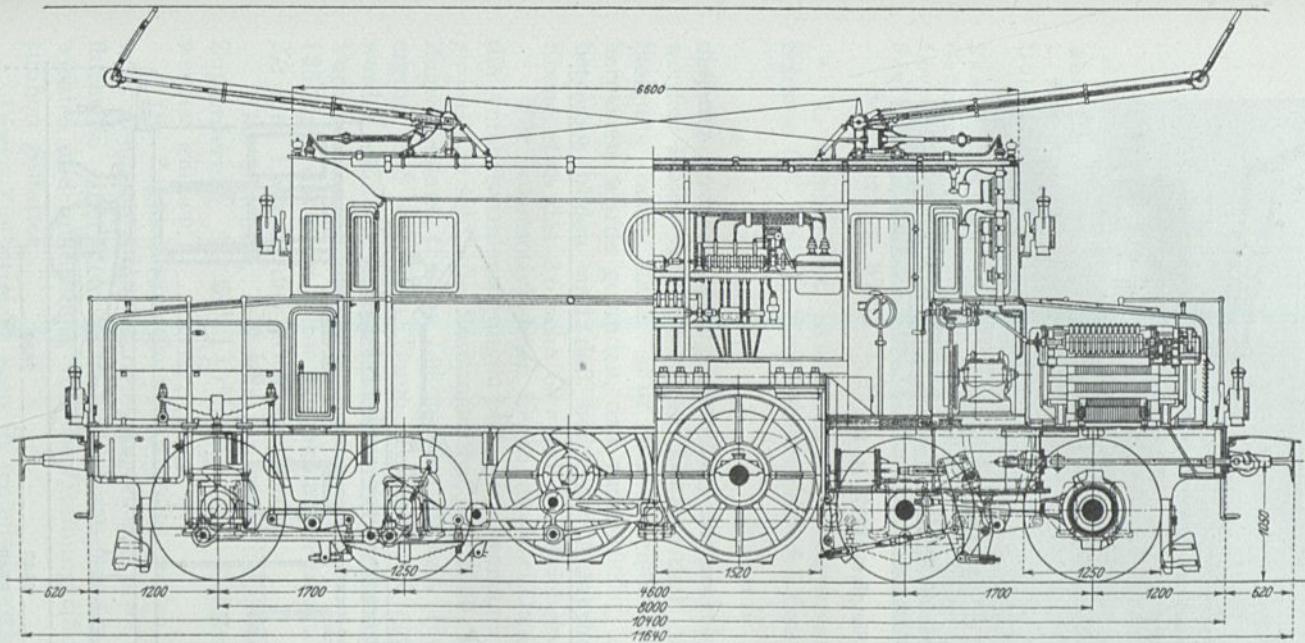


Abb. 518. Simplon, 1907.

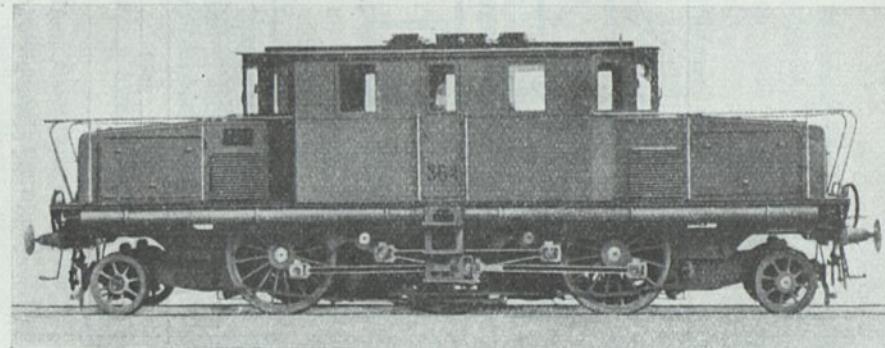


Abb. 517. Simplon, 1906, R. 36.

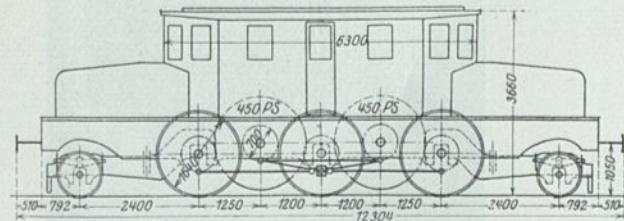


Abb. 516a. Simplon, 1906, R. 36.

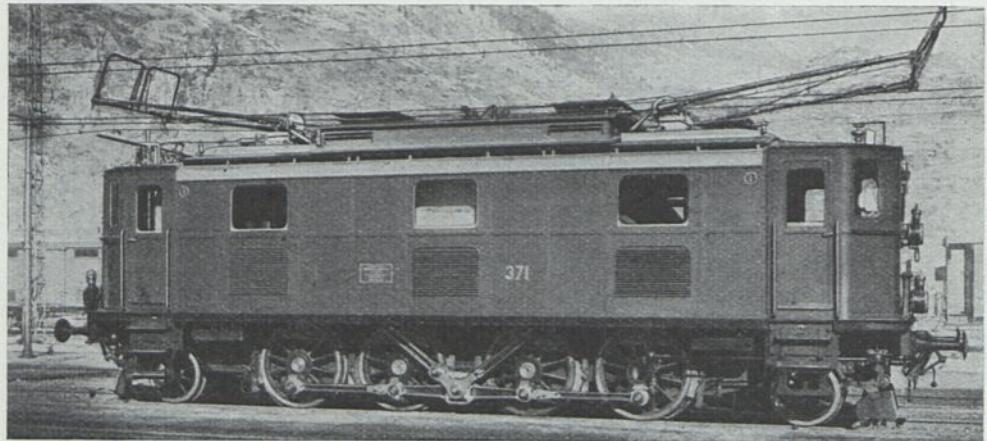


Abb. 519. Simplon, 1917, R. 37.

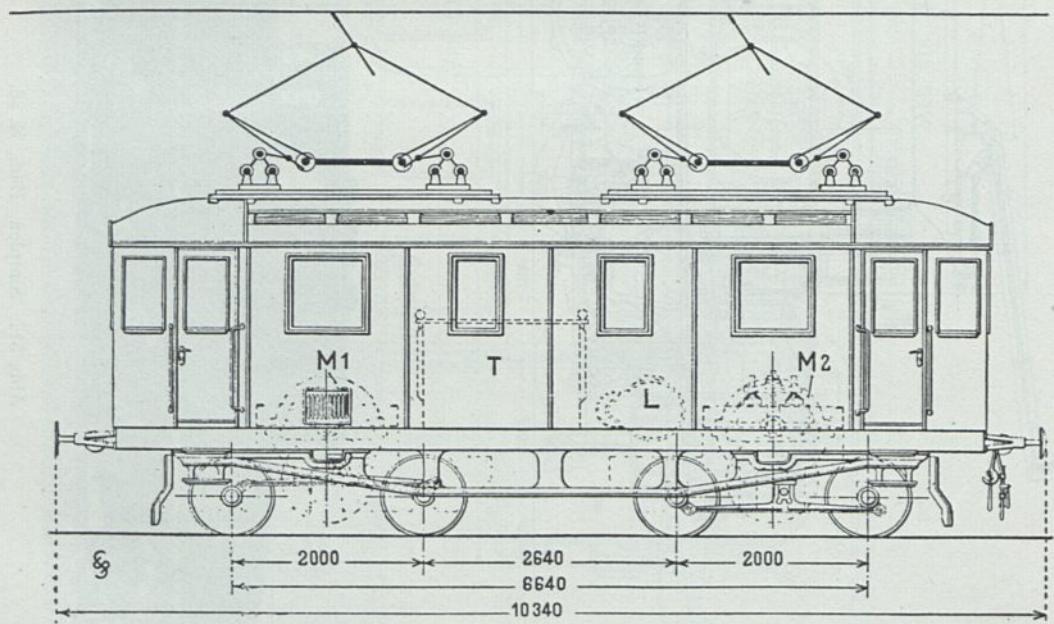


Abb. 520. Vác—Gödöllö, 1911.

Fünfter Teil.

Spezialbahnen.

I. Zahnbahnen.

Literatur (allgemein):

- Abt. Der Eisenbahnbau. VIII. Band. Lokomotiv-Steilbahnen. Verlag W. Engelmann 1906.
— Fünfundzwanzigjähriges Jubiläum des Zahnstangensystems Abt. D.S.K.B.Z. 1907.
Dolezalek. Eisenbahntechnik der Gegenwart. Die Zahnbahnen der Gegenwart. C. W. Kreidels Verlag, Wiesbaden 1905.
Fadda. Ferrovie con dentiera centrale. Torino.
Grüninger. Die Beschienung des Mount Washington. New York 1869.
Lévy Lambert. Chemin de fer crémaillère. Verl. Gauthier-Villars, Paris 1908.
Seefehlner. Elektrische Eisenbahnen. Röllsche Enzyklopädie des Eisenbahnwesens. Urban & Schwarzenberg, Wien. II. Aufl.

1. Allgemeines. Anläßlich der Untersuchung der Zugkraft zwischen Rad und Schiene (IV. Teil, II. Kap.) wurde aus der Grundbeziehung

$$Z = \mu G \dots \dots \dots \quad (1)$$

diejenige größte Neigung errechnet, die praktisch im Reibungsbetriebe überwunden werden kann. Die Rechnung bewies, daß das angehängte Zuggewicht mit der Steigung rasch sinkt. Für die Betriebsverhältnisse, wie sie bei Motorwagen herrschen, wurde gefunden, daß rund 100% die praktische Grenze des Reibungsbetriebes bilden und daß bei einer Anfahrbeschleunigung von 0,5 m/sec² in der Ebene etwa das 2,6fache Gewicht des Triebgewichtes angehängt werden kann.

Für Lokomotivbahnen liegen die Verhältnisse insofern wesentlich günstiger, als die Anfahrbeschleunigungen bedeutend geringer bemessen werden können. Die Zahl $\gamma = 0,06$ m/sec², die Reibungsziffer $\mu = 1000 : 180$ kg/t, die Steigung zu 30%, den Zugwiderstand für die Lokomotive 10 kg/t, für den Zug mit 5 kg/t angenommen, ergibt, daß für jede Tonne Triebgewicht etwa die 3,2fache Zuglast angehängt werden kann. In 40% sinkt diese Verhältniszahl auf das 2,5fache; dabei waren die Voraussetzungen durchaus günstig angenommen. Bei einer Reibungsziffer von nur 135 kg/t, die nicht selten vorzukommen pflegt, sinkt die Anhängelast auf das etwa 2,2 und 1,5fache des Triebgewichtes.

Das bedeutet, daß vom an sich verhältnismäßig hohen Kraftverbrauch zur Zugförderung 31 bzw. 40% für das Totgewicht der Lokomotive aufgewendet werden müssen.

Die Zugförderung verhältnismäßig großer angehängerter Lasten mittels Reibung wird demnach schon bei Steigungen von etwa 30% unwirtschaftlich; es muß Zuflucht zu einer Betriebsart genommen werden, die ohne Erhöhung des Triebgewichtes und unabhängig von der Reibungsziffer die erforderlichen Zugkräfte auszuüben gestattet.

Dieses Ziel erreicht man in technisch wirtschaftlich einwandfreier Weise durch den Zahnbahnbetrieb.

Auf Vollbahnen mit Steigungen von mehr als 40%, jedenfalls bei über 60% Steigung gelangt der Zahnbahnbetrieb zur Anwendung, wogegen bei straßenbahnartigen Transportaufgaben diese Grenze erst jenseits 100% liegt.

Wenn die Unabhängigkeit der Zugkraft von der Reibungsziffer und dem Triebgewicht als grundsätzliches Kennzeichen von Zahnbahnen hingestellt wurde, so gilt dies keineswegs absolut, sondern nur in gewissen Grenzen.

Diesbezüglich besteht mit dem Reibungsbetrieb insofern Übereinstimmung, als bei diesem die Zugkraft am Radumfange nur insolange übertragen werden kann, als reines Rollen vorliegt. Ist der Raddruck vergleichsweise klein oder die Umfangskraft zu groß, tritt Gleiten — Schleudern — ein.

Genau derselbe Vorgang liegt auch beim Zahnradbetrieb vor, lediglich mit dem Unterschiede, daß diejenige Grenze, bei welcher der Eingriff verloren geht, nicht nur von der Eigentümlichkeit der verwendeten Baustoffe abhängt, sondern durch die gewählte Bauform der Verzahnung in weiten Grenzen beeinflußt werden kann.

2. Die Zugkraft.

Um über diese Aufschluß zu erhalten, ist der Kräfteplan für das Triebzahnrad zu untersuchen. Es

wäre nicht vorteilhaft, das Getriebe so einzurichten, daß sich jemals nur ein einziger Zahn im Eingriff befindet. Die Betriebssicherheit verlangt vielmehr, daß tunlichst zwei Zähne gleichzeitig eingreifen und wenn dies nicht ausreicht, die Anzahl der Triebzahnräder entsprechend vermehrt wird.

Für die vorliegende Untersuchung wird jedoch angenommen, daß nur ein Zahn die ganze Last trägt.

Der Kräfteplan (Abb. 521) für den Zahntrieb kann auf Grund nachstehender Überlegung festgelegt werden. Der Zahn nimmt die zur Fortbewegung des Zuges

Abb. 521. Kräfteplan des Fahrzeugs in der Neigung, Teilkräfte des Zahndruckes.

in der Bahnneigung wirkende Zugkraft auf.

Es bezeichnet:

P den Zahndruck kg,

G das Zuggewicht t,

Q das Lokomotivgewicht t,

α den Neigungswinkel,

w_q und w_g die Zugwiderstände kg/t,

$\gamma = \frac{v^2}{2l}$ die Beschleunigung m/sek²,

μ die Reibungsziffer = $\tan \varphi$,

φ den Reibungswinkel,

β den Winkel der Zahnneigung,

Z_g die Zugkraft für die Bewegung der Lokomotive kg,

Z_q die Zugkraft für die Bewegung des Zuges,

Z die gesamte Zugkraft, in Richtung der Bahnneigung,

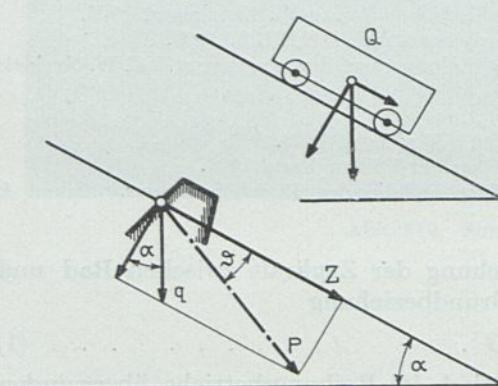
$$\text{Entsprechend Abb. 521 ist } Z_g = 1000 G \sin \alpha + G \cos \alpha w_g + \frac{1000 G \cdot v^2}{2 g l} \quad \dots \quad (2a)$$

und

$$Z_q = Q 1000 \sin \alpha + Q \cos \alpha w_q + \frac{1000 Q v^2}{2 g l} \quad \dots \quad (2b)$$

3. Der Zahndruck. Die Ebene der Zahnflanke kann nicht lotrecht sein, das Zahnrad trägt einen Teil des Lokomotivgewichtes $q = mQ$, wo $m < 1$. Diese abwärts gerichtete Teilkraft ist für die Sicherung des Eingriffes notwendig, weil

$$Z = Z_g + Z_q \quad \dots \quad (3)$$



eine nach oben gerichtete Teilkraft haben kann, welcher die Schwerkraftkomponente entgegenwirkt.

Richtung und Größe des Zahndruckes ergibt sich aus der Zusammensetzung der beiden Teilkräfte Z und q , wobei von q die in die in Richtung der Neigung fallende Teilkraft $q_1 = q \sin \alpha$ in Abzug zu bringen ist, da diese in $Q \sin \alpha$ bzw. Z_q bereits inbegriffen ist. Mit Z ist nur $q \cos \alpha$ zusammenzusetzen zu

$$P = \sqrt{Z^2 + (q \cos \alpha)^2} = \frac{Z}{\cos \vartheta}, \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

wo der Winkel ϑ , Abb. 522, vorläufig noch unbekannt ist. Aus der Geometrie des Kräfteplanes folgt jedoch, daß

$$\tan \vartheta = \frac{q \cos \alpha}{Z} \quad \dots \quad (5)$$

Aus Gründen des wirtschaftlichen Betriebes — Abnutzung der Zahnstange und Zahnräder — soll

$$p = \frac{P}{b} \leq 100 \approx 60 \text{ kg/mm}$$

sein, wo b die Zahnbreite in mm bedeutet. Da Zahnbreiten von 15 bis 100 mm, ausnahmsweise 140 mm gebräuchlich sind, kann $P = 1500$ bis 10000 kg werden; gewöhnlich ist man aus anderen Gründen je Triebrad nicht über 8000 kg gegangen.

4. Der Auftrieb. Ein sicherer Zahneingriff und Betrieb kann nur erwartet werden, wenn die Belastung des Zahnrades den Auftrieb übertrifft. Dies ist um so notwendiger, als außer dem Auftrieb des Zahndruckes auch die im Schwerpunkte der Lokomotive wirkende Teilkraft des Lokomotivgewichtes parallel zur Bahnachse ein Drehmoment erzeugt, das um den talseitigen Stützpunkt des Fahrzeuges als Drehpunkt die bergseitige Achse zu entlasten trachtet.

Dieselbe Wirkung vermehrt die am Puffer der Lokomotive wirkende Stützkraft des geschobenen Zuges.

Die Summe dieser Momente darf selbst im ungünstigsten Belastungsfalle die Achsbelastung nicht aufheben, wenn keine Entgleisung eintreten soll.

Die erste Forderung setzt voraus, daß die Teilkraft der senkrechten Triebadbelastung in der Richtung der Zahnflanke

$$q \cos \alpha \sin \beta \geq A \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

als der Auftrieb sei.

Die von der auf den Zahn senkrechten Teilkraft erzeugte Reibungskraft wirkt in der Richtung der Zahnflanke und immer entgegen der Gleitbewegung, daher während

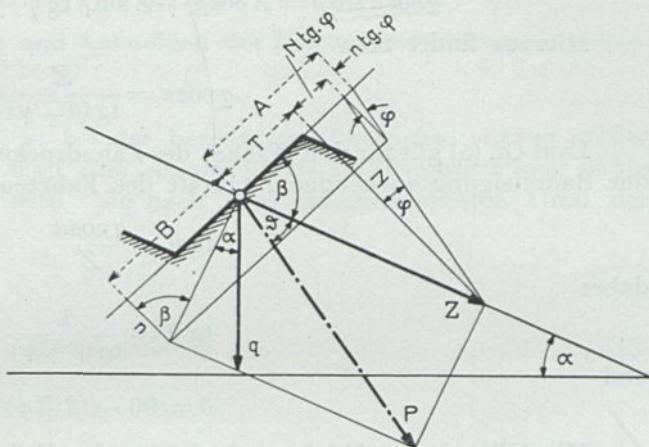


Abb. 522. Kräfteplan des Zahneingriffes unter Berücksichtigung der Zahnreibung.

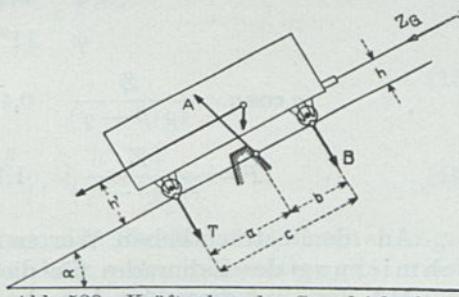


Abb. 523. Kräfteplan der Standsicherheit eines Fahrzeugs mit Zahnradantrieb.

des Eingriffes vom Kopfkreis der Zahnstange bis Zentralpunkt (C) im Sinne einer Entlastung (stemmend), unterhalb C im Sinne einer Belastung (strechend), weil in diesen beiden Eingriffsgebieten das Gleiten entgegengesetzt gerichtet ist.

Aus dem Kräfteplan Abb. 522 ergibt sich der Auftrieb zu

$$A = T + (N + n)\mu \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$A = Z \cos \beta + Z \sin \beta \operatorname{tg} \varphi + q \cos \alpha \cos \beta \operatorname{tg} \varphi \quad \dots \dots \dots \quad (7a)$$

Für den Fall des Gleichgewichtes wird

$$q \cos \alpha \sin \beta = Z \cos \beta + Z \sin \beta \operatorname{tg} \varphi + q \cos \alpha \cos \beta \operatorname{tg} \varphi \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

Hieraus findet man

$$q \cos \alpha = \frac{Z}{\operatorname{tg}(\beta + \varphi)} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

Laut Gl. (5) gilt für den Winkel des Zahndruckes gegenüber der in der Richtung der Bahnneigung wirkenden Zugkraft des Fahrzeuges

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{q \cos \alpha}{Z}, \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

daher

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{1}{\operatorname{tg}(\beta + \varphi)} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

und

$$\vartheta = 90 - (\beta + \varphi) \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

Mit Hilfe dieser Ableitung kann für den Fall, daß man bezüglich der Reibung zwischen Zahnrad und Zahnstange bestimmte Annahmen macht, derjenige Anteil des Fahrzeuggewichtes Q berechnet werden, welcher bei gegebener Zugkraft Z vom Zahnrad aufgenommen werden kann.

Es seien beispielsweise für die folgenden Reibungszahlen die entsprechenden Achslasten und Zahndrücke angegeben

μ	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{20}$
$\operatorname{tg} \varphi$	0,200	0,143	0,100	0,05
φ	$11^{\circ} 19'$	$8^{\circ} 8'$	$5^{\circ} 43'$	$2^{\circ} 50'$
$q \cos \alpha = \frac{Z}{\operatorname{tg}(\beta + \varphi)}$	$0,468 Z$	$0,407 Z$	$0,361 Z$	$0,302 Z$
$P = \frac{Z}{\sin(\beta + \varphi)}$	$1,11 Z$	$1,10 Z$	$1,08 Z$	$1,045 Z$

Aus den beträchtlichen Werten von $q \cos \alpha$ erhellt die Bedeutung der guten Schmierung des Zahnrades für die Sicherheit des Betriebes.

Mit dem auf diese Art berechneten Wert der Triebzahnradbelastung und bestimmter Annahmen bezüglich der Gewichtsaufteilung des Fahrzeuges kann die Momenten-Gleichung aller in Betracht kommenden Kräfte, die die Lokomotive zu kippen trachten, aufgestellt werden.

5. Die Standsicherheit. Entlastend wirkt die Schwerkraftkomponente in der Richtung der Bahnneigung mit dem Hebelarm der Schwerpunktshöhe zuzüglich eventueller Bremskräfte abzüglich der Zugwiderstände (Abb. 523)

$$Z_q \frac{h}{c}$$

und der Pufferdruck

$$Z_g \frac{h'}{c}.$$

Für den sicheren Eingriff muß somit die Belastung B der bergseitigen Achse sein,

$$B \geq E = A \frac{a}{c} + Z_Q \frac{h}{c} + Z_G \frac{h'}{c}$$

$$B \geq \frac{1}{c} \left[(Z \cos \beta + Z \sin \beta \operatorname{tg} \varphi + q \cos \alpha \cos \beta \mu) a + Z_q h + Z_g h' \right] \dots \quad (12)$$

Die Sicherheit gegen Kippen und Aufsteigen des Fahrzeuges wird um so größer, je größer das Verhältnis $\frac{B}{E}$ wird.

Die Gefahr des Aufsteigens ist bei der bergseitigen Tragachse vorweg größer als der talseitigen; daher strebt man eine entsprechende Gewichtsaufteilung dahin an, daß diese stärker belastet wird. Je nach dem wünschenswerten Grad der Sicherheit

$$\sigma = \frac{B}{E}$$

wird

$$B = m \cdot 1000 \cdot Q \quad \dots \quad (13)$$

gewählt, wo

$$1 > m > 0,5.$$

Je größer σ wird, desto größer ist die Sicherheit gegen Aufsteigen, doch sind dem Wert von σ praktische Grenzen gesetzt, indem es unzulässig ist, die Talachse zu sehr zu entlasten, dagegen ist aus naheliegenden Gründen anzustreben, Q überhaupt klein zu halten.

Die Entlastungskraft der bergseitigen Achse wird

$$E = \frac{1000 m \cdot Q}{\sigma} = \underbrace{\frac{1000 \sin \alpha + w + 100 \gamma}{H}}_{\dot{H}} \left\{ (Q + G) \frac{a}{c} \cdot (\cos \beta + \sin \beta \operatorname{tg} \varphi + \cos \beta \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi) + Q \frac{h}{c} + G \frac{h'}{c} \right\} \quad \dots \quad (14)$$

Setzt man

so ergibt sich die Gleichung

$$\frac{m \cdot 1000}{H \sigma} = \frac{a}{c} (n+1) \frac{\sin \beta}{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)} + \frac{h}{c} + \frac{h'}{c} n \quad \dots \quad (16)$$

welche den Zusammenhang der Linienführung der Strecke und deren Längsschnitt einerseits und andererseits der Konstruktion der Lokomotive gibt, wobei auch die dynamischen Verhältnisse berücksichtigt sind, indem der Einfluß der Geschwindigkeit und der Reibung zum Ausdruck gelangt.

Erstere ist im Ausdruck für die Beschleunigung bzw. Verzögerung m/sec² berücksichtigt, indem

$$100\gamma = \frac{v^2 100}{2l}$$

wo v die Geschwindigkeit in m/sec und l den Bremsweg in m bedeutet.

Die Reibungszahl zwischen Zahnrad und Zahnstange $\mu = \operatorname{tg} \varphi$ bringt den Einfluß des Zustandes der Zahnstange und des Zahnrades zum Ausdruck.

Die oben abgeleitete Stabilitätsgleichung einer Zahnradlokomotive in ihren bau- und maschinentechnischen Beziehungen eignet sich zur nomographischen Darstellung, indem vorweg die interessierenden, unabhängigen Veränderlichen

$$\operatorname{tg} \varphi (= \mu) \text{ statt } \varphi, \quad n \text{ statt } n+1$$

die Steigung $s^{\circ}/_{100}$ statt $\sin \alpha$ unmittelbar aufgetragen bzw. abgelesen werden können.

Diese Rechentafel gibt Aufschluß, für welche größten Zugsgewichte in gegebenen Steigungen unter bestimmten Reibungsverhältnissen eine etwa vorhandene Fahrzeugtype verwendbar ist. Sie läßt bequem ermitteln, wie weit z. B. die Steigung dort zu ermäßigen ist, wo wegen etwa in der Nähe befindlichen staubigen Landstraßen mit größerer Reibung zu rechnen ist, oder aber, weil in den betreffenden Strecken wegen Störungen des Verkehrs im Betrieb heftige Bremsungen die Regel sein können.

Man erkennt auch, wie durch Tieferlegung des Schwerpunktes, des Puffermittels der in Aussicht genommene Entwurf zu verbessern ist und welche Tragweite diese Verbesserungen auf die Leistung im Betriebe haben können.

Das Nomogramm kann weiter (Abb. 524) mit den bez. der Leistung und dem Eigengewicht bestehenden Beziehungen in Verbindung gebracht werden.

Die solcherart erzielten Ergebnisse werden im allgemeinen eine Korrektur erfahren müssen, weil die Rechnung die bei der üblichen Bauart der Zahnradlokomotiven sehr beträchtliche Massenwirkung der umlaufenden Massen unberücksichtigt läßt. Die Erfahrung zeigt, daß man durch nicht sehr übertriebene Bremsungen elektrische Zahnradlokomotiven zum Aufsteigen bringen kann, wenn auch die dieser Trägheitswirkung entsprechende Kraft durch Einbau von Rutschkupplungen eingegrenzt wird.

Die Untersuchung einiger Zahnradlokomotiven führt zu dem Ergebnis, daß vom Standpunkt der Beschleunigungs- und Verzögerungskraft die Wirkung der umlaufenden Massen einer Vermehrung der geradlinig bewegten Massen auf das 2, 3, und mehrfache gleichkommt.

Der Zahlenwert dieses Zuschlages kann dem durch Auslauf-Versuche oder durch Rechnung aus den bekannten Gewichten und Abmessungen der umlaufenden Bestandteile berechnet werden.

Für die Berechnung dieser Massenwirkung dient die Grundgleichung bezüglich der lebendigen Kraft eines Körpers, der außer geradlinig bewegten auch umlaufende Massen aufweist. Die lebendige Kraft (mkg)

$$E = m \frac{v^2}{2} + J \frac{\omega^2}{2}$$

wo m die Masse des Körpers von G kg Gewicht

v die lineare Geschwindigkeit in m/sec

ω die Winkelgeschwindigkeit in m und

J das Trägheitsmoment bezeichnet.

Bremst man das Fahrzeug mit einer Kraft P kg entsprechend einer gleichmäßige Verzögerung von γ m/sec² und s m Bremsweg ab, gilt

$$P = \frac{E}{s}.$$

Die geradlinige Geschwindigkeit bzw. die Winkelgeschwindigkeit ist

$$v = r\omega,$$

wenn $d = 2r$ den Triebraddurchmesser bedeutet.

Dann ist die auf diesen Halbmesser bezogene Masse

$$m_1 = \frac{J}{r^2}.$$

Diese Substitutionen durchgeführt, wird

$$P = \frac{v^2}{2s}(m + m_1) = \gamma(m + m_1) = \gamma m(1 + \zeta),$$

wo $m_1 = \zeta m$.

Das Trägheitsmoment pflegt man zweckmäßig durch das Schwungmoment auszudrücken. Für dieses gilt

$$J = \frac{G_r}{g} \cdot \frac{D_t^2}{4} \approx \frac{G_r D_t^2}{40}.$$

Hier ist G_r das Gewicht der umlaufenden Massen in kg und D_t der Trägheitsdurchmesser.

Die vorstehende Rechnung berücksichtigt den Umstand noch nicht, daß bei Zahnradlokomotiven ein unmittelbarer Antrieb nicht in Betracht kommt, vielmehr eine meist zweifache Übersetzung die Regel ist. Bezeichnet man mit J das Trägheitsmoment der mit n_1 Turen laufenden Triebbestandteile und mit n_2 die Drehzahl des Triebzahnrades, auf dessen Teilkreis bezogen die Umfangskraft ermittelt werden soll, so gilt

$$m_1 = \frac{J}{r^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = \frac{G_r D_t^2}{40 r^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = \frac{G_r D_t^2}{10 d^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2.$$

da $G_{\text{lok}} = 10 \text{ m}$, ist

$$\zeta G_{\text{lok}} = \frac{G_r D_t^2}{d^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2,$$

schließlich

$$\zeta = \frac{G_r}{G_{\text{lok}}} \cdot \frac{D_t^2}{d^3} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2.$$

Zur Ermittlung des Trägheitsdurchmessers D_t (m) dient die bekannte Beziehung zur Bestimmung des Trägheitsmomentes eines ringförmigen homogenen Körpers

$$J = \frac{1}{2} \pi h (R^4 - r^4) = \pi h (R^2 - r^2) r_t^2$$

daher

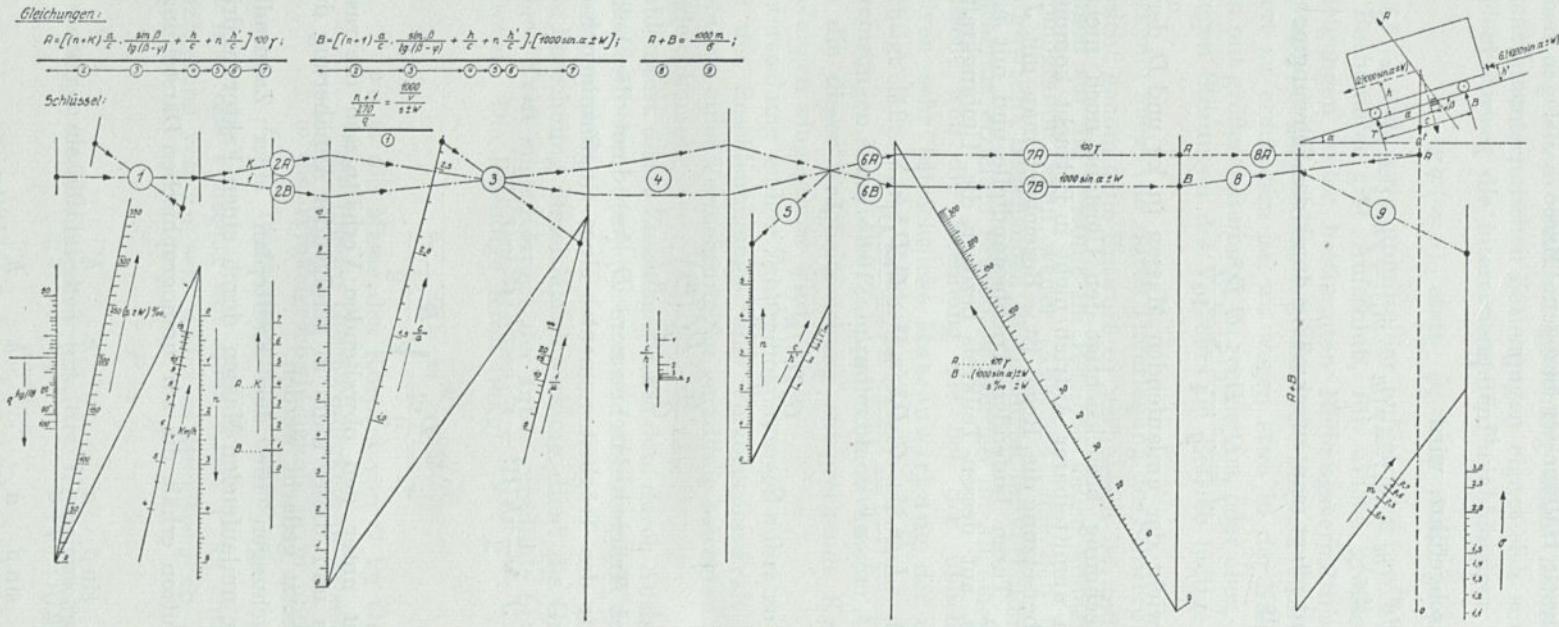
$$r_t = \frac{D_t}{2} = \sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}}.$$

Ausschlaggebend ist unter den obwaltenden Verhältnissen die raschlaufende Masse des Ankerkörpers und dieser kann in genügender Annäherung durch einen ringförmigen Körper ersetzt gedacht werden.

In den Grundgleichungen für den Kräfteplan einer Zahnradlokomotive kann diese Wirkung der umlaufenden Massen durch einen Faktor im dritten Glied berücksichtigt werden.

Nach dieser Substitution erhält die zur nomographischen Darstellung geeignete Gleichung 16 die Form

$$\begin{aligned} \frac{1000 m}{\sigma} &= \left[\frac{\sin \beta}{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)} \frac{a}{c} (1 + n) + \frac{h}{c} + n \frac{h'}{c} \right] [1000 \sin \alpha \pm w] + \\ &+ \left[\frac{\sin \beta}{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)} \frac{a}{c} (\zeta + n) + \frac{h}{c} + n \frac{h'}{c} \right] 100 \gamma, \end{aligned}$$



h Höhe des Lokomotiv-Schwerpunktes in m
 a Abstand des Eingriffspunktes von der talseitigen Achse in m
 γ Verzögerung resp. Beschleunigung in m/s^2
 w Zugwiderstand in kg/t oder ‰
 q Lokomotivgewicht in kg/PS

Abb. 524. Rechentafel zur Bestimmung der Standsicherheit einer Zahnradlokomotive.

wo

$$Z_q = Q(1000 \sin \alpha \pm w_q + 100 \gamma z)$$

$$Z_g = nQ(1000 \sin \alpha \pm w_g + 100 \gamma)$$

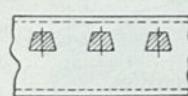
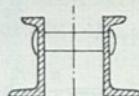
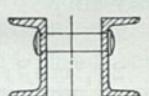
$$Z = Q[(1+n)(1000 \sin \alpha \pm w_g) + 100 \gamma (z+n)].$$

Dieser Gleichung entspricht die Rechentafel Abb. 524.

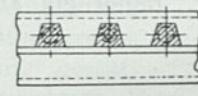
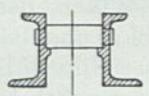
6. Zahnstangensysteme. Abb. 525. Die seit dem Jahre 1871 erbauten Zahnbahnen haben an dem jeweils in Anwendung gebrachten System festgehalten, — ein Beweis dafür, daß alle in Gebrauch genommenen Systeme in der Hauptsache



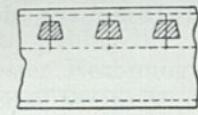
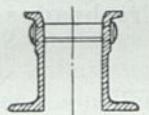
Marsh 1858.



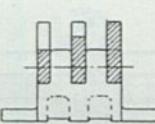
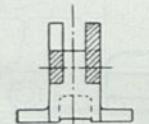
Rigenbach 1871.



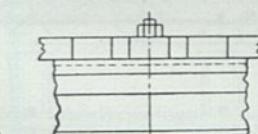
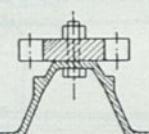
Bissinger-Klose 1887.



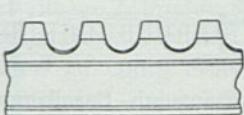
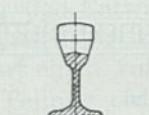
Masch.-Fabrik Bern 1821.



Abt. 1882.



Locher 1885.



Strub 1896.

Abb. 525. Zahnstangentypen.

den gestellten Anforderungen entsprechen. Nichtsdestoweniger sind meist die Systeme von Rigenbach, Abt und Strub angewandt worden, wogegen andere Anordnungen von Klose, Bissinger usw. der Geschichte angehören.

Was die Oberbauanordnung anbelangt, übereinstimmen alle Typen grundsätzlich insoweit, als Zahnteilungen von 100 bis 120 mm vorgesehen werden, die Evolventenverzahnung zur Anwendung gelangt und schließlich der Zahnflankenanzug mit 14° , d. i. $\cos \beta = 0,242$ hergestellt wird.

Damit ist auch die Lage der Eingriffslinie gegeben.

Aus den trigonometrischen Beziehungen (Abb. 526) zwischen

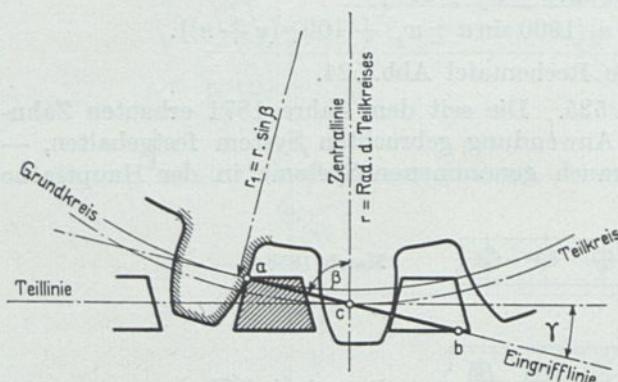


Abb. 526. Geometrie des Zahneingriffes.

r = Teilkreishalbmesser,
 r_1 = Grundkreishalbmesser,
 e = der Eingriffstrecke ab ,
 t = der Teilung,
 d = der Eingriffsduer

folgt, daß

$$e = 2r \cos \beta$$

und

$$dt = e \sin \beta,$$

weiter

$$r_1 = r \sin \beta$$

wirō

$$d = \frac{e}{t} \cdot \frac{r_1}{r} = \frac{2 r_1^2 \cos \beta \sin \beta}{r t}.$$

$2r = D$; $\cos \beta$ ist eine feste Zahl, $r \approx r_1$, daher gilt angenähert

$$d = \frac{0,235 D}{t}.$$

Die Eingriffsdauer bzw. die Anzahl der gleichzeitig in Eingriff befindlichen Zähne wird um so größer, je größer der Halbmesser des Triebrades und je kleiner die Teilung wird.

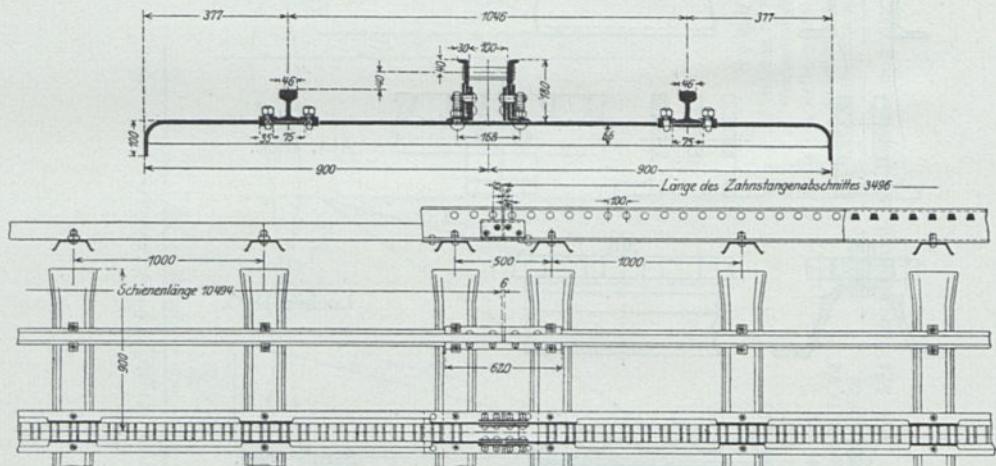


Abb. 527. Leiterzahnstange der Stansstad—Engelbergbahn.

7. Die Leiterzahnstange. Abb. 527, 528. Die Riggenbach-Zahnstange besteht aus zwei senkrecht angeordneten U-Eisenwangen, zwischen welche gewalzte Zähne von trapezförmigem Querschnitt kalt eingenietet sind.

Die ursprüngliche Zahnstange war nur 120 mm hoch und da die Laufschienen auch rund die gleiche Höhe aufweisen, reicht das Triebzahnrad unter Schienenoberkante, was Schwierigkeiten bei der Herstellung von Weichen und Kreuzungen verursacht.

Spätere Ausführungen halfen diesem Übel durch Wangenhöhen bis 220 mm ab (Brünigbahn). Eine erstmals bei der Wengernalp- und Schynige Platte-Bahn ver-

wendete verbesserte Konstruktion der Rigganbach-Zahnstange röhrt von Pauli her. Zu dem gleichen Zwecke wurde bei der Berner Oberlandbahn die Zahnstange von 117,5 mm Höhe auf 110 mm hohen Sätteln verlegt.

Die Rigganbach-Zahnstange, die unter anderem erstmals am Rigi zur Anwendung gelangte, zeichnet sich durch sehr große Widerstandsfähigkeit aus. Ein Nachteil liegt darin, daß Weichen und Kreuzungen schwierig herzustellen sind. Rigganbach verwendete ursprünglich Schiebebühnen und Drehscheiben. Diese Zahnstange verlangt auch verhältnismäßig große Krümmungsradien, die gerade im gebirgigen Gelände schwer zu erzielen sind und hohe Kosten verursachen. Ein wesentlicher Vorteil der Zahnradbahnen, daß sie in Anlehnung an das Gelände in kürzester Strecke große Höhenüberwindung gestatten, wird dadurch beeinträchtigt. Die Herstellung dieser Zahnstange wird auch wegen der besonderen Konstruktion für die verschiedenen Radien teuer.

8. Zahnstange Abt. (Abb. 529.) Den diesbezüglichen Anforderungen trägt die Abtsche Zahnstange besser Rechnung. Dieselbe besteht aus 2, ausnahmsweise 3 gezahnten Lamellen, deren Breite je nach Bedarf mit 15 bis 32 mm bemessen wird.

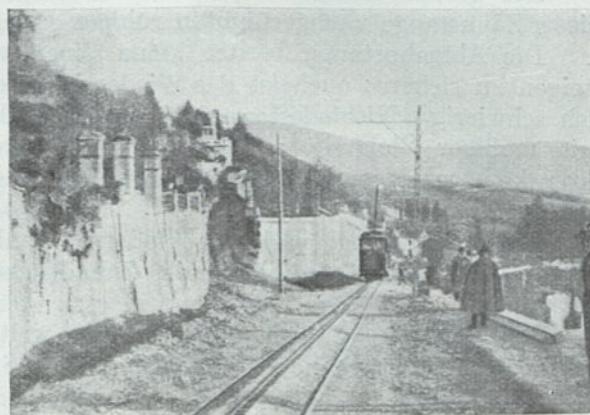


Abb. 528. Zahnbahn Alhambra-Granada (Spanien), Leiterzahnstange in das Schotterbrett versenkten.

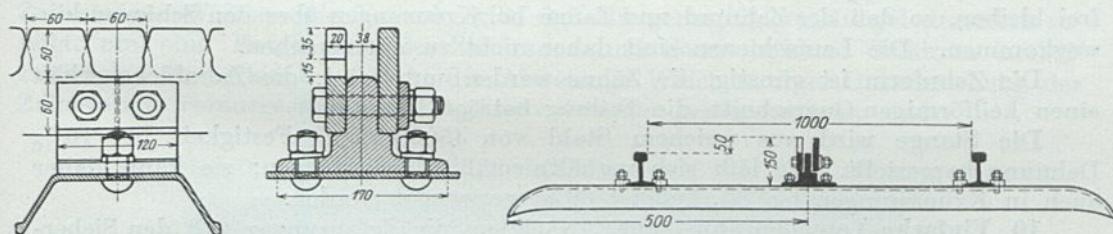


Abb. 529. Zweilamelliger Zahnstangenoberbau, Bauart R. Abt.

Für den Entwurf dieser Zahnstange war unter anderem auch der Gedanke maßgebend nach Art der Stufenräder die Stetigkeit des Zahneingriffes zu erhöhen und solcherart einen ruhigen zu Gang erzielen, indem die Stemmwirkung der mit versetzter Teilung eingreifenden Zahnräder sich gegenseitig aufheben soll. Bei dem unausgeglichenen Gang der Dampflokomotiven war diese Eigenschaft von besonderer Wichtigkeit; tatsächlich sind auf Strecken mit Abtscher Stange die verhältnismäßig höchsten Geschwindigkeiten erzielt worden.

Die von Abt angewendete Federung der Zahnräder ist auch von günstigem Einfluß auf die Abnutzung dieser Zahnstange, weil die gleichmäßige Verteilung des Zahndruckes mehr angenähert wird als bei breiten einteiligen Zahnrädern.

Die Lamellen werden auf entsprechend gestalteten Stühlen befestigt.

Die Zahnteilung kann, da mindestens zwei Lamellen vorgesehen werden, deren Zähne dann gegenseitig um die halbe Teilung versetzt sind, größer sein als bei einteiligem Zahntrieb; gewöhnlich wird sie mit 120 mm ausgeführt.

Die früher abgeleitete Beziehung zwischen Raddurchmesser, Teilung und Eingriffsdauer lässt die Überlegenheit des zweilamelligen Systems mit der versetzten Teilung erkennen.

Die größere Eingriffsdauer der mehrlamelligen Zahnstange bedingt u. a. den dieser Zahnstange nachgerühmten ruhigen Gang.

Die Abtzahnstange besitzt keine Einrichtung, um das Fahrzeug gegen Aufsteigen zu sichern; auch ist das Wiedereinbringen eines entgleisten Zahnrades ziemlich schwierig. Nichtsdestoweniger hat diese Bauart insbesondere bei Vollbahnen mit mäßiger Steigung, wo das Aufsteigen keine drohende Gefahr bildet, dank ihrer konstruktiv ausgezeichneten Durchbildung, sehr ausgedehnte Anwendung gefunden.

Diese Zahnstange verlangt gefederte Zahnkränze für die Triebzahnräder, sonst ist die gleichmäßige Aufteilung des Zahndruckes auf beide Lamellen nicht zu erreichen.

9. Zahnstange Strub. Konstruktiv weitgehenden Anforderungen entspricht die aus einem Stück hergestellte Zahnstange Strub. (Abb. 530.)

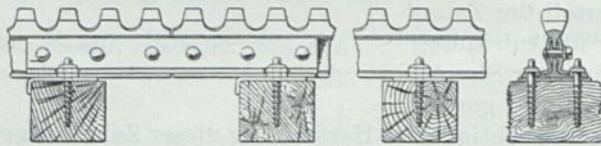


Abb. 530. Zahnstange Strub auf Holzschenken verlegt.

Dieselbe ist für die Jungfraubahn entworfen worden, besitzt einen keilförmigen Kopf, der von der Sicherheitszange umfaßt werden kann. Die Höhe der Stange ist so bemessen, daß bei 100 mm hohen Schienen 70 bis 85 mm für die Verzahnung frei bleiben, so daß das Zahnräder und Zange bei Kreuzungen über den Schienen hinwegkommen. Die Laufschienen sind daher nicht zu unterbrechen.

Die Zahnform ist günstig, die Zähne werden unterfräst, die Zahnlücke erhält einen keilförmigen Querschnitt, die Teilung beträgt 100 mm.

Die Stange wird aus weichem Stahl von 4500 kg/cm^2 Festigkeit bei 10% Dehnung hergestellt. Sie läßt sich verhältnismäßig leicht biegen; sie kann daher auch in Krümmungen bis 80, äußerst 60 m verwendet werden.

10. Einfache Lamellenzahnstange. Nachdem die Erfahrungen mit den Sicherheitszangen nicht eindeutig sind, es sich vielmehr als vorteilhaft erwiesen hat, Einrichtungen zu treffen, die übertriebene Bremswirkungen vermeiden, hat Seefehlner für den Erzberg eine Zahnstange verwendet, bei welcher die Zange und die mit ihrer Verwendung verbundenen Bauformen verlassen sind.

Diese Zahnstange hat die Abtlamelle, die Befestigung nach Abt, sie ist nur einlamellig. Die Lamelle ist 50 mm breit, daher für Zahndrücke bis etwa 5000 kg ausreichend. Die Triebzahnräder sind durch ein Kurbelgetriebe gekuppelt, wobei die Zähne um eine halbe Teilung versetzt sind.

Die Zange entfällt, jedoch erhalten die Triebzahnräder Führungsscheiben.

Die Erzeugung und Verlegung der einlamelligen Zahnstange gestaltet sich einfach. Einlamellige Zahnstrecken finden sich auch auf kürzern Strecken mit geringerer Steigung bei Abt-Zahnbahnen. Eine mehrteilige Lamelle weist die Telfener-Zahnstange der St. Ellero-Saltino-Bahn auf.

Alle diese Zahnstangen werden auf Eisen- oder Holzschenken verlegt.

11. Kletterzahnstange Peter. Bei den betrachteten Zahnstangensystemen erfolgt der Zahneingriff in einer lotrechten Ebene, die Zahnlängen haben stets eine Neigung von 1:4 gegen die Bahnneigung. Eine Auftriebskomponente ist daher

stets vorhanden; aus dieser Ursache und wegen dem Kippmoment der gestützten Last werden Steigungen von mehr als 26% nicht mehr angewendet. (Corcovadobahn, 30% Mt. Wash. 37%).

Zur Überwindung von größeren Steigungen kann dieser Schwierigkeit dadurch begegnet werden, daß der Zahneingriff in die Ebene der Bahnneigung gelegt wird, in welchem Falle zur Vermeidung einseitiger Schienendrücke eine doppelte Verzahnung vorgesehen werden muß.

Nach diesem Grundsatz ist als erstes Ausführungsbeispiel die für die Pilatusbahn, die eine Höchststeigung von 48% aufweist, nach Angaben von Oberst Locher verwendete sog. Fischgrätenzahnstange (Abb. 531) gebaut worden.

Dieses System fand aus verschiedenen Gründen keine weitere Verbreitung.

Dieselbe Aufgabe hat neuerdings H. H. Peter, Zürich, mit seiner aus einem Stück durchgebildeten Kletterzahnstange-System mit einem Gewichte von 46,8 kg/m gelöst und dabei auch für die Zahnstangen-Einfahrten einwandfreie Konstruktionen vorgeschlagen. In diesem insbesondere auch für gemischte Bahnen ausgebildeten System in Reibungsstrecken verlegt oder als Dreh- oder Schiebebühnen ausgeführt. (Dreikreuzbergbahn Karlsbad.) Das ist aber kein besonderer Übelstand dieses Typs, indem für alle Zahnstangen-Weichen die Tatsache gilt, daß ein geringfügiger Mangel derselben genügt, um eine Entgleisung des Zahnrades und damit schwere Gefahren herbeizuführen. Immerhin ermöglicht die Abtstange Weichen ohne Unterbrechung der Zahnstange, vorausgesetzt, daß die Triebzahnräder genügend breit sind.

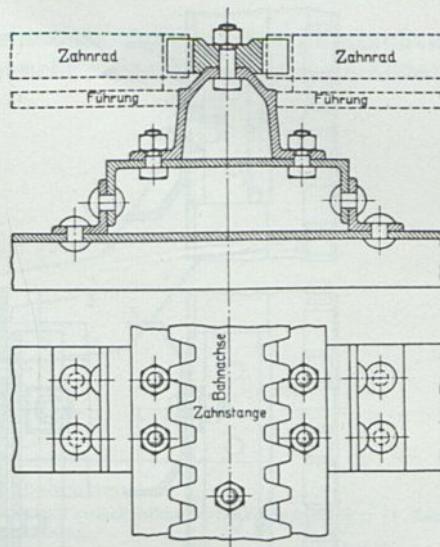


Abb. 531. Oberbau, System Locher (Pilatusbahn) mit wagerechtem Zahneingriff.

Die Ausweichungen werden bei diesem insbesondere auch für gemischte Bahnen ausgebildeten System in Reibungsstrecken verlegt oder als Dreh- oder Schiebebühnen ausgeführt. (Dreikreuzbergbahn Karlsbad.) Das ist aber kein besonderer Übelstand dieses Typs, indem für alle Zahnstangen-Weichen die Tatsache gilt, daß ein geringfügiger Mangel derselben genügt, um eine Entgleisung des Zahnrades und damit schwere Gefahren herbeizuführen. Immerhin ermöglicht die Abtstange Weichen ohne Unterbrechung der Zahnstange, vorausgesetzt, daß die Triebzahnräder genügend breit sind.

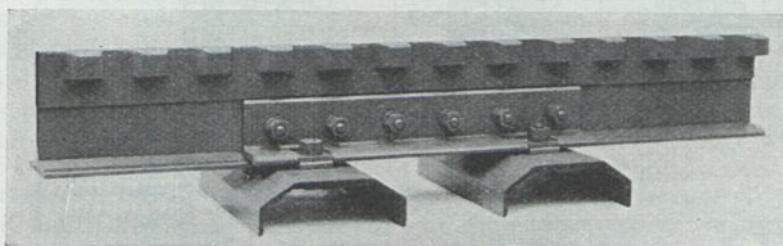


Abb. 532. Kletterzahnstange Peter auf Eisenschwellen.

Auf diesen Umstand, im Zusammenhang mit den hohen Anschaffungs- und Betriebskosten der Weichen und Kreuzungen, ist es zurückzuführen, wenn bei neueren Anlagen Zahnstangenweichen überhaupt möglichst vermieden werden. Man legt die Ausweichstellen und auch die Bahnhofsanlagen in die Ebene oder in geringe Neigungen und richtet die Triebfahrzeuge so ein, daß sie für Zahnstangen- und Reibungsbetrieb geeignet sind. Abt hat nach diesem Grundsatz seine Dampflokotomiven mit getrenntem Reibungs- und Zahntrieb eingerichtet.

Das für die Kletterzahnstange dienende Zahnschienenprofil kann auch für vertikalen Zahneingriff bearbeitet werden.

Die Zahnstangen Locher und Peter sind die einzigen, welche eine sichere Verankerung der Fahrzeuge, d. h. vollständige Sicherheit gegen Entgleisen bieten.

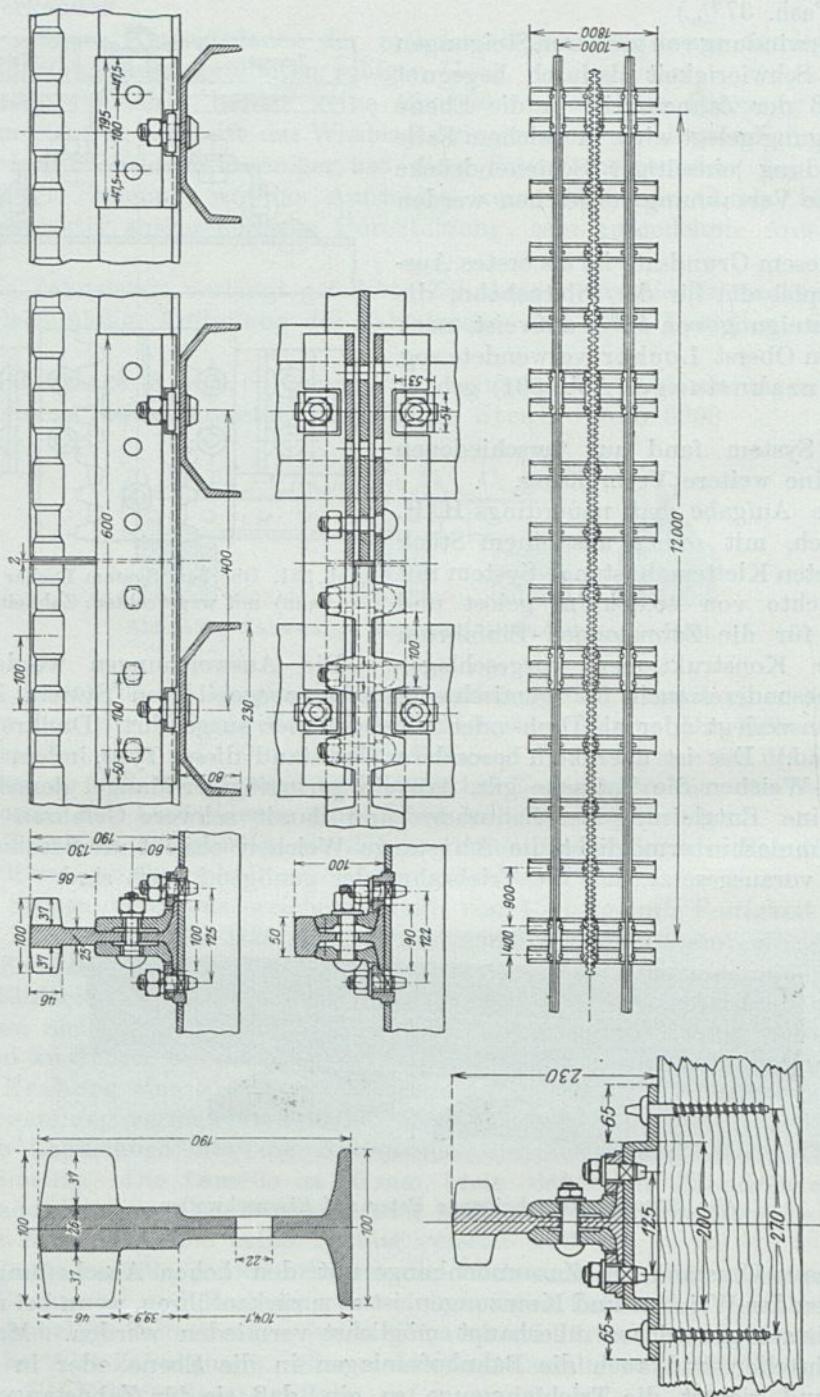


Abb. 533. Kletterzahnstangen-Oberbaue, System H. H. Peter.

12. Arten der Zahnbahnen. Auf Grund der Gestaltung des Höhenplanes welcher von maßgebendem Einfluß auf die Wahl des Betriebssystems und der Fahrzeuggbauarten ist, können vier Gruppen mit besonderen Kennzeichen unterschieden werden (Abb. 534):

I. Reine Zahnbahnen, d. s. solche, die durchwegs Oberbau mit Zahnstange aufweisen; die Triebfahrzeuge dieser Bahnen benötigen keinerlei Einrichtung für Reibungsbetrieb.

Die weiteren drei Gruppen haben als gemeinsames Merkmal den gemischten Betrieb. Sie unterscheiden sich in der Hauptsache in bezug auf den verhältnis-

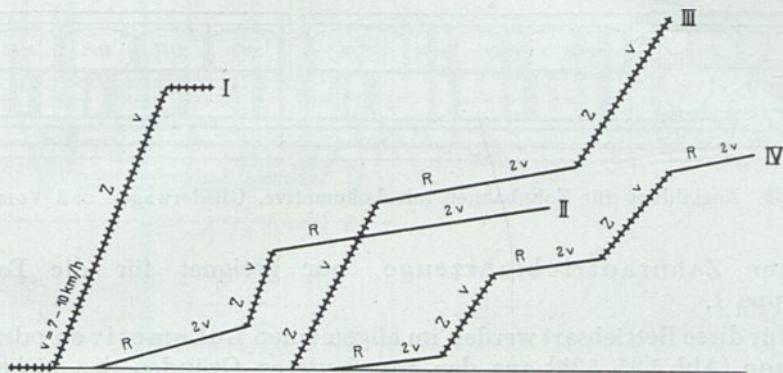


Abb. 534. Schema der Zahnbahnarten.

I. Reine Zahnbahn; II. Reibungsbahn mit einer Steilrampe; III. Zahnbahn mit zwischenliegender Reibungsstrecke; IV. Zahnbahn mit mehreren Reibungsstrecken.

mäßigen Umfang der Reibungs- und Zahnstangenstrecken; ihre scharfe Abgrenzung gegeneinander ist daher oft nicht möglich.

- II. In diese Gruppe sind Bahnen mit überwiegenden oder ausgedehnten Reibungsstrecken mit einer zwischenliegenden Zahnstangenstrecke zu reihen.
- III. Diese dritte Gruppe bilden gemischte Bahnen, die in ihrem Höhenplan nur eine Reibungsstrecke aufweisen.
- IV. Schließlich kommen Bahnen vor, bei welchen sich mehrere Reibungs- und Zahnstrecken abwechselnd wiederholen, somit keine der beiden Betriebsarten vorherrscht.

In dieser Gruppe bilden eine besondere Type Bahnen für große Zugleistungen mit Steigungen bis etwa maximal 80%, auf denen Züge bestehend aus gewöhnlichen Eisenbahnfahrzeugen, die nur mit Reibungskraft gebremst werden, gefördert werden. Diese Bahnen könnten Reibungsbahnen mit Zahnstangenbetrieb genannt werden; ihre Triebfahrzeuge sind so eingerichtet, daß etwa die halbe Zugkraft durch Ausnutzung der Reibung des Triebgewichtes erzeugt wird.

13. Arten der Triebfahrzeuge. In allen Fällen kann die gestellte Transportaufgabe mit Lokomotiven oder Motorwagen gelöst werden; tatsächlich weisen alle vier Kategorien beiderlei Ausführungen auf. Nichtsdestoweniger kann festgestellt werden, daß man dem Motorwagenbetrieb meist nur für Bahnen der IV. Kategorie und kleine Züge, also Touristenbahnen mit derartigem Höhenplan, einige Berechtigung zusprechen kann.

Für reine Zahnbahnen bieten Motorwagen Gewichtsvorteil, wie die vorhandenen Ausführungen beweisen, sie können dagegen in der Mechanik und der elektrischen Ausrüstung wegen der gedrängten Bauart ausgesprochen minderwertig sein.

Im gemischten Betrieb lassen sich durch ein Fahrzeug, welches ohne weiteres die ganze Strecke selbst durchfahren kann, in der Anschaffung und in den Personalkosten im Betrieb namentlich dann nennenswerte Ersparnisse erzielen, wenn die in die Reibungsstrecken wiederholt eingeschalteten Steilrampen sonst die Indienststellung mehrerer Schiebelokomotiven verlangen würden.

Mit Rücksicht auf diese Erwägungen und die obige Einteilung der Zahnbahnen in vier mit ziemlicher Sicherheit trennbare Gruppen lassen sich drei Triebfahrzeugarten erkennen.

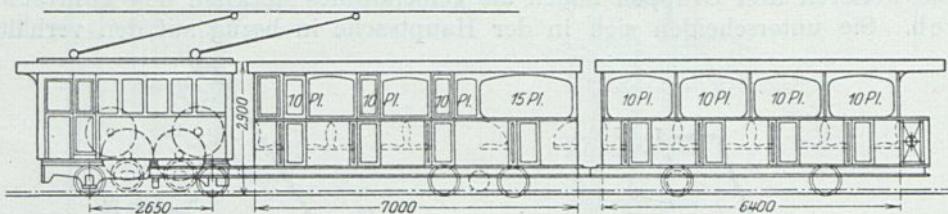


Abb. 535. Zugbildung für Zahnbahnen mit Lokomotive, Gliederwagen und Vorsetzer.

I. Reine Zahnradtriebfahrzeuge, nur geeignet für die Bahnen der Gruppe I.

Für diese Betriebsart werden im allgemeinen Lokomotiven oder Gliederwagen (Abb. 535, 536) aus den angedeuteten Gründen den bisher üblichen Motorwagen vorgezogen.

II. Für Bahnen mit gemischemtem Betrieb der zweiten Gruppe eignen sich Triebfahrzeuge mit gemischemtem Antrieb und nur einer Fahrgeschwindigkeit, indem es zwecklos wäre, die kurzen Anfahrtstrecken, Bahnhöfe und Ausweichungen, die keine Zahnstange haben, mit einer höheren Geschwindigkeit zu befahren als die Zahnstangenstrecken.

Der Betrieb dieser Bahnen wickelt sich oft so ab, daß der am Fuße der Steilstrecke ankommende Motorwagenzug für Reibungsbetrieb von der Zahnradlokomotive über die Zahnstrecke hinaufgeschoben wird und oben angelangt die Fahrt auf der Reibungsstrecke wieder mit eigener Kraft fortsetzt.

III. Die Lokomotiven für Zahnbahnen mit einer zwischenliegenden Reibungsstrecke werden zweckmäßigerweise für zwei Fahrgeschwindigkeiten konstruiert, um auf der Reibungsstrecke unter tunlichster Ausnützung der Leistung rascher fahren zu können.

Die gleiche Einrichtung erhalten Motorwagen für Bahnen der vierten Gruppe mit mehreren wechselweise vorkommenden Reibungs- und Zahnstrecken.

Handelt es sich um die Förderung schwerer Lasten in verhältnismäßig geringen Steigungen (50 bis 70 %), also Reibungsbahnen mit Zahnstangenbetrieb, wobei die Reibungszugkraft noch einen namhaften Anteil der gesamten Zugkraft darstellt, sind zweckmäßig Lokomotiven vorzusehen.

Von den Fahrzeugen für die Bahnen der Kategorie IV werden in den Reibungsstrecken verhältnismäßig größere Geschwindigkeiten verlangt, worauf bei deren Konstruktion Rücksicht zu nehmen ist.

Abt hat seine Maschinen so eingerichtet, daß die Leistung im Zahnrad- und Reibungsantrieb auf zwei voneinander unabhängige Maschinen von annähernd gleicher Leistung aufgeteilt wird. Die bisher gebauten Dampflokomotiven haben eine Höchstzugkraft von 15 000 kg, wovon rund 7 500 kg von den beiden Zahnräder übernommen werden. Für die restliche Reibungszugkraft ist ein Triebgewicht von etwa 52,5 t erforderlich. Die Harzbahn, die Linien Eisenerz—Vordernberg, Zolyom—Brezó—Tisolcz, Beirut—Damaskus und Usui—Toge (Japan)

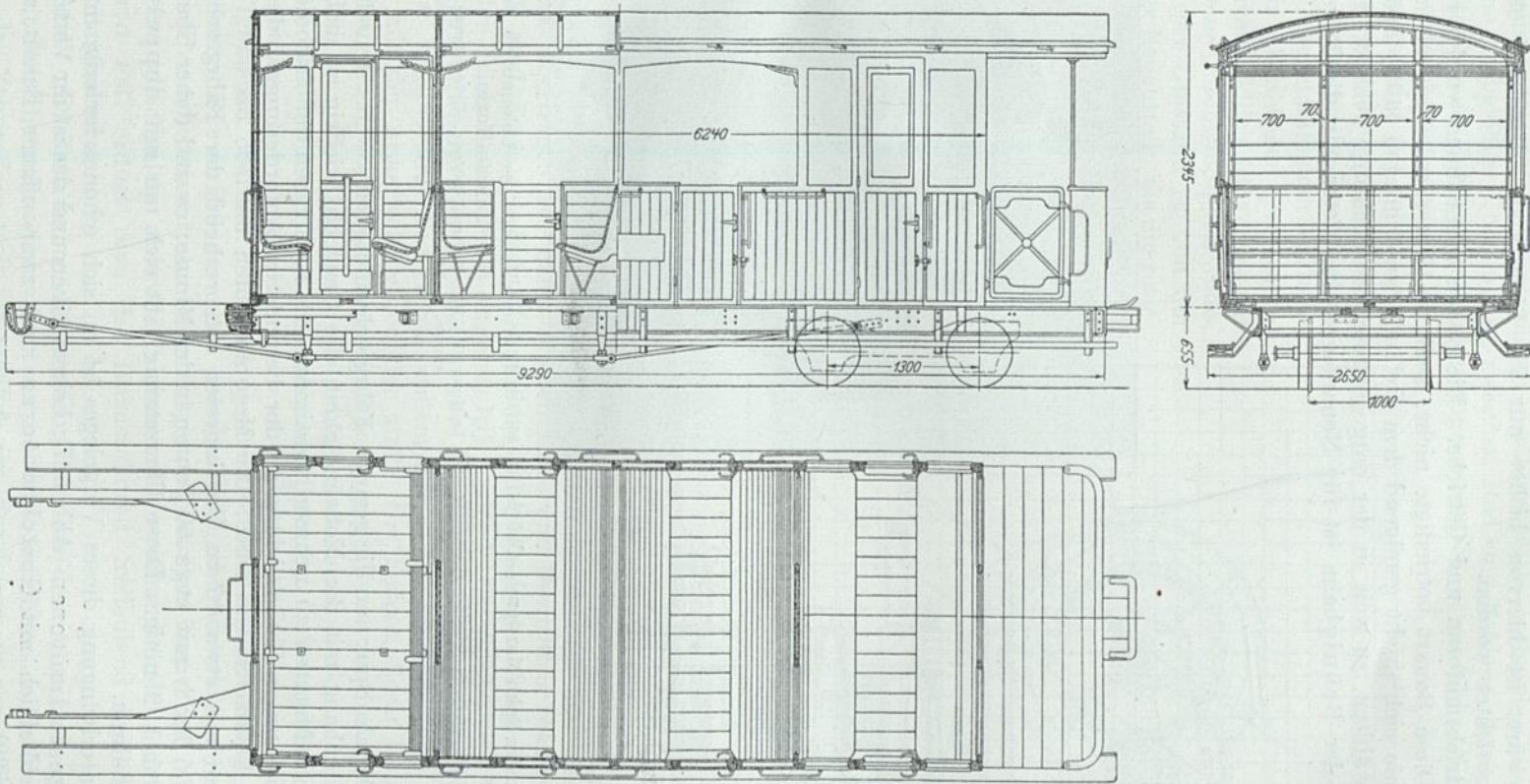


Abb. 536. Gliederwagen der Zahnbahn Brunnen—Morschach. Fassungsraum 45 Sitzplätze, Leergewicht 4,5 t.

werden mit diesem System betrieben. Trotzdem gerade hier der elektrische Betrieb am Platze wäre, ist hiervon bisher nur die Linie Usui—Toge auf elektrischen Betrieb eingerichtet worden.

14. Antriebsmotoren und Getriebe. Die ersten Zahnbahnen wurden regelspurig angelegt. Diese Bauart befriedigte nicht, weil die Unterbaukosten zu hoch waren und die Linie sich nicht genügend dem Gelände anschmiegen lässt. Spätere Ausführungen wählten, zu weit in der entgegengesetzten Richtung gehend, die 80 cm-Spur. Seit der Brünigbahn ist für Neuanlagen die Meterspur die Regel.

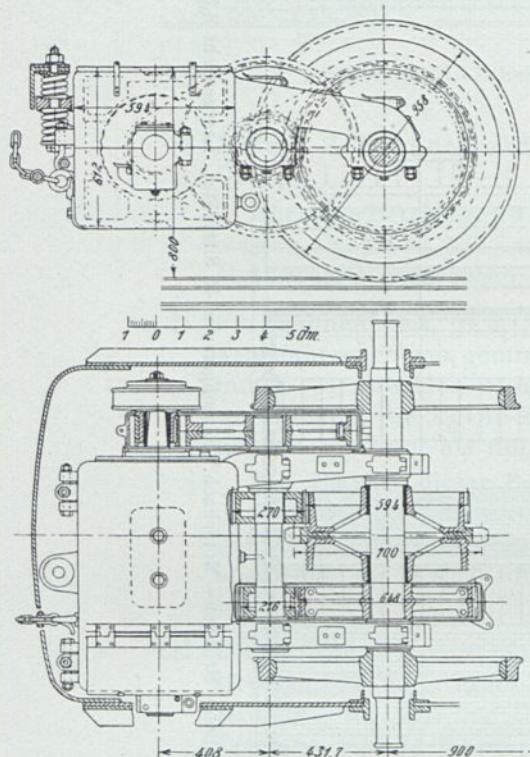


Abb. 537. Triebwagen der Bahn Martigny—Châtelard. Anordnung eines Untergestellmotors für Reibungs- und Zahnstangenbetrieb, beides mit derselben Fahrgeschwindigkeit.

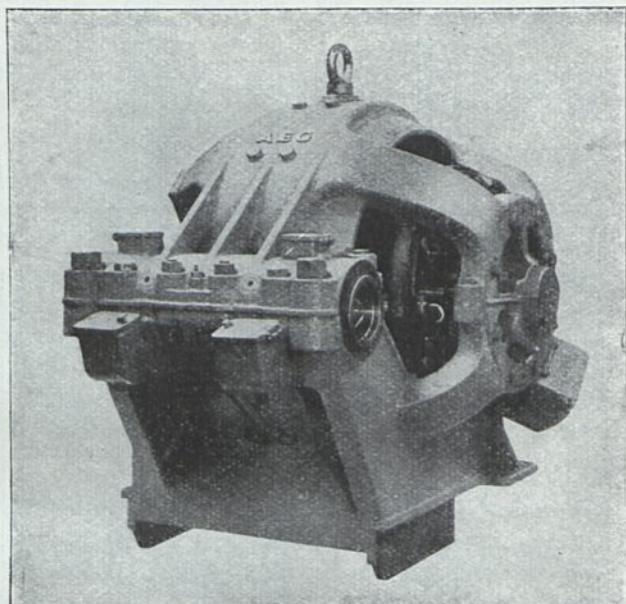


Abb. 538. Gestellmotor der Lokomotive der Zahnradbahn Usui—Toge.

Leistung 350 PS/h, Drehzahl 650/min, Übersetzung 1 : 6,4 f. d. Zahnstange, 1 : 5,9 f. d. Reibungsantrieb. Gleichstrom 650 V.

Die schmale Spur und die geringe Fahrgeschwindigkeit — höchstens 10 km/h — im Zusammenhang mit der Notwendigkeit, die Gewichte niedrig zu halten, daher rasch laufende Motoren zu nehmen, bestimmen die Bauformen der Triebmotoren und des Getriebes unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen, die für jede Betriebsart kennzeichnend sind. Die Motoren laufen mit 785 bis 550 Touren, das Triebzahnrad mit etwa 0,7 m Durchmesser entsprechend der Fahrgeschwindigkeit von etwa 7,5 km/h mit etwa 60 Touren in der Minute; es sind daher Übersetzungen von 1:13 bis 1:9 nötig. Diese Übersetzung lässt sich nur mit doppeltem Vorgelege ausführen.

Die Unterbringung dieses Vorgeleges ist an sich schon schwierig, insbesondere bei Untergestellmotoren (Abb. 537); Lokomotiven und das ist ihr Vorteil, werden daher ausschließlich mit Gestellmotoren und zwar offener Bauart ausgerüstet (Abb. 538, 539).

Die für den Bahnbetrieb stets als nachteilig erkannte Starrheit im Getriebe ist hier gegenüber dem Reibungsbetrieb im erhöhten Maße vorhanden, weil die einzige vorhandene nachgiebige Übertragung zwischen Rad und Schiene durch das zwangsläufige Getriebe vom Zahnrad und Zahnstange ersetzt ist, somit fehlt. Nachteilig tritt auch das vergleichsweise große Trägheitsmoment der mit hoher Drehzahl umlaufenden Massen und das geschlossene Getriebe in Erscheinung.

Jede Unregelmäßigkeit der Zahnteilung, die schon wegen der Wärmebrüche unvermeidlich ist, verursacht stoßartig eine Geschwindigkeitsänderung. Dieser Umstand ist von um so größerer Bedeutung, als die rotierenden Massen nach durchgeföhrten Versuchen bei Zahnradlokomotiven die lebendige Kraft der linear bewegten Massen oft vervielfachen.

Meistens sind beide Übersetzungen gekapselt, zumindest aber die erste. Für letztere pflegt man Pfeilräder zu verwenden, weil das verfügbare Breitenmaß gering ist.

15. Die Rutschkupplung. Im Interesse der Schonung des Getriebes und der Motoranker und um mit Rücksicht auf die Aufsteigegefahr den Höchstwert des Zahndruckes zu begrenzen, hat es sich als notwendig erwiesen, in das Getriebe ein nachgiebiges Element, eine Rutschkupplung Abb. 293 einzubauen.

Diese wird stets auf der Ankerwelle angeordnet, da hier das kleinste Drehmoment zu übertragen ist; daher bleiben Maße und Gewicht in mäßigen Grenzen. Vorteilhaft sind auch gefederte Zahnkränze oder elastische Ausgleichskupplungen zwischen den Triebzahnradern (Wengernalp).

Die Rutschkupplung besteht aus zwei Ringsystemen verschiedenen Materials, die mittelst regulierbarer Federn zusammengepreßt und einerseits mit dem Ritzel, andererseits mit der Ankerwelle verbunden sind. Die Federn dieser Lamellenkupplung werden so angezogen, daß nur die Übertragung der zulässigen größten Zugkraft möglich ist. Ein Maß hierfür bildet die Ankerstromstärke.

16. Die Handbremse. Am Triebzahnrad sitzen bei Lokomotiven stets zweiseitig die gerillten Bremsscheiben, die bei älteren Ausführungen mit Bronzebändern gebremst wurden, die sich gerne festbrennen; neuerdings verwendet man gußeiserne Bremsklötze. Die auf das Triebzahnrad wirkende von Hand betätigte Bremse arbeitet mittelst eines Ausgleichsgestänges immer auf zwei Bremsachsen ganz gleichgültig ob zwei Triebzahnräder vorhanden sind oder nur eines. Im letzteren Fall ordnet man das Bremszahnrad freilaufend auf der unteren (hinteren) Laufachse an.

Die Trieb- und Bremszahnräder versieht man bei den Abt- und Strub-Zahnstangen mit Sicherheitsflanschen von etwas größerem Durchmesser als die Triebzahnräder, um das Zahnrad so weit als möglich am Entgleisen zu verhindern.

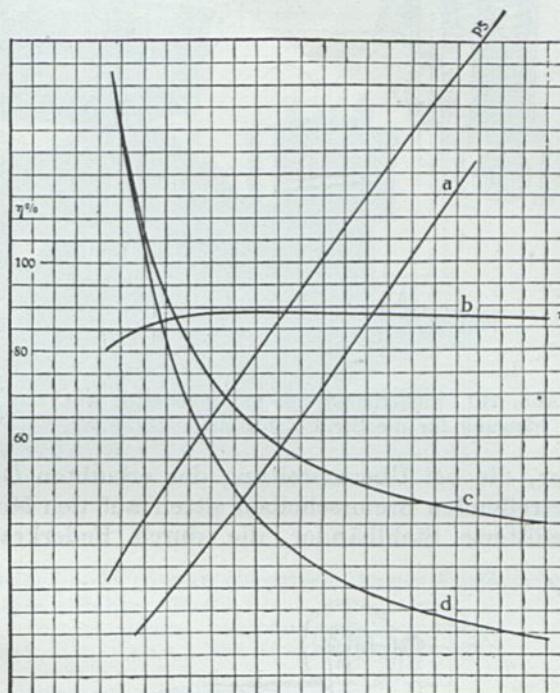


Abb. 539. Kennlinien der Lokomotive der Usui—Togebahn, Zahnstangen- und Reibungsbetrieb. a: Zugkraft, b: Wirkungsgrad einschl. Zahnradübersetzung, c: Uml. je min, d: Geschwindigkeit km/h.

17. Die Zange. (Abb. 540.) Dem gleichen Zwecke dient die bei der Leiterzahnstange und insbesondere bei der Strubschen Stange anwendbare Zange, deren Klauenöffnung, die den Kopf der Zahnstange umfaßt, mit einer so geringen lichten Weite bemessen wird, daß das Aufsteigen auf dasjenige Maß begrenzt wird, daß der Zahneingriff nicht verloren gehen kann. In der Praxis hat sich erwiesen, daß man auch die Zange federnd aufhängen muß, um zu verhindern, daß die Zange durch die heftigen Stoßwirkungen aufgeht oder sonst ein Bestandteil der Aufhängung Schaden erleidet. Als Bremsmittel hat sich die Zange nicht bewährt.

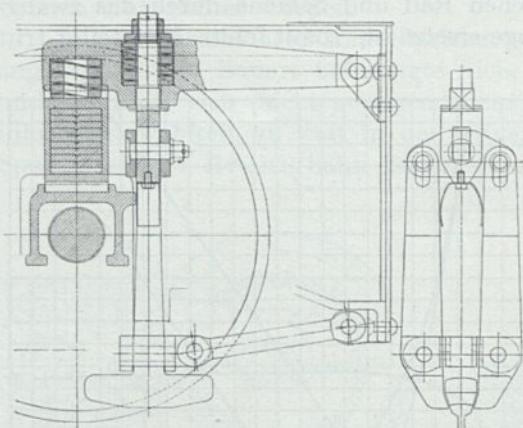


Abb. 540. Sicherheitszange mit gefederter Aufhängung für die Strub-Zahnstange (S.L.F.W.).

vor, die bei Überschreitung der erlaubten Geschwindigkeit in Tätigkeit tritt. Die betreffenden Bremsscheiben sitzen auf den Motorwellen und werden mittelst kupfergefütterte Stahlbänder, die durch Federkraft angezogen werden, gebremst. Die

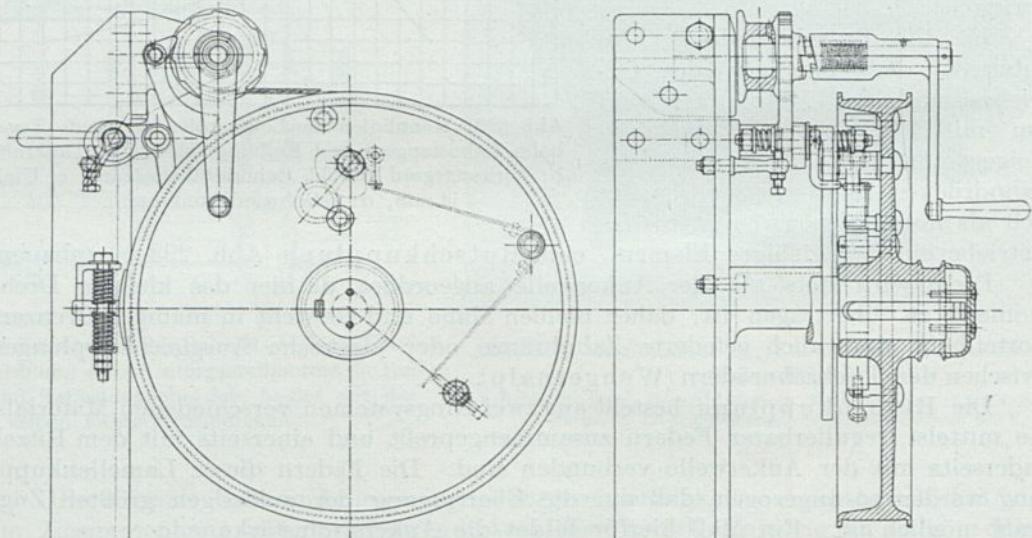


Abb. 541. Geschwindigkeitsbremse mit Fliehkraftauslösung.

Auslösung dieser Bremse erfolgt durch Fliehkraft oder auch von Hand. Zur Milderung der Bremswirkung wird die Federwirkung durch einen Glyzerinkatarrakt gehemmt.

19. Das Gestell. (Abb. 542, 543.) Die Bauformen des Rahmens der Zahnradlokomotiven für Steilbahnen mit $s > 100\%$ werden in der Hauptsache von dem Gesichtspunkt beeinflußt, daß die Kippmomente in unbedenklichen Grenzen gehalten werden müssen. Lokomotiven für schwere Züge auf Strecken mit 50 bis 70% weisen Bauformen auf, die sich den Reibungsmaschinen nähern.

Nachdem das Aufsteigen an sich bei Zahnbahnen mit vertikalem Zahneingriff niemals absolut ausgeschlossen werden kann, müssen zum Schutze gegen diese Ge-

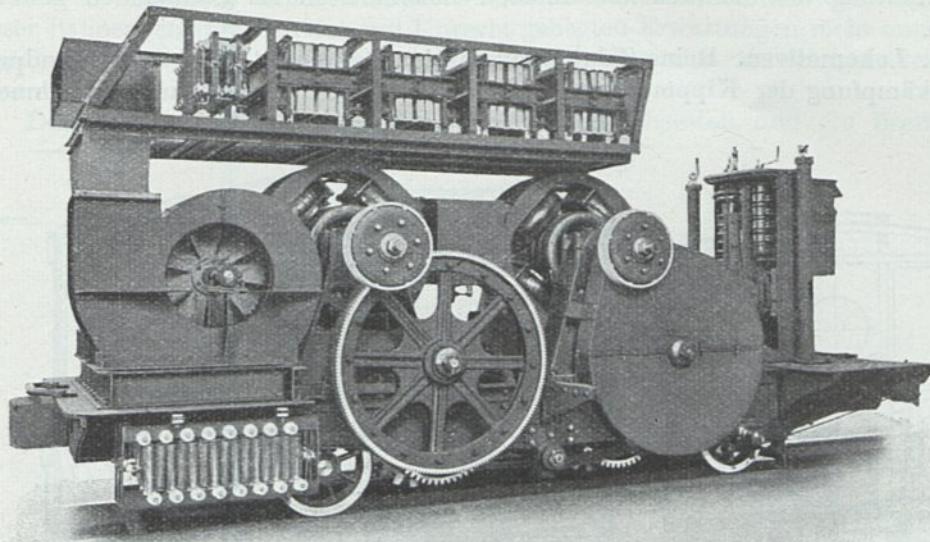


Abb. 542. Lokomotive der Wengernalpbahn Reihe 51—54 (Kasten abgehoben, Bremswiderstände und Rutschkupplungen sichtbar, Allioth).

Achsenfolge	2/2a.	Drehzahl	750/min.	Dienst-Gewicht	16,15 t.
Leistung (Dauer)	2×150 PS.	Geschwindigkeit	8 km/h.	Gewicht der elektr. Ausrüstung	8,1 t.

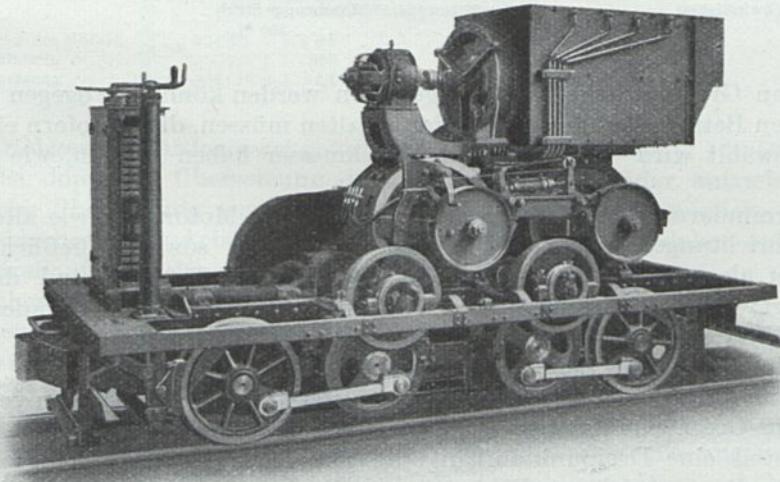


Abb. 543. 2A/2a. Zahnradlokomotive der Montreux—Glion-Bahn. Anordnung und Betätigung der selbstdämmenden Bremsen.

fahr stets die bereits behandelten Einrichtungen vorgesehen werden. Die enormen Kräfte, denen der Rahmen in solchen Fällen ausgesetzt ist, verlangen eine sehr widerstandsfähige Bauart, die auch schon wegen der an sich großen Zugkräfte nötig ist. Diesen Anforderungen kann mit dem geringsten Gewichtsaufwand durch einen Innenrahmen entsprochen werden. Im Hinblick auf die Anordnung der

Triebzahnräder und der Zange, sowie die zweckmäßige Mehrbelastung der bergseitigen Achse können die Gestelle stets nur in einer Lage benutzt werden. Bei Überschreitung des Bahnscheitels müssen Lokomotiven für Steilbahnen gewendet werden.

20. Lokomotiven. Reine Zahnradlokomotiven (Abb. 544) sind vom Standpunkt der Bekämpfung der Kippmomente insofern im Vorteil, als die Laufraddurchmesser

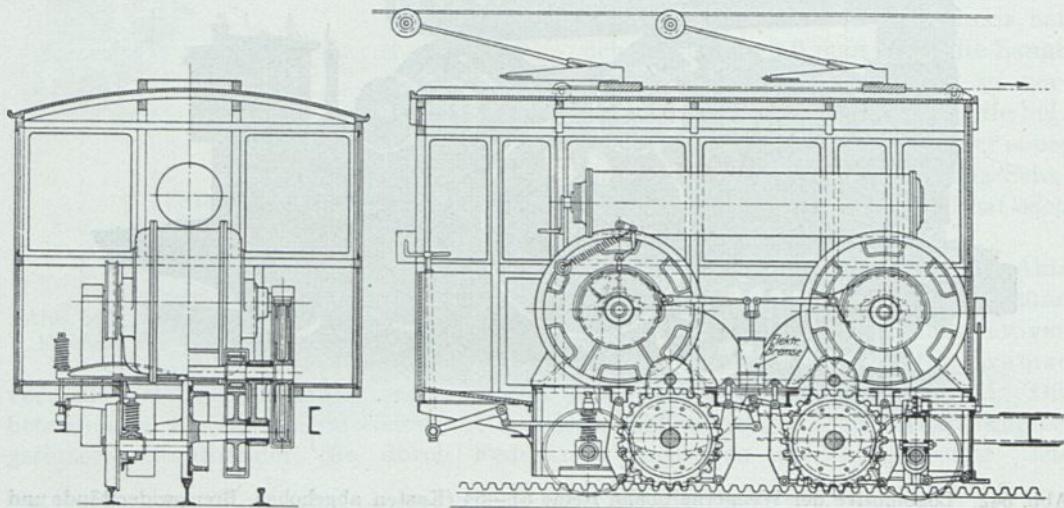


Abb. 544. Lokomotive für reinen Zahnstangenbetrieb der Jungfraubahn, Reihe 1 bis 8.

Achsenfolge	2/2 a	Triebzahnräder-Durchmesser	700 mm
Leistung	2 × 125 PS, 800 Touren/min	Dienstgewicht	13 t
Fahrgeschwindigkeit	8,5 km/h	Zahnstange Strub	
Größte Steigung	250 ‰		

in praktischen Grenzen beliebig klein gehalten werden können, wogegen Maschinen für gemischten Betrieb Reibungstriebräder erhalten müssen, die — sofern eine direkte Kupplung gewählt wird — den gleichen Durchmesser haben müssen, wie die Triebzahnräder.

Zur Verminderung des Kippmomentes müssen die Motoren, sowie alle sonstigen schweren Einrichtungen möglichst niedrig angeordnet, sowie schließlich auch die Puffer so tief als möglich gesetzt werden. Bei älteren Bahnen sind die Puffer nicht gefedert; diese Anordnung ist verlassen und es erhalten zumindest die geschobenen Fahrzeuge stets eine Federung.

Der ordnungsgemäße Zahneingriff verlangt, daß die Tragfedern ganz entfallen oder die Federung auf ein Minimum beschränkt wird. Bei den vorkommenden mäßigen Geschwindigkeiten ist dies zulässig, jedoch gibt man dem zweiachsigen Gestell eine Dreipunktaufhängung, um den Unebenheiten des Oberbaues namentlich in Bogeneinfahrten Rechnung zu tragen. Gewöhnlich wird die vordere (bergseitige) Achse in eine gefederte Wiege gelagert, die gleichzeitig die gefederte Zange trägt.

Fahrzeuge für gemischten Betrieb für größere Geschwindigkeiten in den Reibungsstrecken erhalten zwei Rahmen. Der innere mit dem Antrieb für die Zahnstange ruht ungefedert auf den Laufachsen, der äußere erhält die übliche Federung.

Das Getriebe soll so angeordnet werden, daß die Triebzahnräder möglichst in die Nähe der Tragachsen zu liegen kommen, damit die volle Zahnbreite auch in Krümmungen eingreift.

21. Motorwagen. Es gibt nur vereinzelte reine Zahnbahnen mit reinem Motorwagenbetrieb (Abb. 545); für einige derselben kam es zu Ausführungen, die sich als durchaus minderwertig erwiesen haben. Insbesondere die Wagen einer dieser Bahnen entsprachen den mit Unrecht gehegten Erwartungen nicht und mußten umgebaut werden. Es ist wissenswert, die Ursachen des Mißerfolges kennen zu lernen.

Der Drehgestellwagen der Bahn hatte ein Triebgestell und ein Bremsgestell.

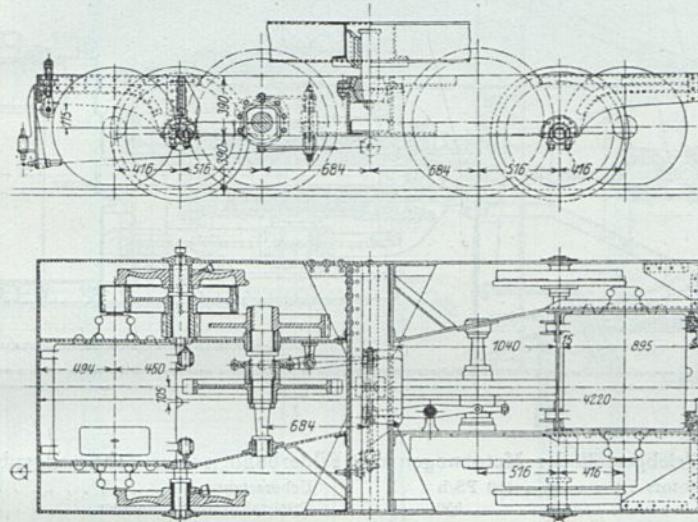


Abb. 545. Drehgestell mit Antrieb eines Triebwagens für reinen Zahnstangenantrieb.

Leistung der Motore $2 \times 130 = 260$ PS
Umläufe/min 750
Übersetzung $1:4,85 \times 1:15 = 1:12,1$

Fahrgeschwindigkeit 7,5 km/h
Größte Steigung 210 ‰
Gewicht des Triebwagens 25,6 t.

Im Triebgestell wurden zwei gekapselte Bahnmotoren von je 130 PS angeordnet, die mittelst doppelter Übersetzung die beiden Triebzahnräder antrieben. Um die erforderliche Übersetzung anordnen zu können, war es nicht möglich, die Laufräder auf eine durchgehende Achse anzutragen, dieselben wurden daher auf kurze Achsstummel freilaufend gelagert.

Zwischen dem zweiten Vorgelege und Triebzahnrad wurde eine Klauenkupplung eingebaut, zu dem Zwecke die Motoren in der Talfahrt vom Getriebe abschalten zu können.

Am Bremsgestell war ein Zwillingskolbenkompressor vorhanden, welcher vom talfahrenden Wagen durch die Bremszahnräder angetrieben wurde. Es war demnach die bei allen Dampflokomotiven vorhandene Repressionsbremse angewendet, die insofern eine Betriebsgefahr bilden kann, als bedenkliche Druckerhöhungen durch ungeschickte Bedienung der Zischhähne nicht ausgeschlossen sind.

Dieser Motorwagen vereinigte somit in sich alle Übelstände des elektrischen und des Dampfbetriebes, der gemischten Betriebsweise und der Untergestellmotoren, ohne — selbst in bezug auf das Totgewicht — irgendeinen Vorteil aufzuweisen.

Kurz zusammengefaßt hatte dieser Wagen folgende Eigenschaften:

Keinen Reibungsantrieb und doch eine Kupplung im Getriebe nötig, gedrängte Untergestellbauart, starres Getriebe, keine Rutschkupplung, unwirtschaftliche Bremsung mittelst kompliziertem Mechanismus, Gewicht 522 kg/m^2 gegen 470 bis 500 kg/m^2 bei Lokomotivbetrieb.

Die Motorwagen der Filderbahn (Abb. 546) sind insofern vollkommener, als eine wirtschaftliche elektrische Nutzbremsung durch Nebenschlußmotoren vorgesehen ist. Aber auch hier fehlt die Rutschkupplung. Dabei ist das Gewicht von 662 kg für das qm Wagenfläche keineswegs geringer als das gesamte Totgewicht bei anderen reinen Zahnradbahnen mit Lokomotiv- bzw. Gliederwagenbetrieb. An dieser

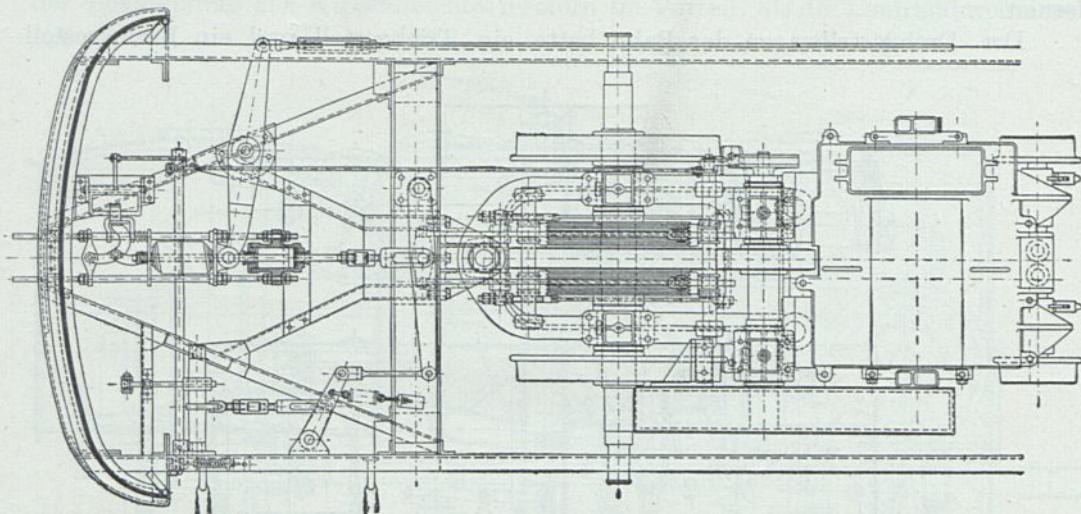


Abb. 546. Triebgestell der Motorwagen der Filderbahn, reiner Zahnstangenbetrieb.

Leistung des Motors	150 PS/h	Uebersetzung	1:9,2
Umläufe/min	550	Triebzahnraddurchmesser	455 mm
Gewicht			5 t.

Sachlage trägt nicht zuletzt das relativ hohe Gewicht der geschlossenen Untergestellmotoren gegenüber den offenen Gestellmotoren die Schuld, weiter auch die Tatsache, daß Fahrzeuge mit großem Achsstand auch im Einheitsgewicht schwerer werden. Der 130 PS leistende Filderbahnmotor wiegt z. B. 5 t gegenüber 2,8 t des 150 PS dauernd leistenden Motors der Rittnerbahn-Lokomotive.

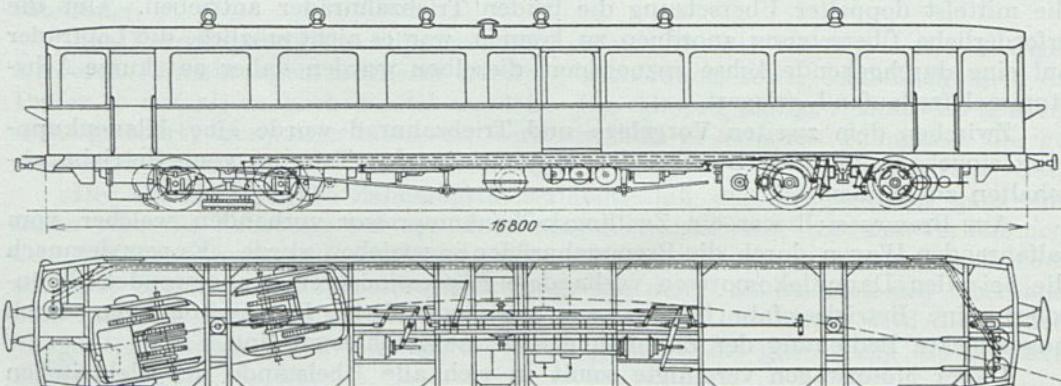


Abb. 547. Lokalbahn Martigny—Chatelard, Gemischter Betrieb (Reibung und Zahnrad), Meterspur, viermotoriger Triebwagen, A.E.G.-Schienenbremse.

22. Triebfahrzeuge der zweiten Art. (Abb. 547, 548, 549, 550.) Die einfachste Anordnung für die gemischte Betriebsart mit nur einem Geschwindigkeitsbereich ist das Kuppeln der Laufachsen mit der Triebachse des Zahnrades. Für den einwandfreien Betrieb besteht die Bedingung, daß der Durchmesser

des Teilkreises von Triebzahnrad und Laufrädern gleich ist. (Abb. 549.) Praktisch läßt sich dies nicht voll erreichen wegen der Abnützung der Radreifen. Man gibt

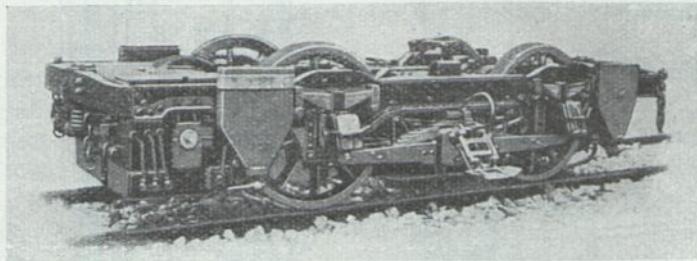


Abb. 548. Ansicht des Drehgestelles von Abb. 547.

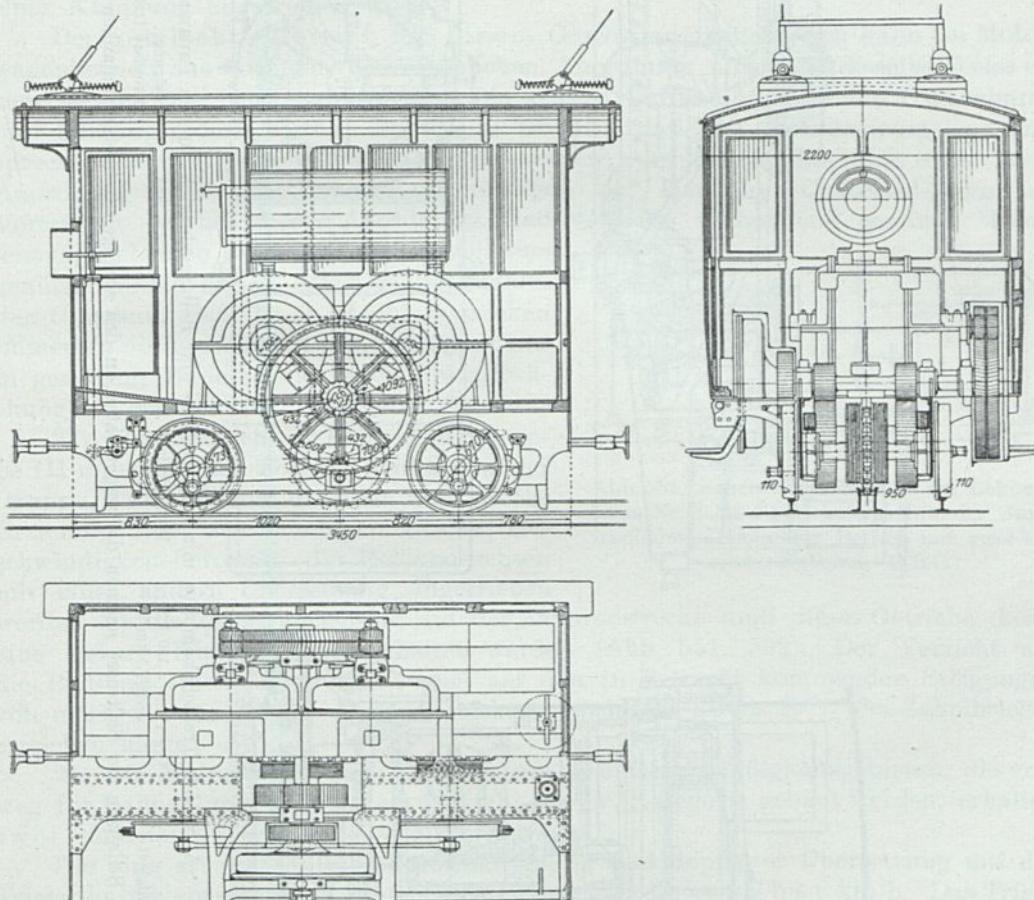


Abb. 549. B/a-Lokomotive der Zahnbahn Stansstad—Engelberg.

Leistung 2×130 PS
Geschwindigkeit 5.0 und 11.5 km/h

Dienstgewicht 12 t
Stromart D.S. 750 V.

letzteren in neuem Zustande z. B. bei 700 mm Triebzahnrad Durchmesser einen um 5 bis 7 mm größeren Durchmesser und läßt eine Abnutzung auf äußerst 695 mm zu. Im Neuzustand eilen die Reibungsräder also vor; der Arbeitsverlust ist gering, wenn man bedenkt, daß wegen der Schmierung der Zahnstange auch die Schienen

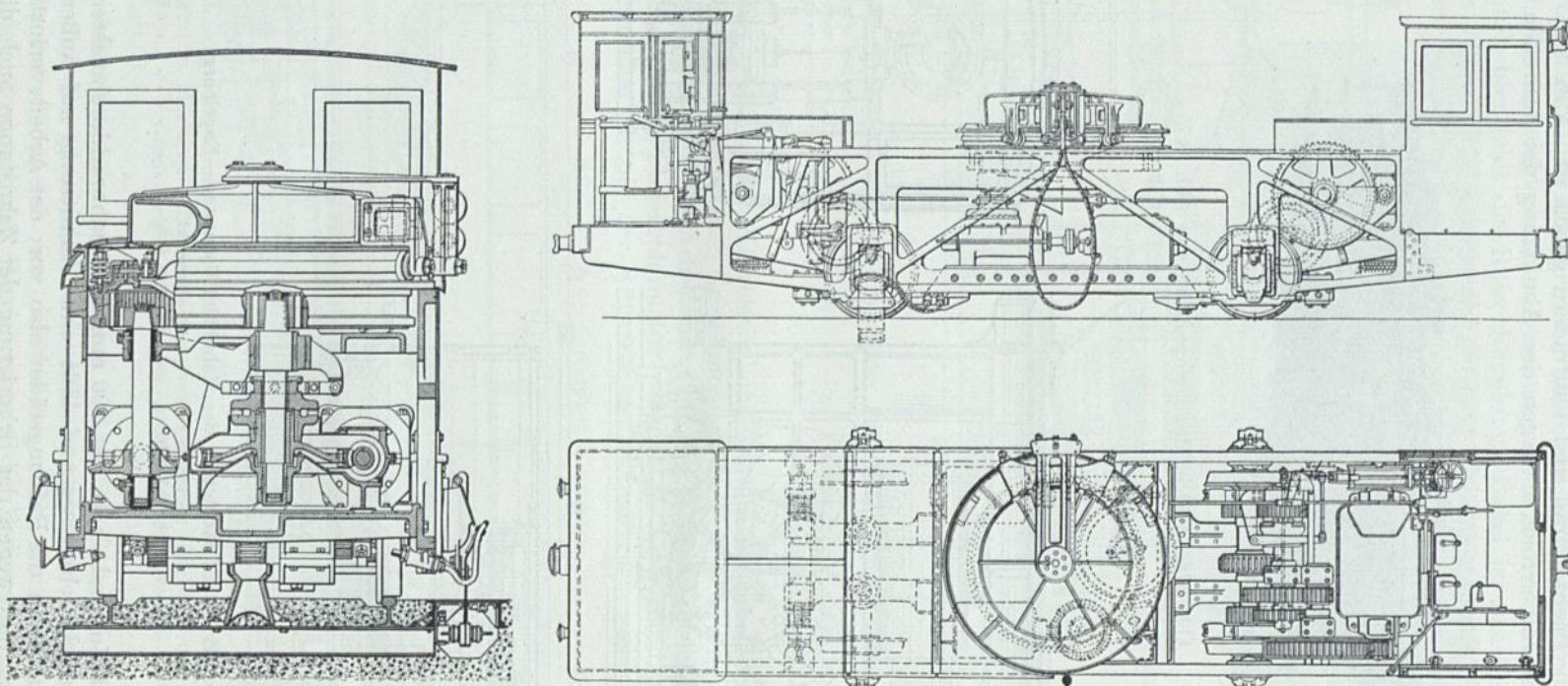


Abb. 550. Treidellokomotive mit Zahnstangen- und Reibungsbetrieb für den Panamakanal, 2A/2a.

Leistung	150 PS	Dienstgewicht	39 t	Steigung	40 %
Geschwindigkeit	3,2/7,5 km/h			Stromart D.S.	220 V 55 ~

(Den Seitenzug der Seiltrosse nehmen die wagerechten an den schrägen Zahnstangenflanken geführten Räder auf.)

meist schmierig sind. Für die Rittnerbahn-Lokomotiven, die 16,5 t wiegen und mit 2 m/sec fahren, beträgt dieser Verlust höchstens

$$4,4 \text{ PS bei } \mu = \frac{1}{10}, \text{ d. s. } 1,5\% \text{ der Lokomotivleistung.}$$

Wäre der Verlust größer, würde an den Radreifen eine hohe Abnutzung eintreten, was nach langjähriger Betriebserfahrung nicht der Fall ist.

Nichtsdestoweniger hat man bei neueren Ausführungen diesen Übelstand zu vermeiden gesucht und schaltet in den Antrieb der Reibungsachsen eine lösbar Kupplung ein. Man kann auf diese Weise in Zahnstangenstrecken die Reibung mitbenützen oder auf diese verzichten. Der Antrieb hat dann folgende Anordnung: Motoranker, Rutschkupplung, Ritzel, Vorgelegewelle, Triebzahnrad lose auf einer Kurbelwelle sitzend, die mit den Reibungsrädern durch Stangen gekuppelt ist und vom Vorgelege mit einer entsprechend anderen Übersetzung unter Zwischenschaltung einer Kupplung angetrieben wird.

Der gemischte Betrieb mit einem Geschwindigkeitsbereich kann bei Motorwagenbetrieb aus Gründen der räumlichen Anordnung nicht auf dieselbe Weise erzielt werden wie bei Lokomotiven. Die starre Verbindung zwischen Triebzahnrad und Reibungsrädern wird in der Weise bewirkt, daß das Zwischenvorgelege entsprechend dem Unterschied in den Durchmessern verschieden ausgeführt wird. Diese Anordnung weist ein Teil der Motorwagen der Martigny—Châtelard-Bahn auf. Vorteilhaft ist bei dieser Anordnung, daß stets die vorhandene gesamte Motorleistung in beiden Betriebsbereichen voll ausgenutzt werden kann. Einen Mangel bildet der Umstand, daß die in Reibungsstrecken immerhin nötige höhere Geschwindigkeit nur in geringem Maße, etwa durch Feldschwächung zu erzielen ist. (Granada, Barmen.)

23. Lokomotiven für Bahnen der Gruppe III unterscheiden sich von denjenigen der Gruppe I und II nur dadurch, daß zwecks Erzielung eines zweckmäßigen zweiten Geschwindigkeitsbereiches die Reibungsachsen mit einer andern Übersetzung angetrieben werden als die Zahntriebachsen; auf der Zahnradstrecke muß dieses Getriebe durch eine lösbar Kupplung abgeschaltet werden (Abb. 551, 552). Der Verzicht auf die Reibung spielt keine Rolle, weil auf den in Betracht kommenden Steigungen von meist 200 bis 250 % die Reibungskraft höchstens 10 bis 20 % des Zahndruckes erreichen kann.

24. Die Motorwagen der 3. Gruppe mit zwei Geschwindigkeitsgebieten, die vorweg für Bahnen mit gemischem Betrieb der IV. Kategorie gebaut werden, erhalten zwei voneinander unabhängige Motorgruppen.

Die eine arbeitet mittelst Rutschkupplung und doppelter Übersetzung auf das Triebzahnrad entsprechend einer Fahrgeschwindigkeit von 6 bis 9 km/h. Das Triebzahnrad sitzt einschließlich Bremsscheibe freilaufend auf einer Reibungsachse.

Die zweite Achse desselben Drehgestelles wird von einem zweiten Motor mit einfacherem Vorgelege angetrieben. Nachdem Bahnen im gebirgigen Gelände zweckmäßigerweise auch in den Reibungsstrecken die Neigungsgrenze ausnützen, wird diese Reibungsachse mit der anderen mechanisch gekuppelt (Abb. 553, 554).

Diese Anordnung leidet an dem Übelstand, daß die elektrische Ausrüstung verhältnismäßig schwer wird, indem gerade dort, wo die größte Leistung benötigt wird, die Reibungsmotoren nicht oder nicht ganz ausgenutzt werden können.

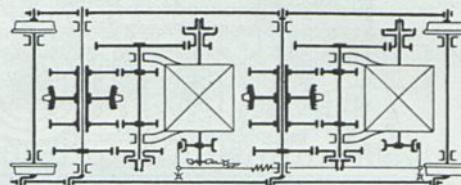


Abb. 551. Schema des Getriebes der Lokomotiven Nr. 8 bis 10, Achsfolge B/b der Jungfraubahn. Gemischter Betrieb mit zwei Geschwindigkeiten (B.B.C.).

Das stromlose Mitschleppen dieser Motoren wäre nachteilig, weil der beträchtliche Leerlaufsverlust auch noch aufgewendet werden müßte. Man legt die Mo-

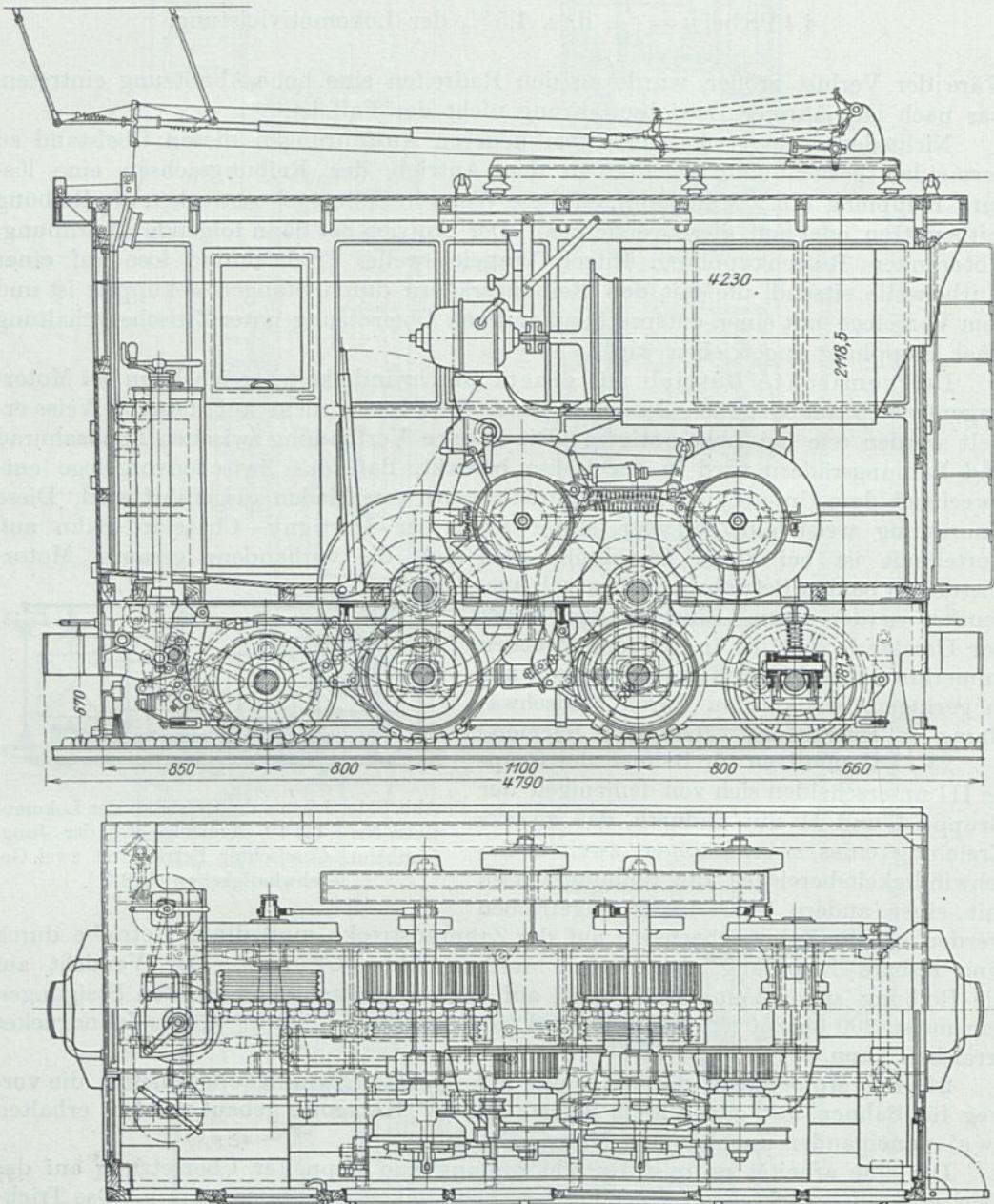


Abb. 552. Lokomotive der Zahnbahn Montreux—Glion. Gemischter Betrieb.

Achsenfolge	2A/2a	Leistung	2×110 PS
Stromart	800 V	Dienstgewicht	14,2 t.

toren mit einer solchen Charakteristik aus, daß sie in Reihe geschaltet die durch ihre Leistung und die Reibung begrenzte Zugkraft bei derselben Geschwindigkeit entwickeln wie die Motoren für den Zahnradantrieb.

Bahnen dieser Art: Monthey—Champéry, Münsterschlucht, Stresa—Mottarone.

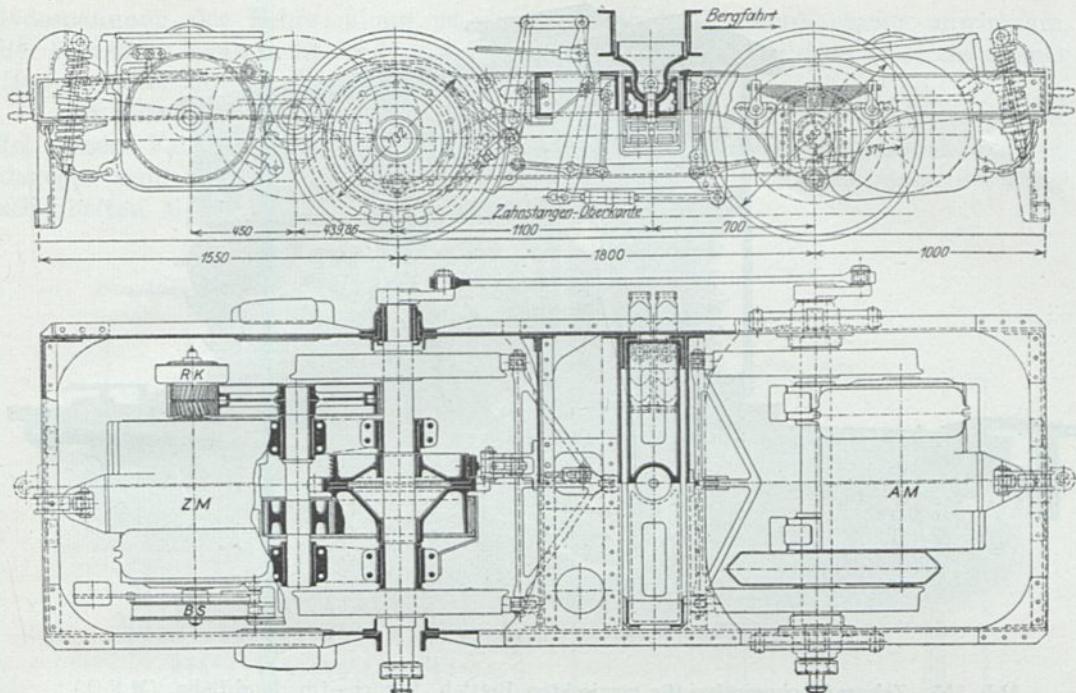


Abb. 553. Drehgestell, Achsfolge B/a des Triebwagens der Monthey—Chambéry-Bahn (Allioth—S.L.F.W.)

Leistung der Triebmaschinen	$2 \times 75 - 150$ PS	Fahrgeschwindigkeit auf den Reibungsstrecken	20 km/h
Umläufe/min.	500	Fahrgeschwindigkeit auf den Zahnstangenstrecken	10 km/h
Größte Steigung	136%		

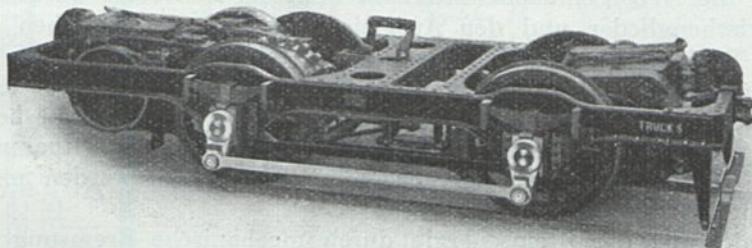


Abb. 554. Triebgestell B/a des Triebwagens der Monthey—Champéry-Bahn.

25. Vollbahnverkehr. Für den Güterverkehr auf Vollbahnstrecken mit Steigungen, die die Verwendung normaler Bahnhörzeuge gestatten (50 bis 70%), äußerst 85%) kommen nur Zahnbahnlkomotiven in Frage, deren Reibungsgewicht zur Ausübung der Zugkraft herangezogen wird. Sie sind für gemischten Betrieb einzurichten, da die Reibungskraft noch einen hohen Prozentsatz der gesamten Zugkraft ausmacht und werden ähnlich wie bei den Abtschen Dampflokomotiven für jede Betriebsart mit einer von der anderen unabhängigen Antriebsmaschine ausgerüstet.

Ein Beispiel hierfür bilden die schweren dreiachsigen Lokomotiven der Bahn Usui-Toge. Achsfolge C/b, Abb. 489 und der Berner Oberlandbahnen C/b, Abb. 555.

Einer der beiden 350 PS-Hauptschlüßmotoren der ersten treibt mittelst doppelter Übersetzung, senkrechter Triebstange und Kuppelstangen die drei Reibungsachsen an, der andere die beiden miteinander gekuppelten Triebzahnräder.

Diese Lokomotive wiegt 42 t und übt eine Zugkraft von insgesamt 10000 kg aus.

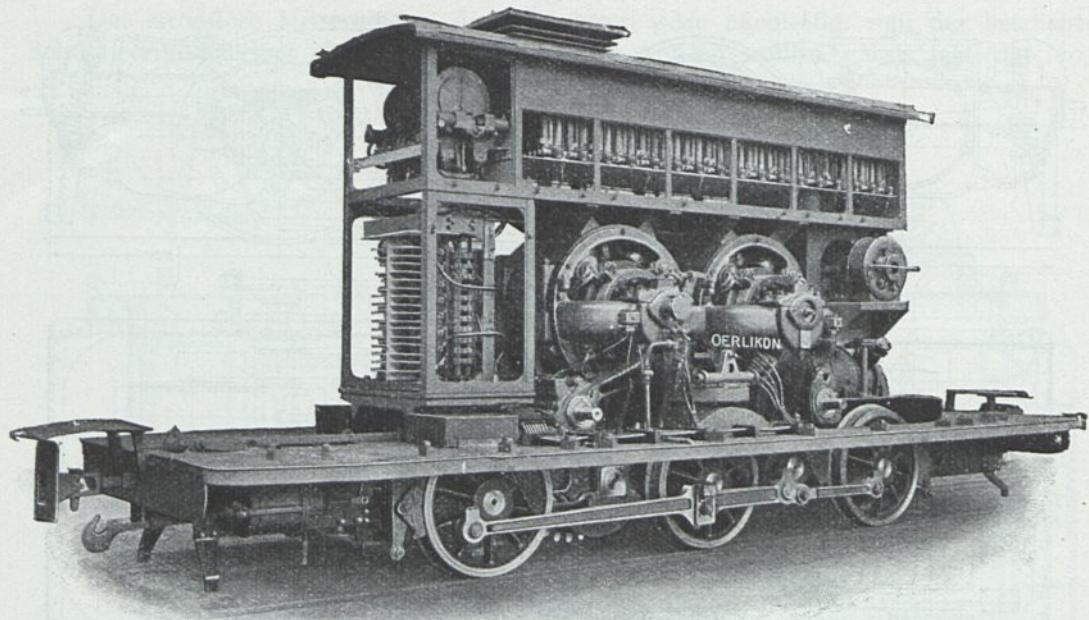


Abb. 555. Zahnrad-Lokomotive für gemischten Betrieb, Berner—Oberland-Bahn. (M.F.O.)

Achsenfolge	C/b	Leistung	$2 \times 400/250$ PS
Spannung			1500 V.

26. Elektrische Ausrüstung. Die Betriebsanforderungen der Zahnbahnen können mit Motoren, die Nebenschlußcharakteristik besitzen, befriedigt werden, wenn für elastische Zwischenglieder und den Ausgleich der Leistung zwischen den beiden Motoren des Triebfahrzeuges gesorgt ist.

Drehstrominduktionsmotoren und Gleichstromnebenschlußmotoren sind mit durchaus gutem Erfolg angewendet worden. Bei dieser Motorart ist besonders die Nutzbremsung während der Talfahrt von Wert, weil sie die Mitnahme schwerer Widerstände, die zudem meist auch noch künstlich gekühlt werden müßten, entbehrlich macht.

Die Vernichtung der Bremsenergie durch mechanische Bremsung kommt bei den vergleichsweise großen Gefällen der Zahnbahnen wegen der damit verbundenen Erhitzung der Bremsklötze nicht in Betracht. Die mechanischen Bremsen gelangen nur zum Anhalten der Züge zur Verwendung, wobei für die Bremsberechnung wichtig ist, die für den Auftrieb zulässigen Verzögerungen nicht zu überschreiten. Kurze Bremswege sind zu vermeiden.

Für Gleichstrom spricht der Umstand, daß durch Heranziehung einer Batterie der zurückgelieferte Strom stets Aufnahme finden kann.

Bei Drehstrom-Talfahrt mit Stromrückgewinnung ins Netz kann, wenn sich kein bergfahrender Zug auf der Strecke befindet, die zurückgelieferte Energie talfahrender Züge im Kraftwerk große Tourenüberschreitungen der Turbinen oder Durchgehen derselben veranlassen. Es wurden deshalb z. B. die Lokomotiven der Jungfraubahn mit Kurzschlußbremsung eingerichtet. Die Drehstrommotoren werden zu diesem Zwecke durch einen Gleichstromgenerator erregt.

Im Gleichstrombetrieb werden bei Spannungen bis 750 Volt Motoren und Felder parallel geschaltet (Abb. 556). Die Schaltung ist so durchzuführen, daß die Anker niemals Strom erhalten können, wenn die Felder noch nicht erregt sind. Mit Rücksicht auf die verhältnismäßig kleine Feldstromstärke und die große Ent-

ladespannung der Feldwicklung ist die magnetische Funkenlöschung unwirksam, der Feldstrom kann nicht im Kontroller geschaltet werden, sondern es ist ein eigener Hauptschalter mit Funkenzieher hierfür vorzusehen.

Bei höherer Spannung schaltet man die beiden Anker und Felder in Reihe. In diesem Fall ist eine besondere Vorsorge für den Belastungsausgleich unnötig, dagegen muß man einen Widerstand vorsehen, der als Ersatz für einen eventuell schadhaften Motor dem anderen vorgeschaltet wird.

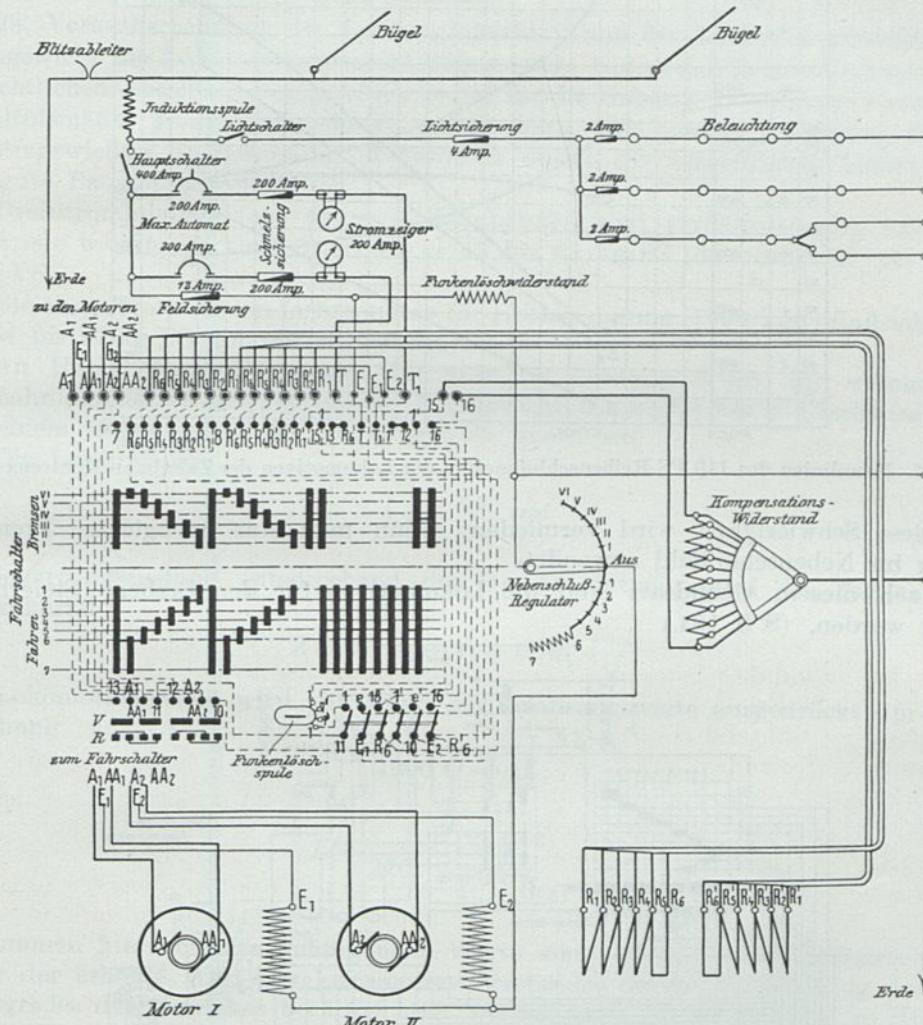


Abb. 556. Schaltbild einer Zahnbahn-Lokomotive der Rittnerbahn mit zwei nebeneinander geschalteten Nebenschlußmotoren. 2×150 PS, 750 Volt, unmittelbare Steuerung mit Ausgleichswiderstand.

Auf die allgemeine Vorliebe für Reihenschlußmotoren ist es zurückzuführen, wenn trotz der Einfachheit der Nebenschlußschaltung vielfach Serienmotoren (Abb. 557) mit Kurzschlußbremsung in der Talfahrt zur Anwendung gelangten, insbesondere bei höheren Betriebsspannungen (Abb. 558).

Die Talfahrt erfolgt dann mit Kurzschlußbremsung, obwohl nach den neueren Ausführungen auch Reihenschlußmotoren durch eine zusätzliche Erregung zur Stromrücklieferung herangezogen werden können. In der Praxis verursacht der Umstand Schwierigkeiten, daß die Feldwicklung derartiger Serienmotoren einen sehr kleinen

Ohmschen Widerstand aufweist; der Spannungsabfall beträgt im Felde kaum einige Volt. Die Erregermaschine müßte als Sonderbauart — wie sie nur für elektrolytische Zwecke üblich ist und in so kleinen Leistungen niemals verlangt wird — hergestellt werden.

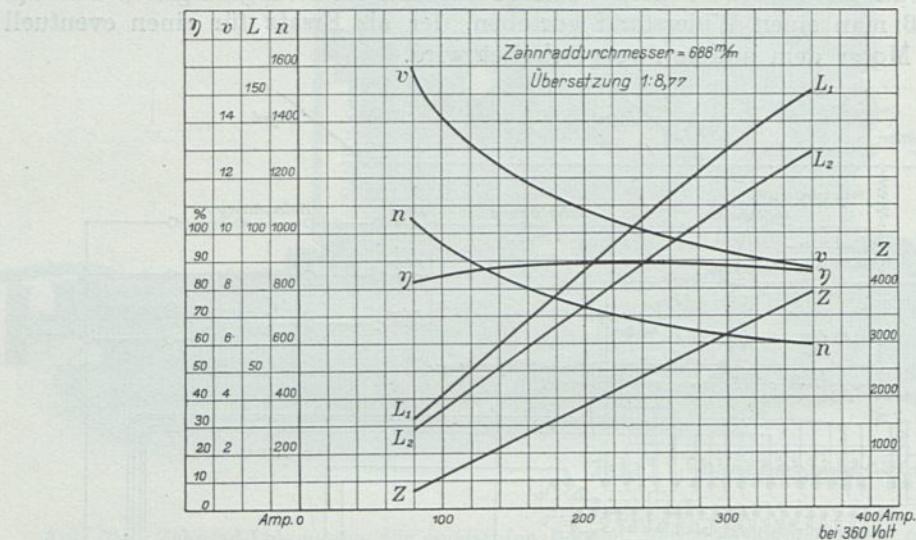


Abb. 557. Kennlinien des 110 PS-Reihenschlußmotors der Lokomotiven der Zahnbahn Montreux-Glion.

Diese Schwierigkeit wird vermieden, wenn man eine nachgiebige Fremdregung im Nebenschlußfeld anwendet.

Nach diesem Grundsatz sind die Lokomotiven für den Erzberg (Steiermark) gebaut worden. (S. S. 194.)

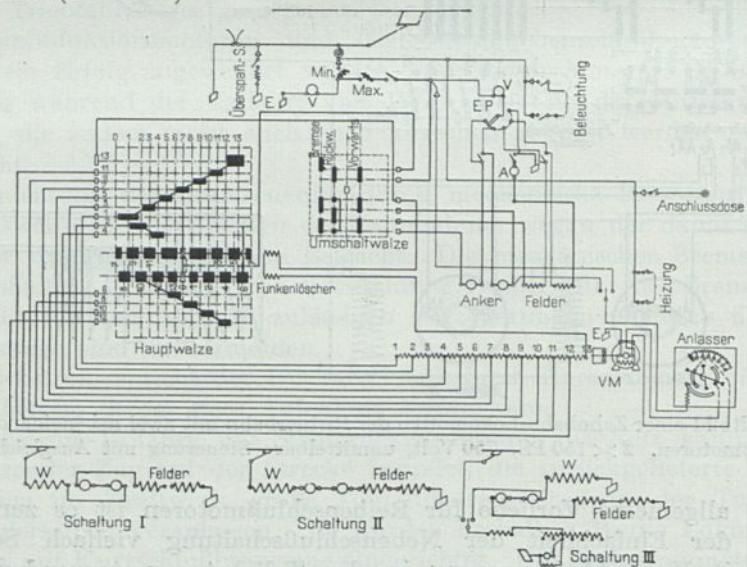


Abb. 558. Schaltplan der Zahnbahn-Lokomotive der Montreux-Glion-Bahn. Reihenschlußmotoren dauernd zu zweit in Reihe geschaltet, Kurzschlußbremsung.

27. Elektrische Nebeneinrichtungen. Zur Steuerung der Motoren dienen die auch sonst gebräuchlichen Fahrschalter, Widerstände usw. Zur Stromabnahme verwendet man ausschließlich Bügel.

Es wird stets nur ein Führerstand vorgesehen und da derselbe einen verhältnismäßig wenig belasteten Teil der Lokomotive bildet, wird auf dem talseitigen Ende angeordnet.

Der Aufbau hat fast überall eine reine Kastenform erhalten; die meisten Zahnradlokomotiven machen einen wenig gefälligen, schweren Eindruck. Man könnte ohne weiteres eine unsymmetrische Zweckform für den Kasten wählen, wodurch die Zugänglichkeit der Ausrüstung verbessert würde.

28. Vorausberechnung der Lokomotivleistung und der Lokomotivgewichte. Das Eigengewicht der Lokomotive erreicht insbesondere bei steilen Zahnradbahnen einen beträchtlichen Anteil am Zugsgewicht; es ist für die Hebung dieses Totgewichtes ein verhältnismäßig großer Aufwand an Arbeit nötig. Die genaue Festlegung des Lokomotivgewichtes ist notwendig. Tatsächlich weisen die ausgeführten Lokomotiven eine gute Baustoffwirtschaft auf.

Drehstromlokomotiven für reine Zahnbahnen sind verhältnismäßig am leichtesten; sie weisen ein Gewicht von $q = 45$ bis 67 kg/PS (dauernd) auf, im Mittel 59 kg/PS .

Gleichstrommaschinen insbesondere für Hochspannung (1000 Volt) sind schwerer, $q = 54$ bis 67 kg/PS , im Mittel $65,0 \text{ kg}$.

An Hand dieser Hilfswerte lässt sich die Leistung $L \text{ PS}$, für welche eine Zahnradlokomotive bei gegebenem Zugsgewicht $G \text{ t}$ und $v \text{ km/h}$ Geschwindigkeit und einem Eigengewicht $Q \text{ t}$ auszulegen ist, berechnen.

Die Leistung ist

$$L = \frac{Zv}{270} \text{ PS.}$$

Im Beharrungszustand entsprechend der Dauerleistung wird die Zugkraft am Triebzahnrad

$$Z = Q(w_L + s) + G(w_z + s).$$

Das Lokomotivgewicht wird auf Grund der Erfahrungswerte ausgedrückt durch die Beziehung

$$1000 Q = q L,$$

hieraus

$$L = \frac{G(w_z + s)}{\frac{270}{v} - \frac{q}{1000}(w_L + s)}.$$

Es kommen hier verhältnismäßig hohe Werte von s gegenüber w in Betracht; da weiter der erhöhte Wert des Lokomotivwiderstandes durch Einbeziehung des Wirkungsgrades des Getriebes berücksichtigt werden kann, so ist es auch im Hinblick auf die Unsicherheit in der Bestimmung von w zulässig

$$w_L + s \approx w_z + s$$

zu setzen. Man kann weiter wie früher das Lokomotivgewicht durch die gesuchte Zugslast ausdrücken

$$n = \frac{G}{Q}.$$

Diese Substitutionen durchgeführt, wird

$$n = \frac{270 \cdot 1000}{qv(s+w)} - 1.$$

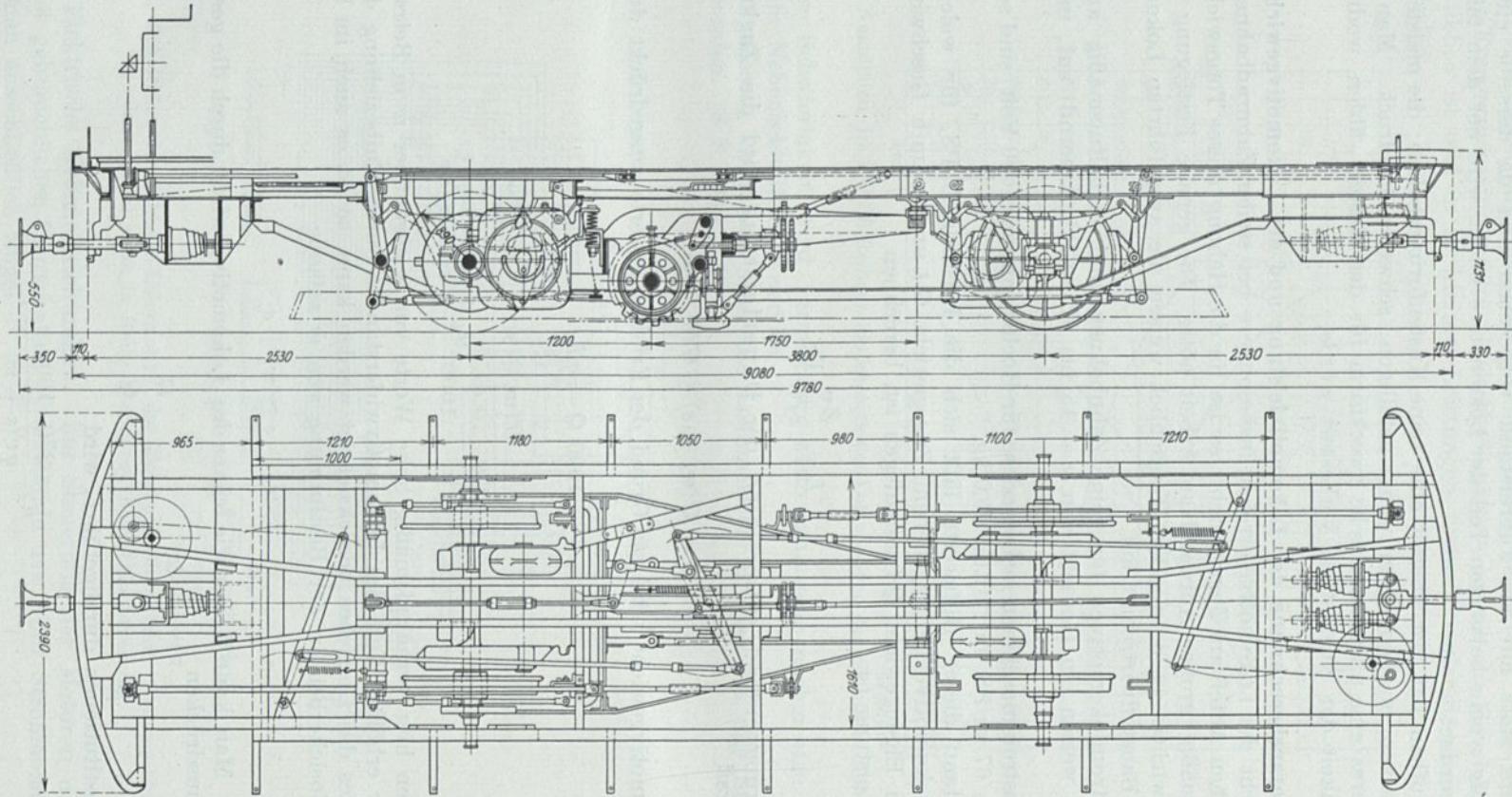


Abb. 559. Untergestell eines zweiachsigen Triebwagens mit Lenkachsen der Zahnbahn auf den Ritten (Bozen—Oberbozen, A.E.G.U.).

In die zur nomographischen Darstellung geeignete Form

$$\frac{n+1}{\frac{270}{q}} = \frac{\frac{1000}{v}}{(s+w)}$$

überführt kann dieses Ergebnis zugleich in der betreffend die Standsicherheit einer Zahnradlokomotive erstellten Rechentafel (Abb. 524) zur Darstellung gelangen.

Durch diese Ergänzung findet die sich aus dem erforderlichen Materialaufwand ergebende Einschränkung Berücksichtigung.

Für $h = 250\%$, $w_L = 15$, $w_z = 5$, $v = 7,5$ und $q = 60$ kg/PS findet man z. Bsp., daß mit einer Tonne Lokomotivgewicht 1,31 t Nutzgewicht geschoben werden können.

Für den Wert von $q = 90$, welcher für Dampflokomotiven gangbar ist, vermindert sich $Q:G$ auf 0,372, also auf den $\frac{1}{3,5}$ ten Teil.

29. Geschobene Fahrzeuge. Die auf Zahnbahnen verkehrenden Fahrzeuge weisen auch dann, wenn sie ohne Ausübung einer Triebkraft fahren, bestimmte Eigentümlichkeiten auf.

Zunächst ist die Zug-, richtiger Stoßvorrichtung zur tunlichen Herabsetzung des Kippmomentes möglichst tief anzuordnen.

Nachdem des weiteren für Steilbahnen der Grundsatz allgemein angenommen ist, die einzelnen Fahrzeuge miteinander nicht zu kuppeln, damit durch das etwaige Versagen der Lokomotive nicht auch der übrige Zug in Mitleidenschaft gezogen wird, muß jedes geschobene Fahrzeug mit einer Zahnradbremse ausgerüstet sein. Auf den gewöhnlichen Beiwagen der reinen Zahnbahnen hat es keine Schwierigkeiten, diese anzuordnen.

Schwieriger wird dies bei den Motorwagen der Bahnen der Kategorie II mit gemischem Betrieb.

Sind diese Motorwagen vierachsig, kann in jedem Drehgestell eine Achse mit einem freilaufenden Bremszahnrad, die zweite mit je einem Motor ausgerüstet werden. Braucht man das Reibungsgewicht aller Achsen, kann man die beiden Achsen eines Gestelles kuppeln (Martigny-Châtelard).

Bei den zweiachsigen Motorwagen der gemischten Triest-Opčina und Rittnerbahn (Abb. 559) hat man sich so geholfen, daß man das Bremszahnrad in einem gabelartigen Rahmen in der Nähe der unteren Achse lagert. Der Gabelrahmen ruht bergseitig ungefedert auf der Achse, talseitig auf dem Gestellrahmen gefedert. Zur Begrenzung des Auftriebes trägt dieser Rahmen in der unmittelbaren Nähe des Bremsrades angeordnet eine Zange. Durch diese Anordnung wird erzielt, daß die Entlastung durch den Auftrieb möglichst auf die mehrbelastete Talachse verlegt wird.

Bei Gliederwagen, die mit der Lokomotive ein untrennbares Ganzes bilden, kann eine besondere Bremse entbehrlich werden; hierdurch werden diese Fahrzeuge betriebswirtschaftlich vorteilhaft, indem diese Wagen nur dann mit einem Schaffner besetzt sein müssen, wenn kein weiterer Wagen vorgesetzt wird. In diesem Falle hat der Schaffner während der Fahrt die Aufgabe, den Bahnkörper zu überwachen.

II. Standseilbahnen.

Literatur:

Abt. Seilbahnen. Bd. 8, V. Teil. Hb. der Ingenieurwissenschaften. W. Engelmann, Leipzig 1906.
Böttcher. Über Seilreibungswinden für große Seillängen. F.u.F. 1919. H. 31.

- Brunner. Die Kettenlinie im Ingenieurwesen. Sch.B.Z. 1919. Bd. 74. Nr. 2.
 Dolezalek. Seilbahnen. Rölls Enzyklopädie. 2. Aufl.
 Fadda. Tramvie e ferrovie funicolari. Torino.
 Fliegner. Die Bedingungen gegen das Abheben des Seiles bei Drahtseilbahnen. Sch.B.Z. 1911. Bd. 58. Nr. 4.
 Goetze. Die Zugspannungen an Seil- und Kettenbahnen mit mehreren Treibrillen und ihre Regelung durch den Ausgleicher von Ohnesorge. Glückauf 1921. Nr. 17.
 de la Goupillière. Note sur le profil équilibre. Ann. des Minnes. 1883.
 Grünig. Einrillige Seiltreibscheibe. Sch.B.Z. 1921. Bd. 78. Nr. 9.
 Kiefer. Einige Sätze über die Kettenlinie. Sch.B.Z. 1919. Bd. 73. Nr. 12.
 Lévy-Lambert. Chemins de fer funiculaires. Transports aériens. Gauthier Villars, Paris 1910.
 Meißner. Bestimmung des Profils einer Seilbahn. Sch.B.Z. Bd. 54. Nr. 7.
 Reckenschuß. Der theoretische Längsschnitt von Drahtseilbahnen mit Doppelbetrieb. C. W. Kreidel, Wiesbaden 1914.
 Seefehlner. Beitrag zur Theorie und Praxis der Drahtseilbahnen. E.u.M. 1909. H. 31.
 Strub. Bergbahnen der Schweiz bis 1900. I. Drahtseilbahnen. J. F. Bergmann, Wiesbaden 1900.
 Vautier. Etudes des chemins de fer funiculaires. Nouvelles annales de la construction. Paris 1891/92.
 Walloth. Die Drahtseilbahnen der Schweiz. Verl. C. W. Kreidel, Wiesbaden 1893.
 Walloth. Drahtseilbahnen und Zahnradbahnen. Verl. Bergmann, Wiesbaden 1897.

1. Allgemeines. Die Drahtseilbahnen mit festem Unterbau bilden im Eisenbahnwesen einen betriebstechnischen Grenzfall.

Dies ist zu erkennen, wenn man sich als Gegensatz die Betriebsverhältnisse einer zweigleisigen Bahnanlage mit wagerechtem Längsschnitt vor Augen hält. Die letztere weist betriebstechnisch die denkbar größte Freizügigkeit auf, indem die Zugslasten und Geschwindigkeiten verhältnismäßig am weitesten geändert werden können. Die Hin- und Rückfahrten der Züge sind voneinander vollständig unabhängig, der Kraftaufwand in beiden Richtungen gleichgroß.

Die Seilbahn ist demgegenüber ein zwangsläufiges Gebilde. Es sind nur zwei Züge vorhanden, die miteinander durch ein Seil verbunden sind. Ankunft und Abfahrt beider Züge findet gleichzeitig statt; ihre Kreuzung ist an die Bahnmitte gebunden, dabei ist auch die Fahrgeschwindigkeit beider Züge gleich und ihre Richtung entgegengesetzt.

Die Zugkraft zur Fortbewegung der Züge wird meist in einer ortsfesten Anlage erzeugt; sie ist unabhängig von der Reibung zwischen Rad und Schiene oder der Belastung eines Triebzahnrades, was bei Zahnbahnen der Fall ist. Mit dieser Betriebsart können die verhältnismäßig größten Steigungen — ausgeführt bis 850% — überwunden werden. Der Betrieb ist soweit als irgend möglich wirtschaftlich, indem die Arbeit des zu Tale fahrenden Zuges zur Hebung des bergfahrenden ausgenutzt wird, so daß nur eine dem Gewichtsunterschied und den Bewegungsverlusten entsprechende Arbeit aufzuwenden ist.

Das Mittel zur Kraftübertragung, das Drahtseil, bedingt als weitere Besonderheit der Seilbahnen, daß die Kraft am Fahrzeug nur als Zug ausgeübt werden kann. Da die Kraftquelle bei Seilbahnen meist ortsfest angeordnet ist und die Richtung der Kraftwirkung nicht geändert werden kann, muß die Rückfahrt unter der Einwirkung der Schwerkraft erfolgen. Das Anwendungsgebiet für Seilbahnen ist auch aus diesem Grunde im gebirgigen Gelände zu suchen.

2. Betriebsarten. Nachstehende Betrachtungen setzen in der Hauptsache Seilbahnen mit Doppelbetrieb und offenem Seil voraus, bei welchen die beiden gegenläufigen Fahrzeuge je an einem Seilende befestigt sind. Das Seil ist über eine am oberen Bahnende befindliche Winde geführt, die heute meist durch einen Elektromotor angetrieben wird. (Abb. 560.) Ist es aus örtlichen Gründen nicht möglich oder nicht erwünscht, das Windwerk am oberen Ende anzurufen, kann dasselbe auch am unteren Ende (Vesuv) (Abb. 561) oder selbst in der Mitte (M. Salvatore)

(Abb. 562) angeordnet werden, in welchen Fällen für eine entsprechende Seilführung und Nachspannung des Seiles zu sorgen ist, da der Seiltrieb im ersten Falle ein geschlossener ist.

Ein Beispiel für Pendelbetrieb mit geschlossenem Seil stellt die Serrabahn in Brasilien dar. (Abb. 563.) Bei dieser werden in zehn Teilstrecken ganze Züge in die Höhe befördert. Die von den anschließenden Reibungsstrecken anlangenden Züge werden von einer Spezialdampflokomotive übernommen, die den Zug in die Drahtseilstrecke schiebt und dort an das ruhende Drahtseil gekuppelt wird. Sobald dies an beiden Enden einer Seiltriebstrecke erfolgt ist, wird die Antriebsmaschine des Windwerkes in Bewegung gesetzt. Die Serrabahn hat Dampfbetrieb, doch könnte dieses System auch für elektrischen Betrieb vorgesehen werden.

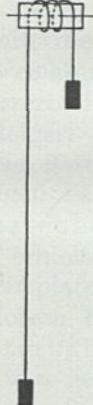


Abb. 560. Schema einer Drahtseilbahn mit Wechselbetrieb.

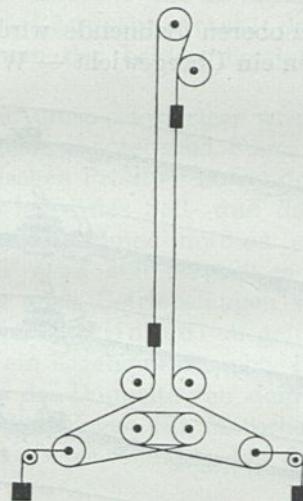


Abb. 561. Seilführung für eine Seilbahn mit Wechselbetrieb, mit geschlossenem Zugseil. (Vesuv).

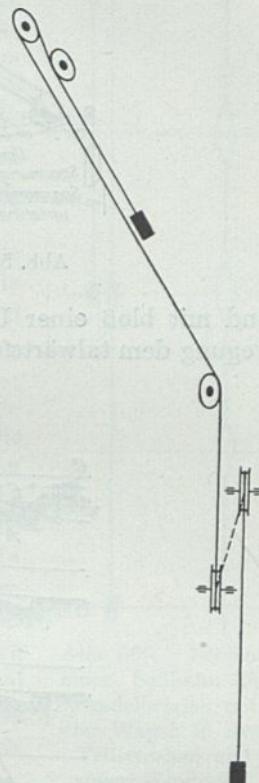


Abb. 562. Seilführung für eine Drahtseilbahn mit zwei Teilstrecken und in der Bahnmitte angeordnetem Windwerk (Salvatore).

Weiters kann der Motorantrieb auf einem oder wechselweise betätigt auf beiden Fahrzeugen angeordnet werden, wie bei der Seilbahn Palermo-Monreale (Abb. 564). Das offene am oberen Bahnende über eine Umlenkrolle zu den Stützwagen geführte Seil gleicht das Totgewicht der beiden Fahrzeuge aus. Zu heben ist demnach nur die Nutzlast. Man kann passendfalls in dieser Weise selbst mit reinem Reibungsantrieb verhältnismäßig große Steigungen überwinden.

Auf der genannten Bahn sind die Seilbahnwagen schmal gebaute Stützwagen, die normale Straßenbahnwagen vor sich auf eine Rampe hinaufschieben.

3. Wasserballast- und motorischer Antrieb. Bei dem grundsätzlichen Anteil der Schwerkraft an der Zugbewegung ist die Gestaltung des Höhenplanes auf den Kraftbedarf, richtiger auf den Wert der in jeder Zugstellung erforderlichen Zugkraft von entscheidender Bedeutung. Voraussetzung für einen einwandfreien Betrieb ist sodann noch, daß die Gesetze der ordnungsgemäßen Seilführung erfüllt werden.

Bei den vorstehenden Betrachtungen wurde angenommen, daß das Windwerk der Seilbahnen zur Aufbringung der etwa erforderlichen Zug- oder Bremskraft motorisch angetrieben wird. Bei den älteren Wasserlast-Seilbahnen ohne Windwerk

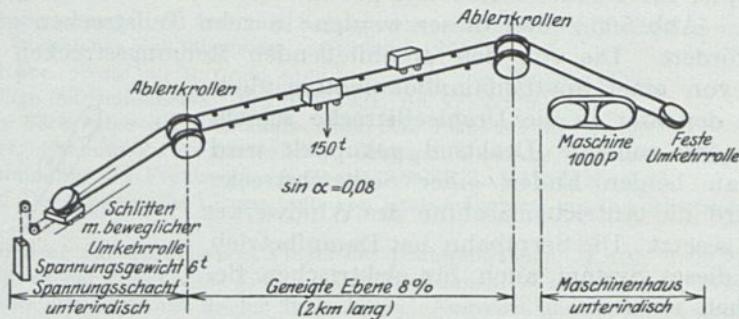


Abb. 563. Schema der Seilführung der Serrabahn, Brasilien.

und mit bloß einer Umlenkrolle am oberen Bahnende wird zur Einleitung der Bewegung dem talwärtsfahrenden Wagen ein Übergewicht — Wasserballast — erteilt.

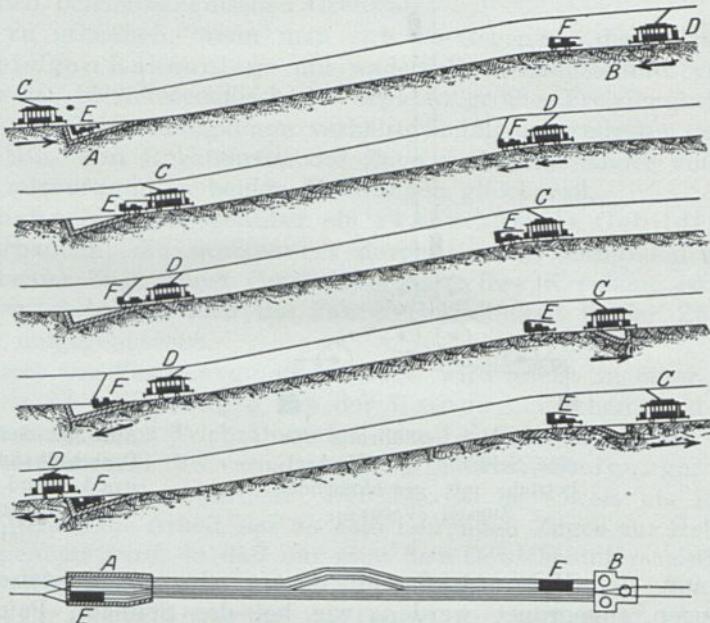


Abb. 564. Betriebsschema der Seilrampe Palermo—Monreale.

Aus naheliegenden Gründen mußte angestrebt werden, das Längenprofil so zu gestalten, daß die Größe dieses Wasserballastes für den ungünstigsten Belastungsfall während der ganzen Fahrt ausreicht, d. h. unverändert beibehalten oder verringert werden kann.

Vautier und andere haben unter der für Seilbahnen mit stark veränderlichem Gefälle allerdings nicht zutreffenden Annahme, daß die Horizontalprojektionen gleichlanger Seilstücke gleich sind, nachgewiesen, daß die Längenprofilkurve für unveränderliche Zugkraft eine Parabel sein muß. Hauer, de la Goupilliére, Reckenschuß u. a. leiteten unter gleichen Bedingungen die Zykloide als theoretisches Profil ab. Die vorhandene Bodengestaltung wird in den seltensten Fällen gestatten, den theoretischen Höhenplan streng einzuhalten.

Wasserballastbahnen mußten daher stets einen den durchschnittlichen Bedarf übersteigenden Gewichtsüberschuß mitnehmen und durch Bremsvorrichtungen oder Wasserabgabe während der Fahrt die verlangte gleichmäßige Fahrgeschwindigkeit erzielen. Da bei den in Betracht kommenden Steigungen die Radreibung zur Bremsung unzureichend ist und für den Fall eines Seilbruches vorgesorgt werden muß, werden die Wasserballastbahnen stets mit einer Zahnstange ausgerüstet, in welche ein Bremszahnrad eingreift. Die selbsttätigen Wagenbremsen für Wasserlastbahnen sind insbesondere von Pauli ausgebildet worden.

Bei Wasserballastbahnen wird somit die Fahrt von dem jeweils talfahrenden Wagen aus geregelt zum Unterschied von motorisch angetriebenen Bahnen, deren Steuerung durch den Windwerkantrieb erfolgt.

4. Linienführung und Betriebssystem. Dieser grundsätzliche Unterschied zwischen Wasserballast und Motorantrieb ist auf die zulässige Gestaltung des Längsschnittes, des Unter- und Oberbaues der Seilbahnen der beiden Betriebsarten von entscheidendem Einfluß.

Je länger die Strecke, umso schwieriger wird es, dem Längsschnitt die oben angedeutete theoretische Form zu geben. Die Abweichung vom theoretischen Profil vermehrt den erforderlichen Wasserballast, wodurch wieder das Seil- und das Wagengewicht gesteigert wird. Wasserballastbahnen mußten sich vielfach auf kurze Betriebslängen von etwa 400 bis 500 m beschränken, in einigen Fällen sind indes auch Betriebslängen von etwa 1700 m (Beatenbergbahn, Biel-Magglingen) ausgeführt worden. Dabei erhielten die Wagen ein Eigengewicht von 17 t, d. s. 340 kg je Sitzplatz. Das ist etwa das Doppelte von dem Gewicht, das bei gleichem Fassungsraum die Wagen für Motorbahnen aufweisen. Motorbahnen sind mit Betriebslängen bis 2400 m in einer Sektion gebaut worden.

Große Betriebslängen weisen den Nachteil geringer Leistungsfähigkeit auf, indem der Zeitraum der kürzesten Zugfolge durch die Fahrzeit über die ganze Strecke gegeben ist.

Je nach Bahnlänge und erforderlicher Leistung unterteilt man die zu bewältigende Strecke in mehrere Teilstücke, die dann meist als selbständige Seilbahnen mit eigenem Windwerk betrieben werden.

Letzteres kann unter Umständen vermieden werden, indem beispielsweise die Verdoppelung der Leistung auch in der Weise erzielt wird, daß am Zugseil in der Entfernung der halben Bahnlänge je ein Wagen, beidseits des Triebwerks insgesamt also deren vier angehängt werden, die nur über die halbe Strecke pendeln (Abb. 565). Es sind dann drei Ausweichen vorzusehen; in der Bahnmitte wird umgestiegen. Diese Lösung würde gestatten das Seil entsprechend den Höchstbeanspruchungen in den zwei Teilstrecken mit verschiedenen Gewichten auszuführen. Die Seilbefestigung an den Wagen ist so einzurichten, daß bei Seilbruch die Bremse jedes Wagens nur den eigenen Wagen zu halten hat.

Die Ausweiche in der Bahnmitte kann fortbleiben, wenn die sich treffenden Wagen hintereinander halten. Den durch diese Betriebsart erzielbaren Ersparnissen in den Baukosten steht der geringfügige Nachteil gegenüber, daß die Wagen in der Wechselstation nicht in der gleichen Höhe halten.

Die Anwendung der Bremszahnstange bei Wasserballastwagen zwingt nicht

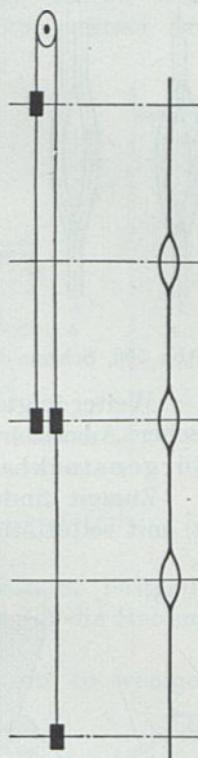


Abb. 565. Schema einer Seilbahn für Pendelbetrieb mit vier Wagen in zwei Teilstrecken und einem Windwerk.

zur Vermeidung von Gleisekreuzungen. Bahnen dieser Betriebsart wurden aber oft in zwei voneinander unabhängige Fahrbahnen in der vier- und dreischienigen Anordnung ausgeführt. Verschiedentlich legte man die Gleise unterhalb der Ausweiche zusammen.

Die ersten Bahnen waren vierschienig (Abb. 566) (d), später mit einer Verschlingung der Gleiseachsen in der unteren Bahnhälfte, um an Unterbaubreite zu sparen.

Die dreischienige Anordnung (c) ist den beiden ersteren vorzuziehen, weil die Anordnung der Zahnstange eine günstigere ist. Einen weiteren Schritt bildete die Zusammenlegung der Gleiseachsen (b) unterhalb der Ausweichen, wobei ein Überfahren des Seiles vermieden ist.

Weiter folgte die erste zweischienige Gießbach-Wasserlastbahn mit automatischer Ausweichung nach Abt und die erste elektrisch betriebene zweischienige Bürgenstockbahn.

Zurzeit findet für Motorbahnen fast ausschließlich der eingeleiste Bahnkörper (a) mit selbsttätiger Ausweiche Verwendung ohne Zahnstange, wobei der keilförmig

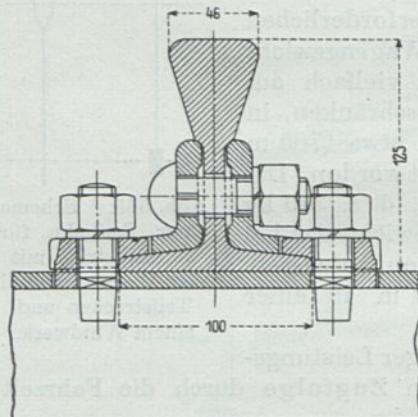


Abb. 567. Keilkopfschiene für Zangenbremse.

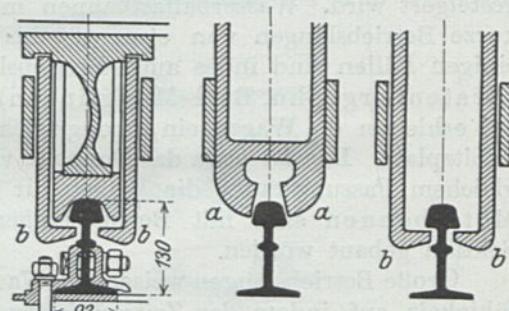


Abb. 568. Druckkopf-Seilbahnschiene, -Rad und -Zange, Bauart Esslingen, (Palermo, Capri, Günschnabahn).

gestaltete Schienenkopf nach Bucher durch eine Bremszange gefaßt wird. Diese Ausweiche setzt voraus, daß die beiden ununterbrochenen äußeren Schienestränge die Führung der Wagen besorgen, die zu diesem Behufe einseitig Räder mit doppelten Spurkränzen, auf der anderen Seite breite Flachrollen erhalten, um die zur Durchleitung des Seiles nötigen Schienenlücken stößfrei überfahren zu können.

5. Oberausysteme. Seit Erbauung der Stanserhornbahn hat für motorische Drahtseilbahnen fast nur mehr die neuere Keilkopfschiene (Abb. 567) der Rollschien Eisenwerke in Bern Verwendung gefunden. Diese ist 26,8 kg/m schwer, 125 mm hoch und zur Bremsung mittelst Zange geeignet.

Für leichtere Bahnen entspricht diesem Zweck eine gewöhnliche Vignolschiene mit etwas schrägen liegenden Flanken (Drahtseilbahn auf die Tarajka).

In Italien hat für die Seilbahnen Palermo-Monreale und Capri die sogenannte Eßlinger-Schiene Anwendung gefunden. (Abb. 568.)

Neben höheren Anschaffungskosten hat diese Querschnittsform den Nachteil, daß die Bremswirkung nicht wie bei der Keilkopfschiene allmählich eintreten kann, vielmehr tritt eine Bremswirkung in dem Momente, wo die Zange anliegt, stoßartig auf, da die Zange keinen Schleifweg hat. Es scheint die Wirkung dieser Anordnung tatsächlich keine zuverlässige zu sein, denn bei der Seilbahn in Capri war ein Seilbruch von katastrophalen Folgen begleitet. Diese Bauform verdankt ihr Entstehen dem Bestreben, das Fahrzeug von der auf die Schienen wirkenden senkrechten Bremsdruck-Komponente zu entlasten.

6. Der Längsschnitt. (Höhenplan.) Der Bewegungsvorgang bei Bahnen mit Wasserballastbetrieb wird von der Gestaltung des Höhenplanes bestimmt (Abb. 569).

Bei Motorbahnen ist dies nicht der Fall: Die bei einer Fahrt zu leistende Arbeit ist zuzüglich der Verluste immer gleich dem Arbeitsaufwand für die Hebung der Nutzlast und Überwindung der Reibungswiderstände.

Der Wert der Leistung wird jedoch um den Mittelwert um so weniger schwanken, je mehr sich der Längsschnitt dem theoretischen Höhenplan für unveränderliche Zugkraft nähert.

Die zu leistende Arbeit ist bei gegebenem Höhenunterschied theoretisch in allen Fällen dieselbe, der event. Mehraufwand an Reibungsarbeit auf einer längeren Strecke kommt bei den geringen Längenunterschieden nicht in Betracht — ein Mehrverbrauch an Betriebskraft kann lediglich dadurch entstehen, daß der mit wechselnder Last arbeitende Elektromotor im Mittel einen schlechteren Wirkungsgrad aufweisen wird, wie im Falle einer unveränderlichen Belastung gleich dem Mittelwert.

Aus dieser Ursache lohnt es sich daher oft nicht, beim Bau von Motorbahnen etwa durch kostspielige Kunstbauten den theoretischen Höhenplan zu verwirklichen. Nachdem diesem jedoch die günstigsten Betriebsverhältnisse, kleinstes Seilgewicht — bei gleichen Richtungsverhältnissen die geringste Seilabnutzung — entsprechen, tut man gut, in allen Fällen den theoretischen Längsschnitt zu ermitteln. Man gewinnt hierdurch ein Urteil darüber, in welcher Richtung eine im Gelände mögliche Änderung des Längsschnittes anzustreben ist.

7. Das theoretische Längsprofil für unveränderliche Zugkraft. Das theoretische Profil für unveränderliche Zugkraft (Abb. 569, 570) und da die Geschwindigkeit konstant ist, für unveränderliche Leistung läßt sich beispielsweise auf Grund des Gleichgewichtszustandes für einen bestimmten Belastungsfall folgendermaßen berechnen:

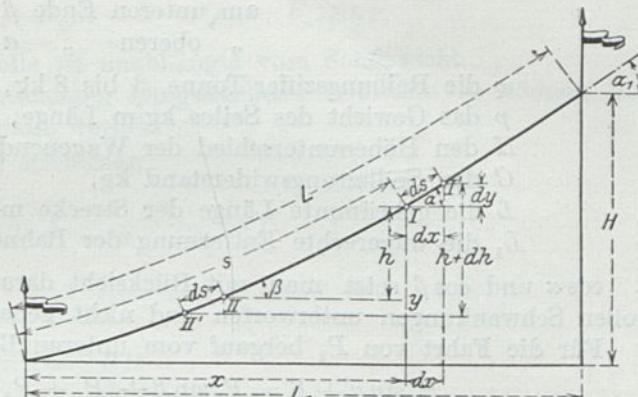


Abb. 569. Seilbahnschema für Maschinenbetrieb.

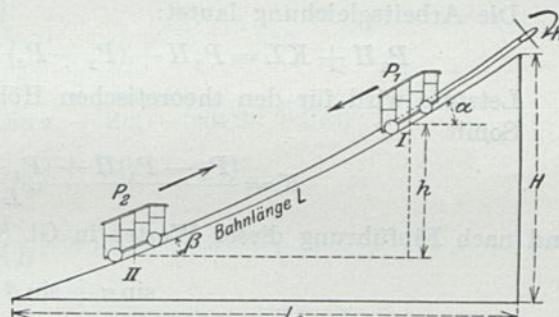


Abb. 570. Geometrie der Abhängigkeit der Wagenstellungen.

Der sinkende Wagen wiege P_1 kg
 „ steigende „ „ „ P_2 „

Wenn $P_2 > P_1$, muß am Umfang der Seilscheibe eine Kraft K kg wirken.
 Es seien die Neigungswinkel der Bahn

am unteren Ende β
 „ oberen „ „ α

w die Reibungsziffer/Tonne, 3 bis 8 kg,
 p das Gewicht des Seiles kg/m Länge,
 H den Höhenunterschied der Wagenendstellungen in m,
 C den Seilleitungswiderstand kg,
 L die gekrümmte Länge der Strecke m,
 L_1 die wagerechte Entfernung der Bahnenden m.

$\cos \alpha$ und $\cos \beta$ setzt man mit Rücksicht darauf, daß der Zahlenwert von w großen Schwankungen unterworfen und nicht genau festgelegt werden kann ≈ 1 .

Für die Fahrt von P_2 bergauf vom unteren Bahnende gilt:

$$P_1 \sin \alpha + K = P_2 \sin \beta + (P_1 + P_2)w + pH + C \dots \dots \dots \quad (1)$$

am oberen Bahnende:

$$P_1 \sin \beta + K = P_2 \sin \alpha + (P_1 + P_2)w - pH + C \dots \dots \dots \quad (2)$$

hieraus, da K bedingungsgemäß in beiden Fällen gleichgroß sein soll

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{2[K - w(P_1 + P_2) - C]}{P_2 - P_1}$$

Die Arbeitsgleichung lautet:

$$P_1 H + KL = P_2 H + (P_1 + P_2)WL + CL + \text{Bremsarbeit} \dots \dots \dots \quad (3)$$

Letztere wird für den theoretischen Höhenplan = 0.

Somit

$$K = \frac{(P_2 - P_1)H + (P_1 + P_2)WL + CL}{L}$$

und nach Einführung dieses Wertes in Gl. (3)

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{2H}{L} \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3a)$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = \frac{2pH}{P_1 + P_2} \dots \dots \dots \dots \dots \quad (4)$$

Für die Kreuzungsstelle, die sich nicht in der halben wagerechten Entfernung der Bahnenden befindet, ist

$$\alpha = \beta = \delta$$

daher

$$\sin \delta = \frac{H}{L}$$

wo L vorläufig unbekannt ist.

Für die die beiden Endpunkte verbindende Gerade gilt

$$\sin \gamma = \frac{H}{\sqrt{L_1^2 + H^2}}$$

Da für die praktischen Verhältnisse

$$\sin \delta \approx \sin \gamma \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5)$$

indem der Unterschied kaum $0,1\%$ beträgt, dient diese Beziehung zur bequemen Bestimmung von L , α und β , den Konstanten in der Gleichung der gesuchten Profilkurve.

Für die Kreuzungsstelle gilt des weiteren

$$K - [(P_1 + P_2)w + C] = (P_2 - P_1) \sin \gamma,$$

d. h. die Neigung an dieser Stelle ist unabhängig vom Seilgewicht.

Um weitere Punkte des gesuchten Längsschnittes ermitteln zu können, muß das Gesetz dieser Linie festgestellt werden.

Für die weitere Rechnung setzt man

$$\frac{H}{L} = A, \quad \frac{p}{P_1 + P_2} = B,$$

dann wird

$$\sin \beta + \sin \alpha = 2A$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2BH$$

$$\sin \alpha = A + BH = \frac{dy}{ds}; \quad \frac{d^2y}{ds^2} = B \frac{dH}{ds}.$$

Aus dem Zusammenhang zweier zusammengehöriger Wagenstellungen (Abb. 570) folgt, daß

$$dH = ds(\sin \alpha + \sin \beta) = 2A \cdot ds$$

und

$$\frac{d^2y}{ds^2} = 2AB,$$

hieraus

$$x = L_1 - \frac{1}{8AB} [2 \sin \alpha_1 + 2\alpha_1 - (\sin 2\alpha + 2\alpha)] \quad \dots \quad (6)$$

Auf dem gleichen Wege erhält man für

$$y = H - \frac{1}{8AB}(\cos 2\alpha - \cos 2\alpha)C_2 \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

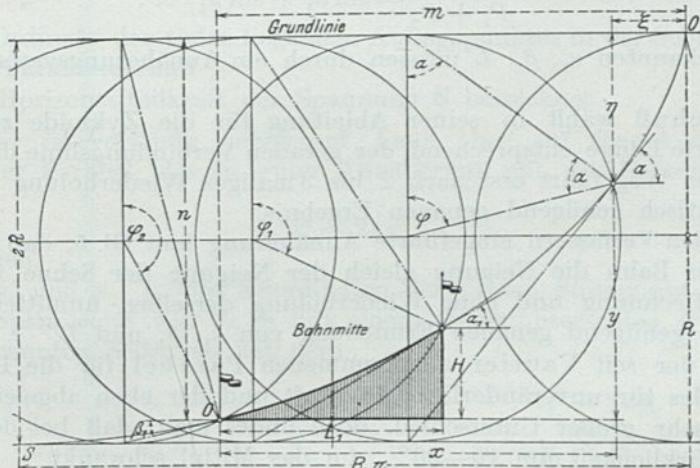


Abb. 571. Zykloide für den Längsschnitt für stetige Leistung.

Durch eine entsprechende Verlegung des Koordinatensystems und die Substitutionen $\sin 2\alpha = \sin \varphi$, $\cos 2\alpha = -\cos \varphi$ können diese Gleichungen in die Formen

$$\xi = \frac{1}{8AB}(\varphi - \sin \varphi) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (8)$$

$$\eta = \frac{1}{8AB}(1 - \cos \varphi) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (9)$$

überführt werden.

Diese beiden Gleichungen stellen eine gemeinsame Zykloide dar, wobei $R = \frac{1}{8AB}$ der Halbmesser des erzeugenden Roll-Kreises ist (Abb. 571).

In den Gleichungen 8 und 9 sind die Größen x , y und α veränderlich, L_1 ist der wagerechte, H der lotrechte Abstand der Endpunkte, α_1 ist der Neigungswinkel am oberen Bahnende, L ist die unbekannte in der Neigung gemessene Bahnlänge, p , P_1 , P_2 , C sind bekannte Größen. Hat man demnach die obigen Gleichungen für eine Seilbahn mit gegebenen Endpunkten anzuwenden, so gilt zunächst für den Fußpunkt mit der Neigung β

$$\begin{aligned} x &= y = 0 \\ o &= L_1 - \frac{1}{8AB}[\sin 2\alpha_1 + 2\alpha_1 - (\sin 2\beta_1 + 2\beta_1)] \\ o &= H - \frac{1}{8AB}[\cos 2\beta_1 - \cos 2\alpha_1] \end{aligned}$$

daher

$$\frac{L_1}{H} = \frac{\sin 2\alpha_1 + 2\alpha_1 - (\sin 2\beta_1 + 2\beta_1)}{\cos 2\beta_1 - \cos 2\alpha_1}$$

oder in einer für die Zahlenrechnung geeigneteren Form.

$$\frac{L_1}{H} = \operatorname{ctg} \varphi (\alpha_1 + \beta_1) + \frac{\alpha_1 - \beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1) \sin(\alpha_1 - \beta_1)} \dots \dots \dots \quad (10)$$

Früher wurde gefunden, daß

$$\frac{2H}{L} = \sin \alpha_1 + \sin \beta_1 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (11)$$

$$\frac{2pH}{P_1 + P_2} = \sin \alpha_1 + \sin \beta_1 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (12)$$

Die drei Unbekannten α_1 , β_1 , L müssen durch ein Annäherungsverfahren ermittelt werden.

Reckenschuß wählt in seiner Ableitung für die Zykloide zunächst für L eine angenäherte Länge entsprechend der geraden Verbindungslinie der beiden Endpunkte. Dieser Weg führt erst nach 2 bis 3 maliger Wiederholung der Rechnung zu einem praktisch genügend genauen Ergebnis.

Die von den Verfassern eingeführte Annäherung laut Gl. 5, daß in der halben Bogenlänge der Bahn die Neigung gleich der Neigung der Sehne ist, führt ohne umständliche Rechnung und ohne Wiederholung derselben unmittelbar zur praktisch mehr als genügend genauen Ermittlung von α_1 , β_1 und L .

Zwischen der seit Vautier angenommenen Parabel für die Linie des theoretischen Profiles für unveränderliche Zugkraft und der eben abgeleiteten Zykloide besteht kein sehr großer Unterschied, doch findet man, daß bei der Parabel die Leistung in Wirklichkeit um 10—20% um das Mittel schwankt.

8. Längsschnitt für sichere Seilführung. Der elektrische Betrieb zwingt nicht zur Einhaltung des „theoretischen“ Längsschnittes einer Drahtseilbahn für unver-

änderliche Leistung. Die sichere Seilführung ist beim theoretischen Profil dank dem verhältnismäßig großen Krümmungshalbmesser stets vorhanden.

Bei einem Längsprofil, dessen Linienzug keinem mathematischen Gesetz folgt, muß für die Ausrundung in Gefällsbrüchen stets geprüft werden, ob auch im ungünstigsten Belastungsfall — größte Seilspannung — die Seilführung gesichert ist. Ins Geometrische übersetzt heißt dies, daß die Gefällsausrundung mit einem größeren Krümmungshalbmesser ausgeführt werden muß als der Parabel (genauer Kettenlinie) des mit der größten Last gespannten Seiles entspricht. Die geläufige Maßgröße einer Parabel ist der Durchhang; es muß also für die planparabolische Ausrundung der Seildurchhang größer sein als derjenige der angewendeten Ausrundung des Gefällsbruches. Für diese Rechnung ist die Parabelgleichung für das zwischen zwei Stützpunkten frei gespannte Seil zu benutzen.

9. Die Parabel-Ausrundung.

Für die Spannkraft S des frei gespannten Seiles gilt

$$S = q\sigma$$

wo q den Seilquerschnitt in qmm und

σ die für den vorgeschriebenen Sicherheitsgrad zulässige Spannung kg/qmm bedeutet.

Das Seilgewicht lässt sich durch die Materialfestwerte

γ das Gewicht des mm³ in kg,

φ Verseilungszahl, die angibt, um wieviel das in einer Schraubenlinie verdrillte Seil schwerer ist als ein gerader Stab (7/6 bis 9/7), lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$p = q \cdot \varphi \cdot 1000\gamma.$$

Man setzt der Einfachheit halber:

$$\varphi 1000\gamma = \psi \quad \text{daher} \quad p = q\psi.$$

Für die Kettenlinie gilt die Grundgleichung:

$$S = p(y + c),$$

$$\sigma = \psi(y + c),$$

$$\mathfrak{H} = pc \quad \text{und} \quad S = p \frac{\sigma}{\psi},$$

wo y die Ordinate des tiefer liegenden Auflagepunktes in der Scheitelgleichung, c den Parameter und

\mathfrak{H} die Horizontalteilkraft der Spannung S bezeichnet.

Der Parameter ist vorläufig unbekannt, kann aber auf Grund der Scheitelgleichung einer Parabel, die in guter Annäherung mit der Kettenlinie übereinstimmt,

$$x^2 = 2cy$$

berechnet werden.

Sind x_1 , y_1 und x_2 , y_2 die Koordinaten der beiden Stützpunkte des in einer wagrechten Spannweite von L_1 m mit einem Höhenunterschied H m der Stützpunkte ausgespannten Seiles, so hat man

$$x_1^2 = 2cy_1$$

$$x_2^2 = 2cy_2$$

$$x_2 - x_1 = L_1,$$

$$y_2 - y_1 = H.$$

$$x_2^2 - x_1^2 = 2c(y_2 - y_1),$$

$$x_2 + x_1 = 2c \frac{H}{L}$$

$$\begin{aligned}x_1 &= c \frac{H}{L_1} + \frac{L_1}{2}, & x_2 &= c \frac{H}{L_1} + \frac{L_1}{2}, \\y_1 &= \left(c \frac{H}{L_1} - \frac{L_1}{2} \right)^2 \frac{1}{2c}, & y_2 &= \left(c \frac{H}{L_1} + \frac{L_1}{2} \right)^2 \frac{1}{2c}.\end{aligned}$$

Diese Werte eingesetzt wird

$$c = A + \sqrt{A^2 - \frac{\frac{L_1^2}{4}}{\frac{H^2}{L_1^2} + 2}},$$

wo

$$A = \frac{\frac{\sigma}{\psi} + \frac{H}{2}}{2 + \left(\frac{H}{L_1} \right)^2}$$

wo alle Berechnungen sich auf den unteren Stützpunkt beziehen.

Mit Hilfe dieses Wertes lässt sich der für die Sicherheit der Seilführung maßgebende Durchhang

$$f = \frac{L_1^2}{8c}$$

berechnen.

In der Mitte der untersuchten Spannweite L_1 ist die Ordinate der Parabel $\frac{c}{2} \frac{H^2}{L_1^2}$. Liegt dieser Punkt tiefer als das geplante Profil, ist die Seilführung für die fragliche Wagenstellung gesichert.

Für die Tangentenwinkel an den beiden Enden gilt

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{H - 4f}{L_1}$$

und

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H + 4f}{L_1}.$$

Hieraus

$$f = \frac{L_1}{8} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta).$$

Den Wert von f in dieser Gleichung aus der Grundgleichung

$$f = \frac{L_1^2 p}{8S} = \frac{L_1^2 p}{8S \cos \alpha};$$

eingesetzt, wird

$$L_1 = \frac{S \cos \alpha}{p} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta).$$

S , den Seilzug, kann man mit Hilfe des angehängten Gewichtes ausdrücken, wenn S_{\max} dann entsteht, wenn der belastete Wagen sich in der fraglichen Steigung befindet. $S = Q \left(\sin \alpha \pm \frac{w}{1000} \right)$, wo $\frac{w}{1000}$ durch einen äquivalenten Steigungswert

$$\frac{w}{1000} \cong \operatorname{tg} \varepsilon$$

ausgedrückt werden kann. Für Seilbahnen ist

$$\operatorname{tg} \varepsilon \cong 0,005$$

zu nehmen, daher

$$\operatorname{tg} \varepsilon \approx \sin \varepsilon.$$

Der Zugwiderstand kann somit durch Vergrößerung von $\sin \alpha$ um 0,005, sofern überhaupt nötig, berücksichtigt werden. Unter diesen Voraussetzungen lautet die Gleichung

$$L_1 = \frac{Q \sin \alpha \cos \alpha}{p} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)$$

die aus den mechanischen Kennwerten der Drahtseilbahn:

der angehängten Last Q kg

und dem Seilgewicht p kg/m

die bauliche Ausführung der Gefällsausrundung bestimmt, d. h. die wägerechte Länge derselben, wenn die Steigungen der beiden anschließenden Strecken durch die Gestaltung des Geländes gegeben sind.

Die Aufgabe besteht darin, die Richtung der anschließenden Steigungen zu Parabeltangentialen zu machen. Ihr Schnittpunkt gibt den Mittelpunkt der Länge der Gefällsausrundung.

Der Höhenunterschied dieses Punktes gegenüber der Terrainkote stellt den vom bautechnischen Standpunkt zweckmäßigsten Pfeil der Ausrundungsparabel dar, indem in diesem Fall die Ausrundung in das Gelände zu liegen kommt, daher keine Kunstbauten oder Anschüttungen nötig werden.

Zur restlosen Durchführung der Aufgabe fehlt noch die Bestimmung von p , denn nicht dieser Wert, sondern die zulässige Beanspruchung des Seiles σ kg/mm² und ψ das mit Rücksicht auf die Verseilungszahl bestimmte virt. spez. Gewicht des Drahtseiles sind gegeben. Diesbezüglich verfügt man über die Beziehung

$$S = p \frac{\sigma}{\psi} \quad \text{bzw.} \quad Q \sin \alpha = p \frac{\sigma}{\psi}$$

$$p = Q \sin \alpha \frac{\psi}{\sigma} \quad \text{und} \quad p = S \cdot \frac{\psi}{\sigma}.$$

Die drei Gleichungen:

$$f = \frac{L_1}{8} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta),$$

$$L_1 = \frac{Q}{p} \sin \alpha \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta),$$

$$L_1 = \frac{S}{p} \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta),$$

und

$$p = Q \sin \alpha \frac{\psi}{\sigma},$$

die den Zusammenhang aller maßgebenden Größen enthalten, können in einer Rechentafel zur Darstellung gelangen, mit deren Hilfe alle überhaupt möglichen Lösungen beherrscht werden.

Zur zeichnerischen Darstellung bedient man sich der logarithmischen Umformung der Gleichungen, so daß in diesem Fall kollineare Systeme (Abb. 572) bequeme Behelfe liefern.

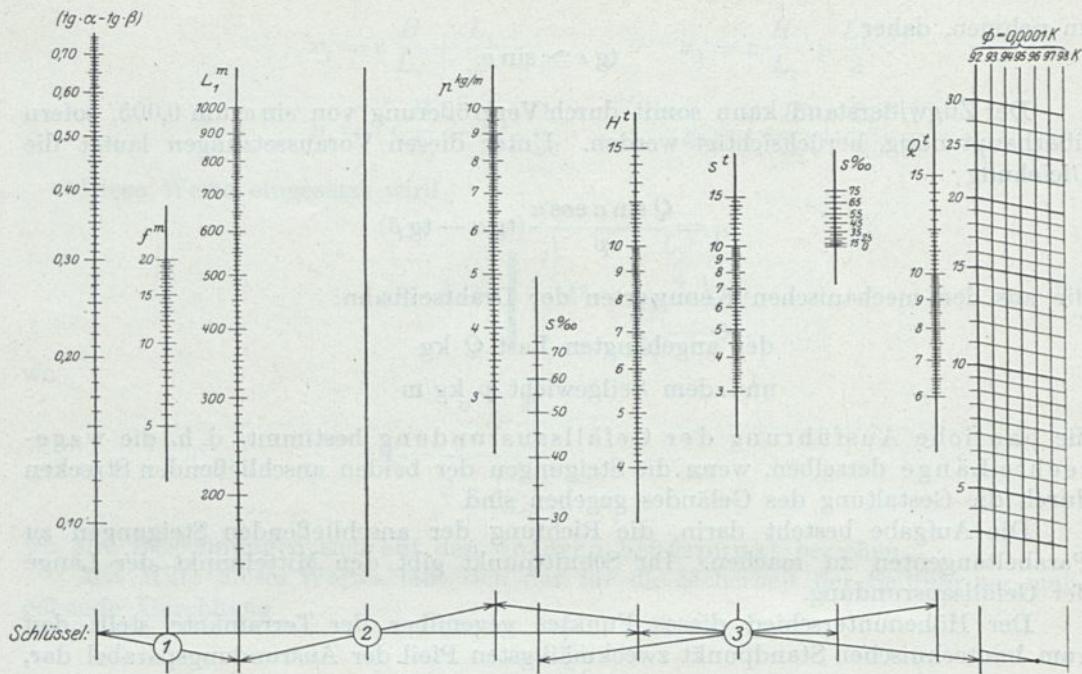


Abb. 572. Rechentafel zur Bestimmung der sicheren Ausrundung von Gefällsbrüchen.

Zur nomographischen Darstellung umgeformt, lauten die Gleichungen:

$$\lg f + \lg 8 = \lg L_1 + \lg (\tan \alpha - \tan \beta) \dots \text{ (Tafel 1)},$$

$$\lg L_1 + \lg p = \lg (Q \sin \alpha \cos \alpha) + \lg (\tan \alpha - \tan \beta) \dots \text{ (Tafel 2)},$$

$$\lg p + \lg \frac{\sigma}{\psi} = \lg Q + \lg \sin \alpha = \lg S \dots \text{ (Tafel 3)}.$$

Der auf der Rechentafel angedeutete Schlüssel gibt den den obigen Gleichungen entsprechenden Zusammenhang der Skalenträger.

Zu beachten ist die physikalische Bedeutung von

$$Q \sin \alpha \cos \alpha.$$

Dieser Ausdruck stellt die wagerechte Teilkraft \tilde{Q} des Seilzuges dar.

Der für

$$\lg \frac{\sigma}{\psi}$$

dargestellte Raster benutzt den Umstand, daß die Skalen für veränderliche Werte von ψ an sich unverändert bleiben, sich jedoch entsprechend der Differenz des Logarithmus verschieben.

Der solcherart ermittelte Längsschnitt bietet schon einige Sicherheit gegen das Abheben des Seiles, indem der tatsächliche Durchhang der Kettenlinie größer ist als derjenige der Parabel.

Zur Sicherheit wird man in dem Zugwiderstand auch noch den Wert der größten Beschleunigung und der größten Überlastung zu berücksichtigen haben.

Zeigt sich in einem bestimmten Fall, daß das angewandte Seil zu leicht, d. h. die Beanspruchung zu hoch angesetzt wurde, kann ein schwereres aus weniger hochwertigem Stahl hergestelltes Seil verwendet werden, wodurch sich unter einem auch die Baukosten vermindern. Der Mehraufwand an Leistung und Arbeit und an den

Kosten für Rollen und Windwerk wegen des schwereren und dickeren Seiles kommen kaum in Betracht.

10. Die Kettenlinien-Ausrundung (Abb. 573). Für steile Seilbahnen, bei welchen die Ausrundungsbogen mit sehr großem Halbmesser ausgeführt werden müssen, ist

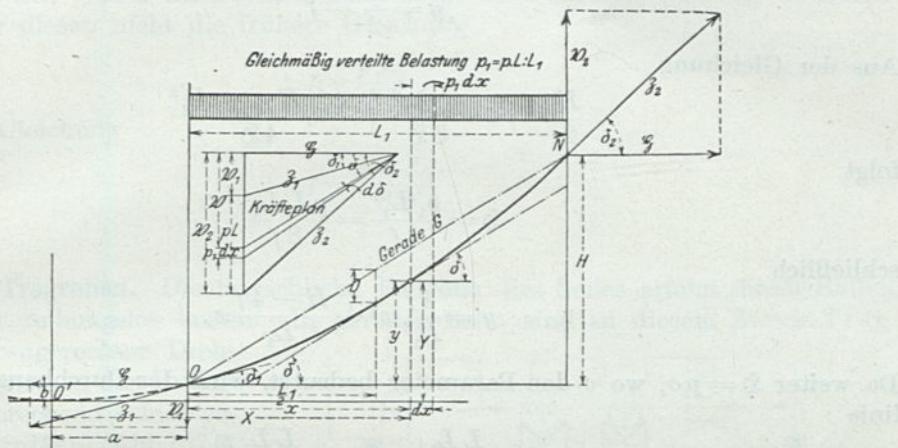


Abb. 573. Kräfteplan der parabolischen Seillinie.

die Genauigkeit dieser angenäherten Rechnung ungenügend. Man muß vielmehr den Durchhang der Kettenlinie berechnen.

Den genauen Wert des Durchhangs liefern die Gleichgewichtsbedingungen des zwischen zwei Stützpunkten gespannten Seiles, wobei angenommen wird, daß sich das Gewicht des Seiles $p L$ gleichmäßig auf die wagerechte Länge der Bahn

mit dem Werte $p_1 = \frac{p L}{L_1}$ verteilt.

Die Summe der beiden lotrechten Seitenkräfte \mathfrak{V}_1 und \mathfrak{V}_2 in den Widerlagern ist gleich dem Seilgewicht.

$$\mathfrak{V}_1 + \mathfrak{V}_2 = p L$$

$$d\mathfrak{V} = p_1 dx; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{dy}{dx} = \frac{\mathfrak{V}}{\mathfrak{H}}$$

$$\frac{d \operatorname{tg} \delta}{dx} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{\mathfrak{H}} \frac{d \mathfrak{V}}{dx} = \frac{p_1}{\mathfrak{H}} = \text{Festwert}.$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{p_1}{\mathfrak{H}} x + C,$$

$$y = \frac{p_1 x^2}{2 \mathfrak{H}} + C_1 x + C_2.$$

Für $x = 0, y = 0$ ist $C_2 = 0$; für $x = L_1$ muß $y = H$ sein, daher

$$C_1 = \frac{2 \mathfrak{H} H - p_1 L_1^2}{2 H L_1}.$$

Die Gleichung der parabolischen Seillinie lautet daher

$$y = \frac{p_1}{2 \mathfrak{H}} x^2 + \frac{2 \mathfrak{H} H - p_1 L_1^2}{2 H L_1} x.$$

Für

$$x = \frac{L_1}{2}$$

wird

$$y = \frac{H}{2} - f.$$

Aus der Gleichung

$$\frac{H}{2} - f = \frac{p_1 L_1^2}{8 \mathfrak{H}} + \frac{2 \mathfrak{H} H - p_1 L_1^2}{4 \mathfrak{H}}$$

folgt

$$\mathfrak{H} = \frac{p_1 L_1^2}{8 f} = \frac{p L L_1^2}{8 f},$$

schließlich

$$y = \frac{4 f}{L_1^2} x^2 + \frac{H - 4 f}{L_1} x.$$

Da weiter $\mathfrak{H} = p c$, wo c den Parameter bedeutet, wird der Durchhang der Kettenlinie

$$f_k = \frac{L L_1}{8 c}, \quad f_k = \frac{L L_1 p}{8 \mathfrak{H}}$$

zum Unterschied vom früher für die Parabelausrundung gefundenen Wert

$$f_p = \frac{L_1^2}{8 c}.$$

Es ist demnach

$$f_{\text{Kettenlinie}} > f_{\text{Parabel}},$$

da

$$L > L_1,$$

wenn man demnach den Längsschnitt in einer Parabellinie ausführt, wird die Seilführung schon eine gewisse Sicherheit enthalten.

Für die Steigungen

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,6 \text{ } 0,5 \text{ bzw. } 0,4$$

wird

$$\frac{f_k}{f_p} = 1,165, 1,12 \text{ bzw. } 1,06,$$

d. h. der Seilzug kann in Wirklichkeit um 16,5, 12 und 6% größer werden als der der Rechnung zugrunde gelegte Wert, bevor sich das Seil abhebt.

Für diese parabolische Seillinie gilt ebenso wie für die im vorhergehenden Kapitel behandelte Parabel, daß der Durchhang

$$f = \frac{L_1}{8} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta).$$

Den obigen Wert von f eingesetzt, wird

$$L = \frac{\mathfrak{H}}{p} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta),$$

d. h. die hier gemachte Annahme bei der Lastverteilung des Seiles

$$p_1 L_1 = p L$$

führt zu demselben Ergebnis bezüglich der Bogenlänge — für die die Länge der Sehne bei den vorkommenden geringen Einsenkungen gesetzt werden kann — wie die angenäherte Parabel bezüglich der wagerecht gemessenen Spannweite. Für gegebene Zahlenwerte für \mathfrak{H} , p und $(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)$ wird somit die schiefgemessene Ausrundungs-

länge mit der für die Parabel gefundenen wagrecht gemessenen Spannweite der parabolischen Seillinie übereinstimmen. Auf gleiche wagrecht gemessene Ausrundungslängen gibt die parabolische Kettenlinie den größeren Durchhang.

Die Rechentafel Abb. 572 ist für beide angenähert richtigen Berechnungsgrundlagen verwendbar, jedoch im letzteren Falle nicht auch zur Ausrechnung des Durchhangs, da für diesen nicht die frühere Gleichung

$$f = \frac{p L_1^2}{8 \ddot{\delta}},$$

sondern die Gleichung

$$f = \frac{p L L_1}{8 \ddot{\delta}}$$

gilt.

11. Die Tragrollen. Die tatsächliche Führung des Seiles erfolgt durch Rollen, die möglichst reibungslos laufen. In gerader Bahn sind zu diesem Zweck Tragrollen mit wagerechter Drehachse angeordnet, in den Krümmungen entsprechend schief gelagerte Leitrollen (Abb. 574).

Die Tragrollen in gerader Bahn sind nur mit dem Gewicht des Seiles belastet; die Kurvenrollen müssen die der Seilspannung entsprechende radial gerichtete, meist beträchtliche Seitenkraft aufnehmen können.

Die verschiedenen gearteten Aufgaben dieser Behelfe bedingen auch, daß für die Asteilung und Bemessung verschiedene Grundlagen richtunggebend sind.

Wenn der Höhenplan einerseits so beschaffen sein muß, daß sich das Seil durch die größte jemals vorkommende Spannkraft nicht abheben kann, so muß andererseits die Entfernung der einzelnen Tragrollen voneinander so bemessen sein, daß das Seil selbst bei der geringsten möglichen Belastung noch nicht am Bahnkörper streift.

Unter sinngemäßer Anwendung der bisher benützten Symbole gilt für den Durchhang zwischen zwei Rollen

$$f = \frac{p t a}{8 \ddot{\delta}},$$

wo a die wagerechte Entfernung der beiden Rollen und t „ „ „ „ „ bezeichnet.

Man begeht hierbei den Fehler, daß die der Bahnneigung entsprechende Wagenzugkraft $P \sin \alpha$ als in der Richtung der Berührenden der Kettenlinie liegend angenommen wird, was nicht streng zutrifft. Bei den geringfügigen Einsenkungen des Seiles zwischen zwei Rollen ist dieser Fehler von ganz untergeordneter Bedeutung.

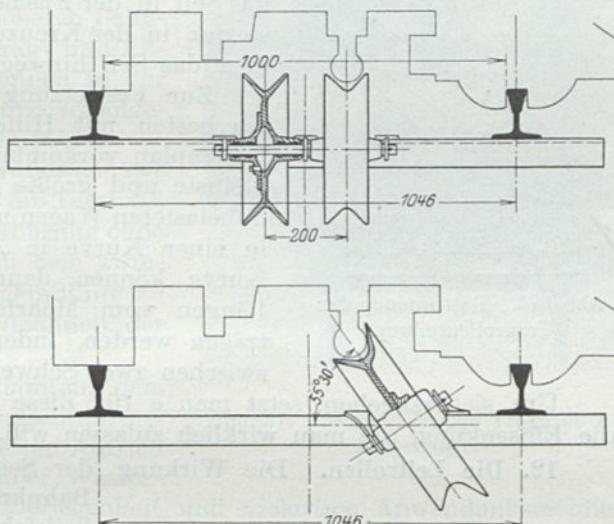


Abb. 574. Umgrenzungslinie eines Seilbahnwagens und Anordnung der Seil-, Trag- und Ablenk-Rollen.

Die Bahnneigung α ist bekannt, ebenso S , daher

$$\ddot{S} = S \cos \alpha, \quad \cos \alpha = \frac{a}{t},$$

hieraus

$$f = \frac{pt^2}{8S}$$

und die gesuchte Teilung

$$t = \sqrt{\frac{8Sf}{p}}.$$

Die zugelassene Einsenkung senkrecht zur Bahnebene gemessen von der Unterseite des Seiles sei e , dann ist

$$e = f \cos \alpha = f \frac{a}{t}, \text{ somit } f = \frac{t}{a} e \text{ und } t = \sqrt{\frac{8S}{p} e \cos \alpha}.$$

Zwischen Seil und Unterbaukörper bzw. Schotterbett läßt man für allfällige Unregelmäßigkeiten einen Raum von 50 bis 60 mm frei. Es wird dann möglich sein,

das Seil in der Fläche der Schienenoberkante zu führen, so daß in der Kreuzung die Flachrollen des Fahrzeuges über das Seil hinwegfahren können.

Zur Festsetzung der Rollenteilung berechnet man am besten mit Hilfe einer Rechentafel für einige im Höhenplan vorkommende Neigungen, darunter auch für kleinste und größte Steigung den Wert von S für den unbelasteten Wagen und trägt die so gewonnenen Werte in einer Kurve in Abhängigkeit von S auf. In diese Kurve können dann Abstufungen der Ordinaten in Längen vom Mehrfachen der Schwellenteilung eingetragen werden, indem die Rollen stets nur in Gruben zwischen zwei Schwellen angebracht werden können.

Abb. 575. Bestimmung der Tragrollenteilung.

Um sicherzugehen, setzt man e für diese Rechnungen etwas kleiner an als die Einsenkung, die man wirklich zulassen will.

12. Die Leitrollen. Die Wirkung der Seilspannung auf die Leitrollen in Bahnkrümmungen geht aus dem durch die Seilrichtungen gegebenen Kräfteplan hervor. Der Druck, welchen eine Rolle außer dem Seilgewicht zu tragen hat, beträgt

$$D = \frac{t}{R} S,$$

wo R den Bogenhalbmesser bedeutet (Abb. 576).

Diesem Wert ist noch das anteilige Seilgewicht, welches in senkrechter Richtung wirkt,

$$p a \frac{h}{1000},$$

(h° Neigung zwischen zwei in wagerechtem Abstand a befindlichen Rollen) geometrisch hinzuzufügen, da die Mittelkraft der Seilspannungen wagerecht liegt.

Eine genaue Feststellung der Seilbeanspruchung beim Passieren einer Ablenkrolle wäre zu umständlich, dagegen erscheint die Annahme zutreffend, daß gleiche spezifische Flächendrücke auch gleichgroße Abnutzungen verursachen.

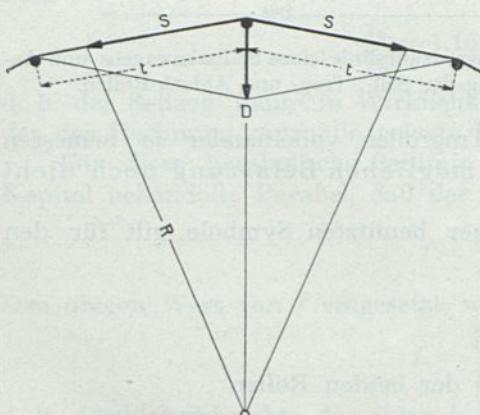


Abb. 575. Bestimmung der Tragrollenteilung.

Eine genaue Feststellung der Seilbeanspruchung beim Passieren einer Ablenkrolle wäre zu umständlich, dagegen erscheint die Annahme zutreffend, daß gleiche spezifische Flächendrücke auch gleichgroße Abnutzungen verursachen.

Wenn weiterhin angenommen wird, daß alle Rollen in einem Seilquerschnitt dem Seil die gleiche Auflage bieten, so erhält man in der am Rollenumfang berührten Länge, demnach im Rollendurchmesser, ein Maß für den spezifischen Druck.

Die langjährige Betriebserfahrung lehrt, daß Tragrollen mit dem zehnfachen Seildurchmesser günstige Ergebnisse liefern. In Krümmungen müßte man demnach Leitrollen mit einem dem Kurvendruck entsprechend vergrößertem Durchmesser ausführen. Nachdem dies unter Beibehaltung der Teilung zu unausführbaren Durchmessern führt, wendet man beide Mittel an. Man gibt den Ablenkrollen 13- bis 18-fachen Seildurchmesser und verkleinert die Teilung entsprechend.

Die Rollenteilungen der aufeinanderfolgenden Teilstrecken sollen möglichst keinen gemeinsamen Teiler haben; desgleichen vermeide man Teilungen, die ein Mehrfaches der Schienenlänge bilden, weil sich sonst im Seil durch Resonanzerscheinungen gerne stehende Wellen bilden, die das Seil sehr ungünstig beanspruchen.

Zu beachten ist, daß in der oberen Bahnhälfte für jedes Seilende eigene Trag- und Ablenkrollen nötig sind, dagegen können in der unteren Bahnhälfte die Kurvenrollen so angeordnet werden, daß sie beide Seile führen.

Durch die Feststellung der Grundsätze der Seilführung in Krümmungen folgt die Tatsache, daß Krümmungen in der Linienführung ohne weiteres anwendbar sind und daß kein zwingender Grund besteht die Linie geradlinig zu legen, wie es bei den ersten Seilbahnen der Fall war.

Die Zulässigkeit einer gekrümmten, dem Gelände sich anschmiegender Trassenführung im Zusammenhang mit dem ortsfesten Antrieb sichern den Motorbahnen gegenüber Wasserübergewichtbahnen weitgehende Überlegenheit und vielartige Anwendungsmöglichkeiten.

13. Bauformen der Seilrollen. Die Trag- und Ablenkrollen werden aus einem Stück aus Gußeisen, eventuell mit Holzfütterung der Rille oder aus Blech gepréßt, erzeugt. Die letztere Ausführung ist wegen ihres geringeren Gewichtes und leichterer Reparatur der ersteren vorzuziehen. Die Rollen werden auf feste Achsen gelagert. Auf gute und zuverlässige Schmierung der Rollen ist größter Wert zu legen. Schleifende Rollen nützen das Drahtseil ab; dieselbe Wirkung hat die jedesmalige Inbewegungsetzung der Rolle durch das Seil. Bei der großen Zahl der Rollen darf diese Wirkung nicht unterschätzt werden; es ist daher unrichtig, eine billige, aber schwere Rollenbauart anzuwenden, die dann im Betrieb durch die hohen Kosten der Seilabnutzung aufgewogen wird. Dieser Umstand in Verbindung mit den hohen Kosten des Schmiermaterials und der Beaufsichtigung der Zapfenlager spricht vielmehr dafür, alle Rollen mit Kugellagern zu versehen, die so zu sagen keinerlei Wartung benötigen und fast kein Schmiermaterial verbrauchen.

Die Tragrollen sollen stets Kimmen mit einem mindestens dem Seilquerschnitt entsprechenden Kreisquerschnitt erhalten, so daß das Seil in der Kimme gut aufliegt, ohne zu klemmen und ohne seitlich zu schwingen. Walzenförmige Tragrollen sind zweckmäßig (Abb. 577), weil sie die seitlichen Schwingungen des Seiles und die damit verbundenen hohen Abnutzungen und Stauchungen des Drahtmaterials begünstigen.

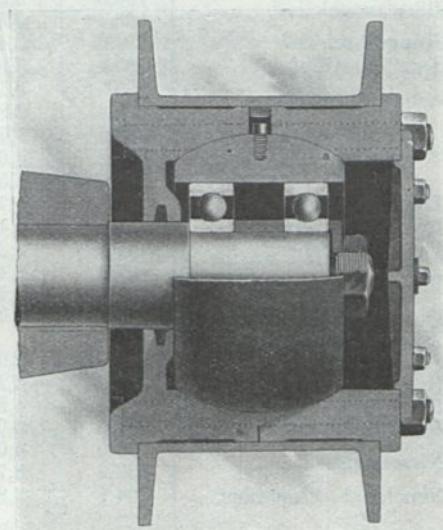


Abb. 577. Walzenförmige Tragrolle mit Kugellager.

Die für ein Seilgewicht von 3,467 kg/m bei 30 mm Durchmesser gebauten gußeisernen Tragrollen der Hungerburgbahn sind mit 300 mm Durchmesser in der Seilrinne ausgeführt und wiegen 24 kg; die Ablenkrollen, die unter einem Winkel von 55° schief gelagert sind, haben einen Durchmesser von 392 mm erhalten und wiegen 35 kg.

Drahtseile und Seilführung bei ausgeföhrten Drahtseilbahnen mit Motorbetrieb.

	Drahtseil		Tragrollen			Leitrollen			Windwerk Seilscheibe Ø mm
	Ø mm	Gewicht kg/m	Ø mm	Gew. kg	Teilung m	Ø mm	Gew. kg	Teilung m	
Bürgenstock	{ 30,0 33,1	{ 3,0 3,34	160	—	15	600	—	11	3840
Hungerburg	30,0	3,47	300	24	9—15	392	35	8,7	3770
Territet—Glion	35,0	3,90	240	21	15	360	—	9,0	3600
Siders—Vermala	{ 30,7 29,6 23,0	{ 3,14 2,88 1,79	300	18	8—14	390	51	7—11	3500
Stanserhorn	{ 34,2 33,0	{ 3,61 3,59	300	—	14—17	600	—	12	4000
Tréport—Terrasse	36,9	4,70	300	20	20	—	—	—	3200
Lyon Fourvière	45,0	6,40	270	—	4,7	—	—	—	6000
Treib—Seelisberg	31,0	3,27	300	—	12—14	390	—	7—8	3794
Mte. Bré	{ 27,9 31,5	{ 2,44 3,25	230	—	10—13	265	—	8—10	3170
Tátra—Tarajka	18,5	1,06	250	15	11	300	22	8	4020
Erdmannsdorf—Augustusburg	23,0	2,00	260	—	14	360	—	10	3600
Heidelberg	30,2	3,20	300	—	11	390	—	—	3770
Les Avants—Sonloup	39,7	4,80	300	—	11—14	390	—	9—16	3900
Mendelbahn	35,0	4,00	300	—	12—15	420	—	7,5	3800
Niesenbahn	{ 35,0 33,0	{ 4,00 3,75	300	—	10—17	390	—	6—12	3800
Neuchâtel—Chamont	34,8	3,80	300	—	7—11	390	—	8—13	3600

14. Bahnwiderstände der Wagen. Die Wagen sind wie andere nicht angetriebene Eisenbahnfahrzeuge zu betrachten; sie verhalten sich insofern etwas ungünstiger, als sie nicht gefedert sind und meist kleine Laufraddurchmesser — 500 bis 600 mm statt wie sonst üblich 800 bis 1000 mm — aufweisen. Die Geschwindigkeit ist dagegen gering.

Den Zugwiderstand mit $k=3$ bis 8, im Mittel 5 kg/t eingesetzt, wird man den tatsächlichen Verhältnissen nahekommen. Im übrigen spielt der Zahlenwert des Zugwiderstandes bei den meist vorkommenden großen Steigungen — 100 bis 700% — kaum eine Rolle.

15. Anfahrsbeschleunigung. In den größeren Steigungen verursacht eine hohe Anfahrsbeschleunigung den Reisenden Unbehagen, daher geht man nicht über 0,1 bis 0,2 m/sec². Es hat im allgemeinen auch keinen Zweck, hohe Beschleunigungen anzuwenden, weil bei den kleinen Fahrgeschwindigkeiten der hierdurch erzielte Zeitgewinn nur unbedeutend sein kann.

Nur bei ganz kurzen Seilbahnen, die mehr einem Aufzug ähneln und die mit höheren Geschwindigkeiten fahren können, ist es am Platz, schnell anzufahren. Derartige Aufzüge kommen im Bergbau vor, wo sie für die Beförderung der Belegschaft dienen, die sich an die Eigenart dieses Verkehrsmittels rasch gewöhnt.

16. Seilleitungswiderstände. Den zur Fortbewegung des gespannten Seiles zu überwindenden Widerstand kann man unter denselben Voraussetzungen, die für Eisenbahnfahrzeuge gebräuchlich sind, in ihrer Gesamtheit berücksichtigen. Zu diesem Behufe denke man sich das Seil für den Moment ruhend und die Trag- und Ablenkrollen unter demselben Druck, den das Seil verursacht, sich auf dem

Seile wälzend. Hierdurch ist die Übereinstimmung mit einem Schienenfahrzeug gefunden. Es ist zu erwarten, daß der Seilwiderstand verhältnismäßig größer sein wird als bei einem Eisenbahnfahrzeug, weil das Seil keine ebene Fahrfläche aufweist wie die Schienen, andererseits auch die Rollen ihrem Zwecke dienend, keine zylindrische Tragfläche haben können, sondern mit einem rillenförmigen Mantel versehen sein müssen.

Der kleine Durchmesser der Rollen von nur 0,2 bis 0,5 m vermehrt ebenfalls den Zugwiderstand. Die ungünstigen Verhältnisse können durch reichliche Schmierung gemildert werden, weil die Reibung zu keiner Kraftübertragung — außer zur Drehung der Rollen — benötigt wird; jedenfalls sind Werte für $w = 10$ bis 15% ausreichend.

In der weiteren Verwendung dieser Zahl muß beachtet werden, daß der durch das Seil auf die Rollen ausgeübte Druck nicht nur vom Gewicht des Seiles erzeugt wird, sondern daß auch die Mittelkraft aus den Seilspannungen im auf- und ablaufenden Seil den Druck vermehrt.

Aus den in den Abs. 9 und 10 dieses Kapitels ausführlich behandelten Parabel-eigenschaften bezüglich der Seilspannung S und deren wagrechter Teilkraft \mathfrak{S}

$$S = p(y + c) \text{ und } \mathfrak{S} = pc$$

folgt, daß beim freigespannten Seil die senkrechte Belastung eines Stützpunktes

$$\mathfrak{B} = \sqrt{S^2 - \mathfrak{S}^2} = py$$

ist.

Faßt man eine bestimmte Teilstrecke mit der Steigung $h\%$ und einer unveränderlichen Rollenteilung t m ins Auge, wird die durch die Seilspannung verursachte senkrechte Belastung der beiden, am oberen und unteren Ende je einer Teilung befindlichen Rollen

$$\mathfrak{B}_1 = py_1 \text{ und } \mathfrak{B}_2 = py_2.$$

Die Seilspannung S_1 auf der unteren Tragrolle steigert sich längs der Teilung um $p(y_2 - y_1)$ auf S_2 , wenn mit y_1 die Ordinate des unteren und mit y_2 diejenige des oberen Stützpunktes bezeichnet wird. Beim Passieren einer Rolle wächst die Seilspannung außerdem um den beim Umlauf der Tragrolle zu überwindenden Rollenwiderstand. Letzterer ebenso auch das Seilgewicht einer Rollenteilung ist im Vergleich zu der Seilspannung selbst gering, so daß für benachbarte Rollenteilungen mit gleicher Bahnneigung und gleicher Spannweite identische Seilparabeln angenommen werden können. Die senkrechte Belastung einer Tragrolle aus in zwei benachbarten Rollenteilungen gespannten Seilstücken ist somit jeweils gleich der Summe der anteiligen Belastungen der beiderseitigen Spannweiten:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_1 + \mathfrak{B}_2 = p(y_2 - y_1).$$

In den für die Bahnneigung kennzeichnenden Größen ausgedrückt ist

$$\mathfrak{B} = pa \frac{h}{1000}, \text{ da } y_2 - y_1 = a \frac{h}{1000} \text{ ist.}$$

\mathfrak{B} wirkt senkrecht; für den Rollwiderstand kommt die auf die Bahnneigung senkrechte Teilkraft

$$\mathfrak{B} \cos \alpha$$

in Betracht.

Der Rollwiderstand je Tragrolle ist somit

$$\frac{w_s}{1000} pa \frac{h}{1000} \cos \alpha,$$

wenn mit $w_s = 10$ bis 15 kg/t der Seilleitungswiderstand bezeichnet wird.

Für eine aus n gleichen Rollenteilungen bestehende Teilstrecke wird der Rollenwiderstand

$$n \frac{w_s}{1000} p a \frac{h}{1000} \cos \alpha.$$

Es ist $\frac{n a h}{1000} = H'$ der in dieser Teilstrecke überwundene Höhenunterschied, dann wird der Seilleitungswiderstand

$$p H' \cos \alpha \frac{w_s}{1000};$$

da hier $p H'$ das senkrecht frei hängende Seilgewicht darstellt, ist der gesamte Seilleitungswiderstand in gerader Bahn unabhängig von der Größe und Zahl der Rollenteilungen. In Hinblick auf die Unsicherheit in der Bestimmung von w_s kg/t erscheint es auch zulässig für $\cos \alpha$ bei veränderlicher Bahnneigung den Durchschnittswert einzusetzen, auch deshalb, weil $\cos \alpha$ sich innerhalb der praktisch vorkommenden Bahnneigungen vergleichsweise wenig ändert.

In Krümmungen kommt noch die Mittelkraft der Seilspannung entsprechend dem Richtungswechsel hinzu.

Diese Teilkraft, die in der durch drei Ablenkrollen bestimmten Ebene in wagerechter Richtung wirkt, ist zu der oben berechneten in einer zur Bahnneigung senkrechten Ebene wirkenden Gewichtsbelastung geometrisch zu addieren.

Die auf eine Ablenkrolle wirkende Mittelkraft (Abb. 576) der Seilspannungen ist

$$D_k = S \frac{t}{R},$$

wo R den Krümmungshalbmesser in m bezeichnet.

Auf einer Ablenkrolle lastet demnach der Druck

$$D = \sqrt{\mathfrak{B}^2 \cos^2 \alpha + D_k^2}.$$

Man berechnet D_u für die unterste Ablenkrolle der in Frage stehenden gekrümmten Teilstrecke und unter Berücksichtigung der Zunahme der Seilspannung bis zur obersten Kurvenrolle D_o für die letztere. Sind n_k Kurventeilungen vorhanden, genügt es den Mittelwert $D = \frac{D_o + D_u}{2}$ in die Rechnung einzuführen.

Bei richtiger Aufstellung der Ablenkrollen ist deren Drehachse senkrecht auf die Mittelkraft der beiden auf die Ablenkrollen wirkenden Kräfte $\mathfrak{B} \cos \alpha$ und D , die unter einem rechten Winkel zueinander gerichtet sind.

Der allgemeine Ausdruck für den Seilleitungswiderstand für eine Seilbahn mit mehreren geraden und gekrümmten Teilstrecken lautet somit:

$$C = \left[\sum p H' \cos \alpha + \sum n_k \sqrt{\left(\frac{p a h}{1000} \cos \alpha \right)^2 + \left(\frac{D_u + D_o}{2} \right)^2} \right] \frac{w_s}{1000}.$$

Das zweite Glied unter dem Wurzelzeichen stellt die durch die Bahnkrümmungen verursachte scheinbare Gewichtsvermehrung des auf den Ablenkrollen laufenden Seiles dar.

Streng genommen ist der so ermittelte Seilleitungswiderstand nicht unveränderlich, weil durch den Stellungswechsel der Wagen die Zahl der berührten Rollen in einem Seiltrum ab-, im anderen zunimmt. Der Seilleitungswiderstand ist bei steilen

Seilbahnen verhältnismäßig sehr klein, es genügt, eine Rechnung für den ungünstigsten Belastungsfall durchzuführen. Auch bei weniger steilen Bahnen wird man mit 3 bis 5 Werten für verschiedene Wagenstellungen auskommen.

17. Das Seil. Alle Umstände, die für die günstige Ausmittlung des Lage- und Höhenplanes einer Seilbahn zu beachten sind, sind ermittelt, weiter auch die Einzelkräfte, die bei dem streng geregelten Bewegungsvorgang auftreten. In den durchgeführten Rechnungen sind Seil- und Wagengewichte als gegeben angenommen bzw. ersteres auf Grund überschlägiger Rechnung gewählt, letzteres auf Grund diesbezüglicher Erfahrungszahlen eingesetzt.

Für die endgültige Wahl des Seilquerschnittes muß auf Grund der in jedem Belang festliegenden Anlageverhältnissen die ungünstigste Seilbeanspruchung errechnet werden.

Im allgemeinen tritt die ungünstigste Seilbeanspruchung dann ein, wenn sich der vollbelastete Wagen in der Höchststeigung befindet. Bei längeren Bahnen mit schweren Seilen kann der Fall vorkommen, daß das Seilgewicht einen größeren Einfluß hat, so daß die größte Beanspruchung in einer tieferen Wagenlage mit großer Seillänge eintritt.

Die größte Seilspannung wird

$$S_{max} = P_2 \sin \alpha + P_2 \frac{w}{1000} + p H_1 + C,$$

wo alle Symbole die bisher gebrauchte Bedeutung haben und H_1 den Höhenunterschied der zwischen der fraglichen Wagenstellung und der Stelle des gefährlichen Seilquerschnittes bezeichnet. C ist der für eine bestimmte Anlage als unveränderlich gedachte Seilleitungswiderstand in kg.

Befindet sich die Stelle der ungünstigsten Beanspruchung in einer Wagenlage, wo regelmäßig angefahren werden muß, so steigert sich diese Beanspruchung noch um die Beschleunigungskraft.

$$\left(\frac{P_2 + pL}{g} \right) \gamma,$$

wo γ die Beschleunigung m/sec² und L die Länge des Seiles bezeichnet.

Es ist

$$S_m = q \sigma \quad \text{und} \quad p = q \psi,$$

somit

$$q \sigma = P_2 \left(\sin \alpha + \frac{w}{1000} \right) + q \psi H_1 + C + \frac{P_2}{g} \gamma + q \psi \frac{L \gamma}{g},$$

$$q \left[\sigma - \psi \left(H_1 + \frac{\gamma L}{g} \right) \right] = P_2 \left(\sin \alpha + \frac{w}{1000} + \frac{\gamma}{g} \right) + C.$$

Der Seilleitungswiderstand ist hier noch unbekannt und müßte seinem genauen Werte nach erst errechnet werden. Für den Zweck dieser Rechnung genügt es, mit dem spezifischen Seilleitungswiderstand w_s eines gerade gestreckt gedachten Seiles zu rechnen

$$p H \cos \alpha \cdot \frac{w_s}{1000} = q \psi H \cos \alpha \frac{w_s}{1000}$$

und w_s der Sicherheit halber mit 15 bis 20 kg einzusetzen, dann wird

$$q = \frac{P_2 \left(\sin \alpha + \frac{w}{1000} + \frac{\gamma}{g} \right)}{\sigma - \psi \left(H_1 + \frac{\gamma L}{g} + H \cos \alpha \frac{w_s}{1000} \right)}.$$

H ist der gesamte Höhenunterschied der Bahn und α der mittlere Neigungswinkel.

Will man ganz genau rechnen, wird man auch diejenige Beschleunigungskraft in Rechnung setzen, die zur Inbewegungsetzung der Rollen nötig ist.

Leichte Seile aus hochwertigem Material geben kleine Widerstände und bequemere Bauverhältnisse, indem die Windwerkstrommeln dadurch mit kleineren Durchmessern ausgeführt werden können. Dieser Umstand ist oft von Belang, weil im steilen Gelände des oberen Bahnendes die Unterbringung des Windwerkes bauliche Schwierigkeiten verursacht.

Leichte, d. h. hohe Zugfestigkeit aufweisende Seile sind jedoch im Material spröde, neigen eher zu Draht- und Litzenbrüchen als weiche Seile mit geringerer Festigkeit und großer Dehnung.

Schwere Seile verwendet man, um unter gegebenen Geländeverhältnissen schärfere Ausrundungsbogen einlegen zu können.

Ein schweres Seil bewirkt unter Umständen auch einen Kraftausgleich.

In der Schweiz sind folgende Anforderungen an das Seilmaterial üblich:

Sicherheit: zehnfach (statisch gerechnet),

Zugfestigkeit: 150 bis 180 kg/qmm,

wenn der Lage- und Höheplan ungünstig: 120 bis 150 kg/qmm,

Dehnung nicht unter 3%,

Torsionsarbeit: > 5,5 cmt/ccm,

Anzahl der Umbiegungen um einen Dorn von fünffachem Seildurchmesser: 10.

Für die Querschnittsberechnung ist zu beachten, daß zufolge der Fabrikationsvorgänge die Festigkeit des fertigen Seiles nur etwa $\frac{4}{5}$ der Summe der Bruchfestigkeiten der einzelnen Drähte erreicht.

Die österreichischen Seilbahnvorschriften lassen die Anwendung von hochwertigem Stahl bis 180 kg/qmm Bruchlast zu.

Die Erfahrung spricht für Seile mit großer Dehnung und verhältnismäßig kleiner Bruchlast; diese sind weniger spröde und neigen weniger zu Ermüdungserscheinungen bzw. Erschöpfung des Arbeitsvermögens des Seilmaterialeis infolge der Beanspruchungen im Betrieb.

Wo es die räumlichen Verhältnisse zulassen, wird man den Windwerkstrommeln möglichst große Durchmesser geben, um die Molekularbeanspruchung durch das Aufwinden des Seiles möglichst herabzusetzen. Erst jahrelanger Betrieb liefert genauen Aufschluß über die unter gegebenen Verhältnissen wirtschaftlichsten Seildimensionen. Nachdem es im allgemeinen üblich ist, die Seile nicht länger als zehn Jahre im Betrieb zu verwenden, tut man gut, die Festigkeit des verwendeten Materials so zu wählen, daß das Seil im Betrieb tunlichst die zugelassene höchste Lebensdauer erreicht. Bei neuen Bahnanlagen wird oft keine längere Lebensdauer der Seile als 5 bis 6 Jahre erreicht.

Die durchschnittliche Leistung der Seile der schweizerischen Drahtseilbahnen beträgt 40700 Seilkilometer, wobei Jahresleistungen von etwa 10000 bis 20000 km zu verzeichnen sind.

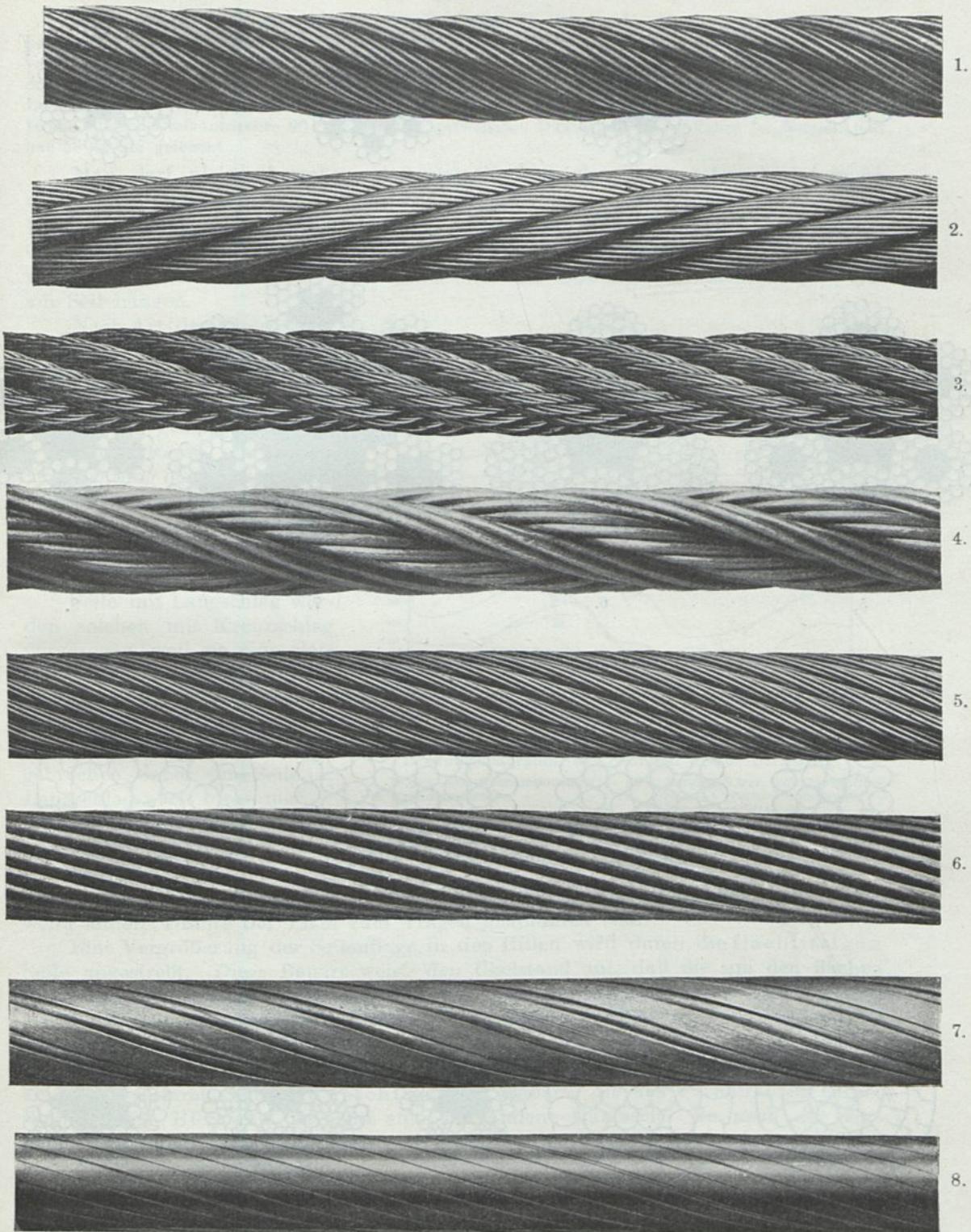


Abb. 578. Flecharten von Drahtseilen (St. Egydy):

1. Langschlag; 2. Kreuzschlag; 3. Kabelschlag; 4. Wechselschlag; 5. Litzenpiraliseil, Herkules-Bauart; 6. Spiralseil; 7. Halbverschlossenes Seil; 8. Ganzverschlossenes Seil.

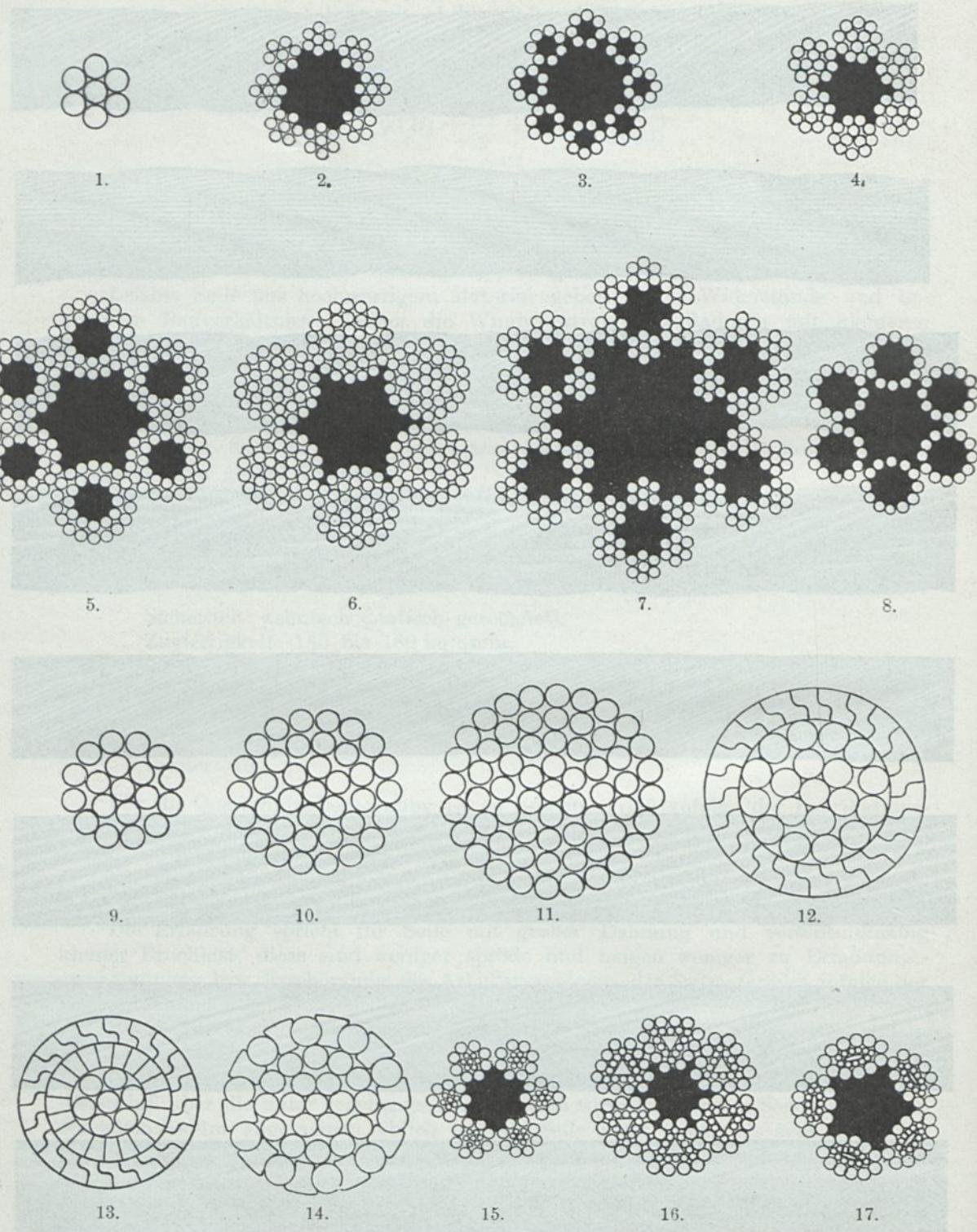


Abb. 579. Bauart der Drahtseile (St. Egydy):

1. Litze aus sechs Drähten mit Drahteinlage; 2.—6. Runddrahtseile in Litzenkonstruktion mit Hanfeinlage; 7. Kabelbauart; 8. Schiffsseil; 9.—11. Spiraltragseile; 12.—14. Verschlossene Drahtseile; 15. Compoundseil; 16. Dreikantlitziges Seil; 17. Flachlitziges Seil.

Das nach dem „Compound-System“ (dünne Drähte im Innern der Litzen, stärkere außen) gebaute erste Seil der Hungerburgbahn erzielte eine Lebensdauer von $4\frac{1}{2}$ Jahren mit einer Leistung von 60000 km. Das seit Betriebseröffnung eingebaute zweite Seil derselben Bezugsquelle und Bauart erzielte 27000 km, das dritte „Rundschlagseil“ auch nur eine Leistung von 37600 km. Da diese Leistung nicht befriedigte, wurde schließlich ein Dreikantflachlitzenseil gewählt, dessen Runddrähte 165 kg, dessen Dreikantdrähte 90 kg Festigkeit aufweisen. Dieses Seil war 4 Jahre im Betrieb und hat 58000 km geleistet.

Man darf nicht übersehen, daß sich die Seile den Temperaturschwankungen entsprechend strecken und kürzen; bei Bahnen mit großen Betriebslängen ist die Längenänderung selbst während eines Tages nicht unbeträchtlich. Aus diesem Grunde dürfen niemals beide Fahrzeuge, wenn außer Betrieb, mit der Zangenbremse verankert werden, vielmehr muß mindestens der talseitig befindliche Wagen frei am Seil hängen.

Nach Art der Flechtung (Abb. 578) unterscheidet man Seile mit Kreuz- und solche mit Langschlag, auch Albertschlag genannt.

Bei letzteren stimmt die Drehrichtung der Flechtung der Drähte in den Litzen mit derjenigen der Litzen im Seil überein. Beim Kreuzschlag ist das Umgekehrte der Fall.

Seile mit Langschlag werden solchen mit Kreuzschlag vorgezogen, weil sie eine glattere Oberfläche aufweisen, daher weniger der Abnutzung unterliegen. Die Drähte sind auch in ihrer Richtung weniger gebrochen, daher sind Seile im Langschlag auch biegsamer.

Bei Kreuzschlagseilen trägt immer nur ein Draht jeder Litze; ist derselbe dünn, so nutzt er sich rasch ab, ist er aber dick, so bricht er an der Auflagestelle bald durch, wenn andere Drähte der Litze zum Tragen gekommen sind.

Eine Vergrößerung der Seilauflage in den Rillen wird durch die flachlitzigen Seile angestrebt. Diese Bauart weist den Übelstand auf, daß die um den flachen Kern liegenden Drähte nicht mit der gleichmäßigen Steigung einer zylindrischen Schraubenlinie geflochten werden können. Gemildert erscheint dieser Übelstand bei dreikantlitzigen Seilen.

Die höchste Ausnutzung des Querschnittes und die gleichmäßigste Oberfläche erzielt man durch Seile der geschlossenen Bauart, die aus Formdrähten hergestellt werden. Hier fehlt die sonst stets vorhandene Hanfseele. Je nach der vorliegenden Aufgabe wählt man fein- oder grobdrähtige Typen, solche mit Runddrahtkern, halb oder ganz verschlossen.

Die Vorteile dieser Bauart sind: geringer Durchmesser bei gegebener Bruchfestigkeit, gleichmäßiger Verschleiß der Deckdrähte, annähernd gleichmäßige Anspannung aller Drähte, Festhalten der Drahtenden durch die Nachbardrähte im Falle eines Drahtbruches. Diesem steht als Nachteil der hohe Preis sowie der Umstand entgegen, daß sich die Formdrähte nicht aus einem so hochwertigen Stahl-

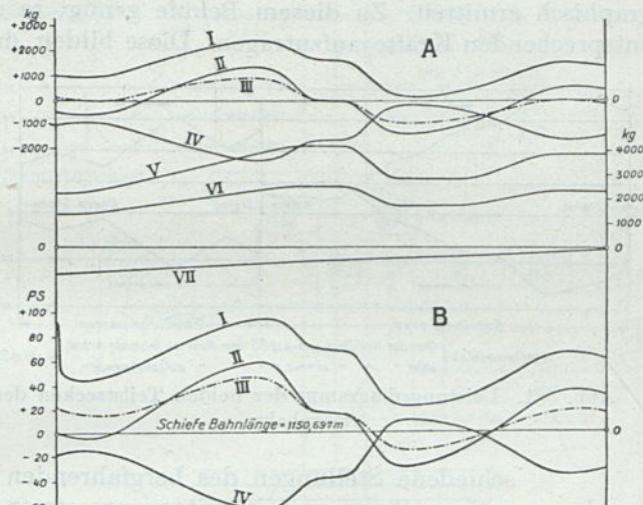


Abb. 580.
Leistungsdiagramm der Seilbahn Treib—Seelisberg.

- | | |
|--------------------------------------|--|
| A. Wagen- und Seilkomponenten; | IV. Bergfahrt leer, Talfahrt vollbelastet, Gewichtskomponente; |
| B. Kraftdiagramme; | V. Wagen vollbelastet; |
| I. Bergfahrt vollbelastet; | VI. Wagen leer; |
| II. Berg- und Talfahrt vollbelastet; | VII. Seil. |
| III. Beide Wagen leer; | |

material herstellen lassen als Runddrähte. Für gegebene Zugkräfte wird daher der Gewichtsvorteil durch diesen Umstand aufgehoben. Tatsächlich haben geschlossene Seile bisher vorwiegend als Zugseile für Wasserlastbahnen und als Tragseile für Schwebebahnen Anwendung gefunden. Die Herstellung des Seilkopfes zur Befestigung des Wagens ist bei dieser Bauart auch schwieriger als bei Seilen, die aus Runddrähten hergestellt sind.

Abb. 579 gibt eine Übersicht der gebräuchlichen Seilbauarten.

18. Kraftbedarf. Betriebsmotor. Die für die richtige Wirkungsweise einer Seilbahnanlage maßgebenden Umstände sind ermittelt; desgleichen die Teilkräfte, die zur Beförderung der Wagen aufgewendet werden müssen.

Die höchste und die durchschnittliche Mittelkraft wird zweckmäßigerweise graphisch ermittelt. Zu diesem Behufe genügt es die der jeweiligen Wagenstellung entsprechenden Kräfte aufzutragen. Diese bilden, da eine gleichmäßige Geschwindigkeit vorausgesetzt wird, gleichzeitig das Maß für die aufzuwendende Leistung (Abb. 580, 581).

Im positiven Sinne sind aufzutragen:

- die Wagenzugkraft $P_2 \sin \beta$,
- die Wagenreibung $(P_1 + P_2) \frac{k}{1000}$,
- der Seilleitungswiderstand für ver-

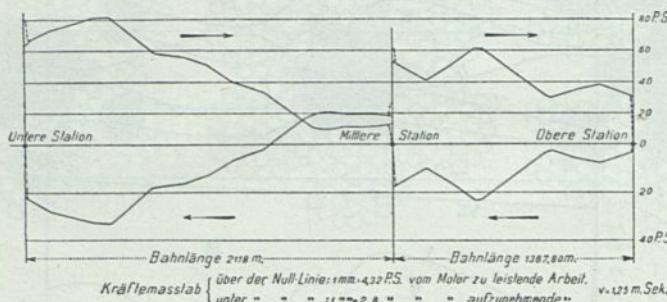


Abb. 581. Leistungsdiagramm der beiden Teilstrecken der Niesenbahn.

schiedene Stellungen des bergfahrenden Wagens.

Im negativen Sinne und in entgegengesetzter Richtung fortschreitend:

d) die Wagenzugkraft $P_1 \sin \alpha$,

schließlich:

e) die Hubkraft ph für das Seil, wo h den Unterschied der jeweiligen Höhenlage der beiden Wagen bedeutet. In der Bahnmitte wird $ph = 0$, am unteren Ende $+ph$, am oberen Ende $-ph$,

alles bezogen auf den ungünstigsten Belastungsfall, daß der bergfahrende Wagen P_2 voll belastet ist und der talfahrende P_1 leer läuft.

Die Additionen bzw. Subtraktionen der gleichzeitigen Zugkraftwerte über die ganze Strecke gibt den Wert der am Umfang der Seilscheibe des Windwerkes abzugebenden Kraft. Durch Planimetrieren erhält man den Mittelwert, welcher für die Dauerlast des Motors maßgebend ist.

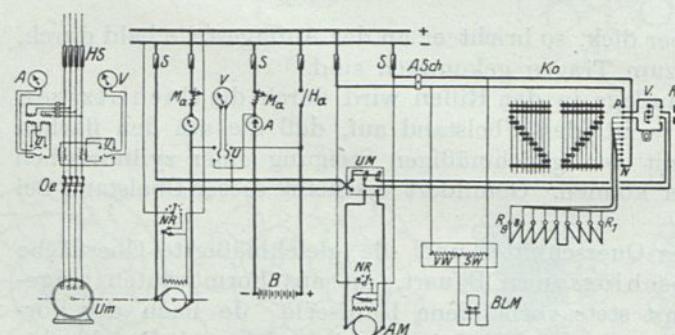


Abb. 582. Schaltplan des elektrischen Antriebes für das Windwerk der Seilbahn auf die Hungerburg (Innsbruck).

Umformung: 2000 V Zweiphasenstrom auf 440 V Gleichstrom, Leistung 40 KW
Pufferbatterie, Leistung . . . 50 KWh
Nebenschlußmotor, Leistung . . . 80 PS

Die Wahl der Stromart — Gleichstrom oder Drehstrom — ist grundsätzlich gleichgültig; erstere wird vorzuziehen sein, wenn auf eine gleichmäßige Stroment-

nahme und Parallelbetrieb mit Akkumulatoren Wert zu legen ist. Schaltung und Steuerung wird bei Gleichstrom einfacher und billiger.

Ein Nachteil des Gleichstrombetriebes ist der Umstand, daß die elektromagnetische Auslösung der Notbremse bei Unterbrechung der Stromzufuhr nicht zuverlässig wirkt, indem der Antriebsmotor bei Überwiegen der talwärtsfahrenden Last als Generator arbeitet und die Wicklung des Auslösungsmagneten auch weiter speist. Dieser Übelstand besteht bei Drehstrom nicht, der Bremslüftmotor läßt seinen Anker immer los, wenn die Stromzufuhr ausbleibt.

Die Abb. 582 und 583 stellen Beispiele für Betriebs-schaltungen von Windwerkantrieben dar.

Die Fahrgeschwindigkeiten sind, da Seilbahnen zweckmäßigerweise mit Nebenschluß- und Induktionsmotoren betrieben werden, praktisch unveränderlich. Bei steilen und langen Bahnen findet man Fahrgeschwindigkeiten von 1,0 bis 1,5 m/sec, auf kürzeren oder weniger steilen Seilbahnen bis 3 m/sec, ausnahmsweise 4 m/sec. angewendet.

Die bei zahlreichen neuen Drahtseilbahnen gebräuchlichen Geschwindigkeiten lassen in Abhängigkeit von der größten Steigung eine gewisse, aus der Praxis hervorgegangene Gesetzmäßigkeit erkennen, die in einer hyperbelartigen Kurve dargestellt werden kann (Abb. 584). Diese Kurve gibt brauchbare Anhaltspunkte für die zweckmäßige Wahl der Fahrgeschwindigkeit für neue Entwürfe.

Die Seilscheiben laufen diesen Geschwindigkeiten entsprechend mit 6 bis 9 Umläufen/min. Die Antriebsmotoren werden aus Konstruktionsgründen für 750 bis 1500 Umläufe/min ausgelegt, zwischen Motor und Seilscheibe muß dementsprechend eine mehrfache Übersetzung eingeschaltet werden. Diese Übersetzung bietet unter einem Gelegenheit, in das Getriebe ein elastisches Zwischenglied einzulegen, um die Starrheit einerseits des Seiltriebes, andererseits des Motors mit Nebenschluß-eigenschaften zu mildern. Zu diesem Behufe ordnet man meist zwischen Motor

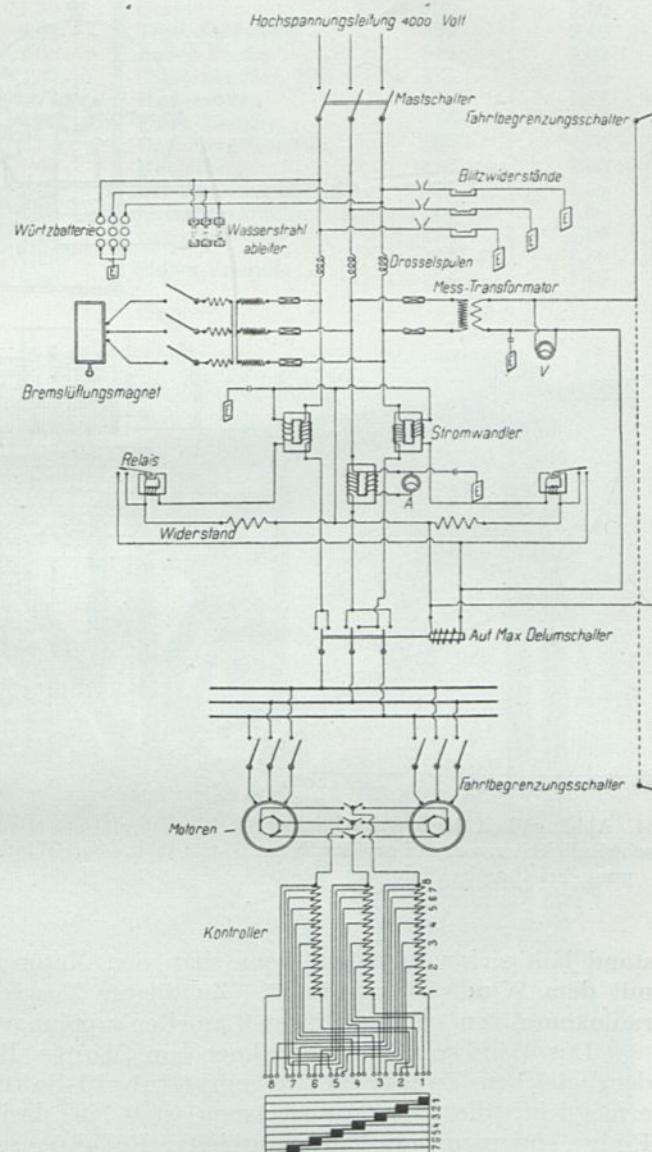


Abb. 583. Schaltbild der Antriebstation Schwandegg der Niesenbahn (Allioth).

und Windwerk Getriebe mit einem Riemenantrieb an. Dieser Betriebsart haftet unter den meistens obwaltenden Umständen das Übel an, daß für die Auslegung des Riementriebes ein verhältnismäßig großer Raum erforderlich ist. Dieser Übel-

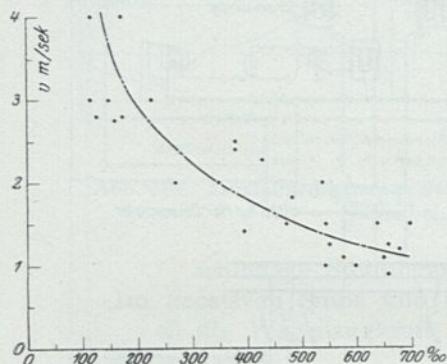


Abb. 584. Abhängigkeit der gebräuchlichen Fahrgeschwindigkeiten von der größten Neigung bei Standseilbahnen.

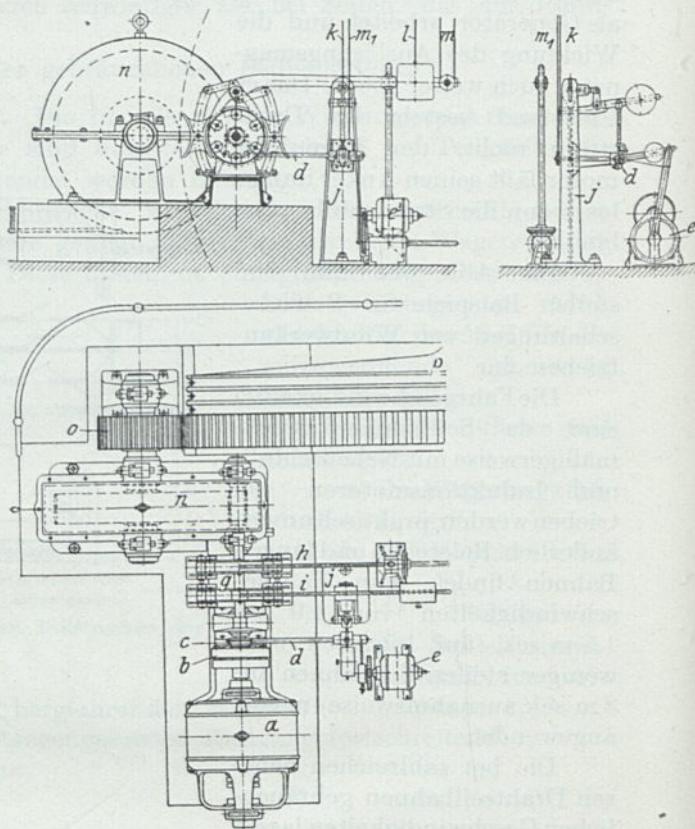


Abb. 585. Windwerk mit Reibungskupplung der Seilbahn Treib—Seelisberg.

stand lässt sich vermeiden, wenn man den Motor mittels einer Rutschkupplung mit dem Windwerk verbindet. Zu diesem Zweck eignen sich die auch bei Zahnraddlokomotiven gebräuchlichen Lamellenkupplungen.

Das Windwerk der Seilbahnen am Monte Bré und Åreskutan wurde zu dem gleichen Zwecke mit einem Globoid-Schneckengetriebe versehen; dieses ermöglicht, die Gesamtübersetzung statt in drei in zwei Stufen zu erreichen. Einige andere neuere Bahnen erhielten Reduktionsgetriebe (Seelisberg) (Abb. 585, 586).

Die Steuerung des Antriebsmotors erfordert eine der bei stabilen Motoren üblichen ähnliche Anordnung. Wesentlich ist jedoch die Schaltanordnung so zu treffen, daß die erlaubte Endstellung der Wagen, insbesondere in der oberen Station nicht überfahren werden kann. Man verbindet daher die Steuerschaltung mit einem durch den Wagen betätigten Überfahrhebel mit Anstoßschalter, welcher den Strom zeitgerecht unterbricht, wenn dies der Maschinist unterlassen haben sollte. Durch diese Anordnung wird auch erreicht, daß Strom nur nach erfolgtem Wechsel der Fahrtrichtung gegeben werden kann.

Fahrgeschwindigkeiten auf Drahtseilbahnen mit Motorbetrieb.

Anlage	Größte Steigung %/oo	Geschwindigkeit m/sec	Anlage	Größte Steigung %/oo	Geschwindigkeit m/sec
Bürgenstock	577	1,13	Gurten	350	2,00
Mendel	649	1,50	Grasse	228	3,00
Stanserhorn {	100—270	2,00	Treib-Seelisberg . . .	380	2,40
	400—600	1,00	Baden-Baden	540	2,00
Dolder	175	2,80	Cassarate-Mte. Bré . .	475	1,50
Lyon-Croix Rousse .	160	2,74	Hungerburg	555	1,27
Lyon-Croix Paquet .	172	4,00	Tátra-Tarajka	126	2,80
Galata-Pera	149	3,00	Engelberg-Gerschn .	580	1,20
Capucin-Mt. Dore .	545	1,00	Heidelberg	430	2,00
Capri	380	2,50	Les Avants-Sonloup .	545	1,50
Virgl-Bozen	700	1,50	Lausanne-Ouchy . . .	116	4,00
Tréport-Terrasse . . .	650	1,10	Lausanne-Gare	116	3,00
Niesen {	150—660	1,25	Siders-Vermala {	484	1,80
	344—660	0,90		396	1,40

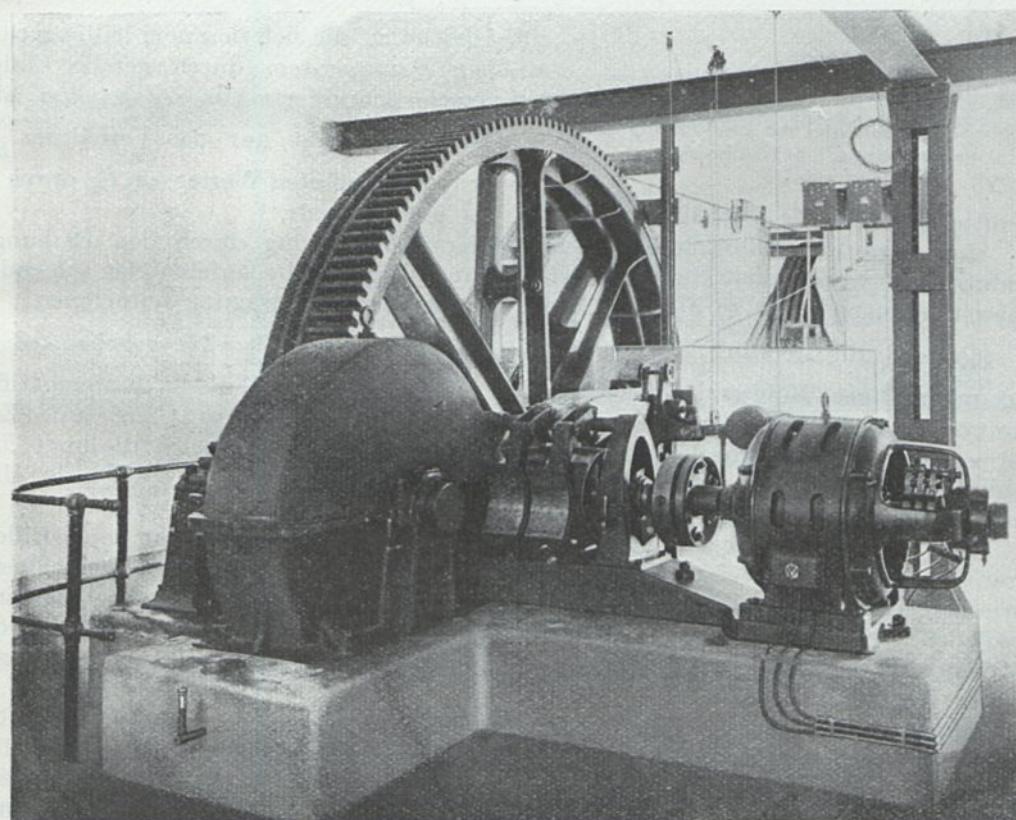


Abb. 586. Ansicht des Windwerkes der Drahtseilbahn Treib-Seelisberg.

19. Das Windwerk (Abb. 584 bis 587). Die Grundsätze, nach welchen der Hauptbestandteil des Windwerkes, die Seilscheibe, zu bemessen ist, sowie die zweckmäßigen Arten der Verbindung mit dem Antriebsmotor sind im Vorhergesagten bereits erwähnt. Innerhalb dieser Grenzen gibt es jedoch sehr viele, je nach den Umständen mehr oder weniger zweckmäßige Anordnungen des Windwerkes.

Zunächst ist die Anzahl der Seilumschlingungen festzulegen.

Zwischen den Seilspannungen im auf- und ablaufenden Trum besteht die aus der allgemeinen Maschinenlehre bekannte Beziehung:

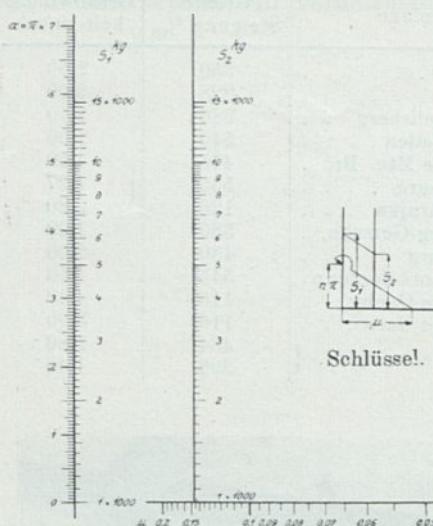


Abb. 587. Rechentafel zur Bestimmung der Seilumleitung bei Windwerken.

ermitteln, leistet die Verhältnistafel Abb. 587 gute Dienste.

Aus dem logarithmischen Gesetz der Kraftübertragung durch den Reibungsschluß folgt jedoch, daß bei mehrfacher Umschlingung die aufeinander folgenden Umschlingungen nicht in gleicher Weise an der Kraftübertragung teilnehmen.

Ist z. B. die Reibung groß, etwa $\mu = 0,3$ und ist $n = \frac{S_1}{S_2} = 2,5$, gegeben, so ist ein mehrrilliges Windwerk zwecklos, denn bei Ausnutzung dieser Reibungsziffer nimmt schon die erste Umschlingung $\alpha = \pi$ die Umfangskraft zur Gänze auf. Erst bei $\mu = 0,1$ tritt ein Ausgleich einigermaßen auf, indem für $\alpha = 3\pi$ die erste Umschlingung 46,0%, die zweite 30,7% und die letzte die restlichen 23,3% der Umfangskraft aufnimmt.

Die Vermehrung der Kimmenzahl bzw. der Umschlingungen — denn je ein Rillenkranz entspricht $\alpha = \pi$ bis $\frac{5}{8}\pi$ — erhöht zwar die Sicherheit des Reibungsschlusses zwischen Treibrad des Windwerkes und dem Zugseil, doch hat die starke Ungleichmäßigkeit der Seilspannungen längs der mehrfachen Umschlingungen im Sinne der Zunahme der Umfangskraft zunehmende Seildehnungen und damit Schläpfungen in der Kimme zur Folge.

Durch das Gleiten des Seiles in der Kimme wird an sich die Sicherheit des Reibungsschlusses verringert. Weiter tritt bei den meist gebräuchlichen drei Rillen in den beiden äußeren Rillen eine gegenüber der mittleren Rille erhöhte Abnutzung ein. Die Folge ist eine Verringerung der betreffenden Scheibendurchmesser und eine weitere Steigerung des Übels.

Mit Holz oder Chromleder gefütterte Radkränze neigen zu diesem Übel mehr als eiserne Kimmen wegen der größeren Reibungsziffer, andererseits ist hier Abhilfe durch Erneuerung des Belags eher möglich.

Diese Überlegung setzt voraus, daß die geometrischen und physikalischen Bedingungen des Reibungsschlusses zusammentreffen, d. h. die vorgesehene Umschlingung dem jeweils vorhandenen Reibungszustand entspricht. Diese Annahme ist im allgemeinen unzutreffend, indem die Reibungsziffer starken Veränderungen unterworfen ist. Wird μ kleiner als sich aus der Grundgleichung für die Seilzüge er-

$$S_1 = S_2 e^{\mu \alpha},$$

hieraus

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{S_1}{S_2} \right) = \frac{1}{\mu} (\ln S_1 - \ln S_2).$$

Hier bezeichnet

$$\alpha = \frac{2\pi\alpha^0}{360^\circ} \text{ den Zentriwinkel im Bogenmaß,}$$

S_2 und S_1 die Seilspannungen und
 μ die Reibungsziffer.

Setzt man $S_1 = nS_2$, wird

$$\alpha = \frac{\ln n}{\mu}$$

eine Gleichung, die sich in einem halblogarithmischem Bezugssystem durch gerade Linien für verschiedene Werte von μ darstellen läßt.

Will man nicht nur das Verhältnis $\frac{S_1}{S_2}$,

sondern die absoluten Werte von S_2 durch S_1

gibt, hört die Kraftübertragung zwischen Seil und Scheibe auf; ist μ größer als der der Rechnung zugrunde gelegte Wert, nützt der Reibungsschlüssel nur einen Teil der vorhandenen Umschlingung aus, wodurch die dem logarithmischen Gesetz entsprechende Ungleichmäßigkeit des Kraftgefälles längs der Seilscheibe noch weiter gesteigert wird.

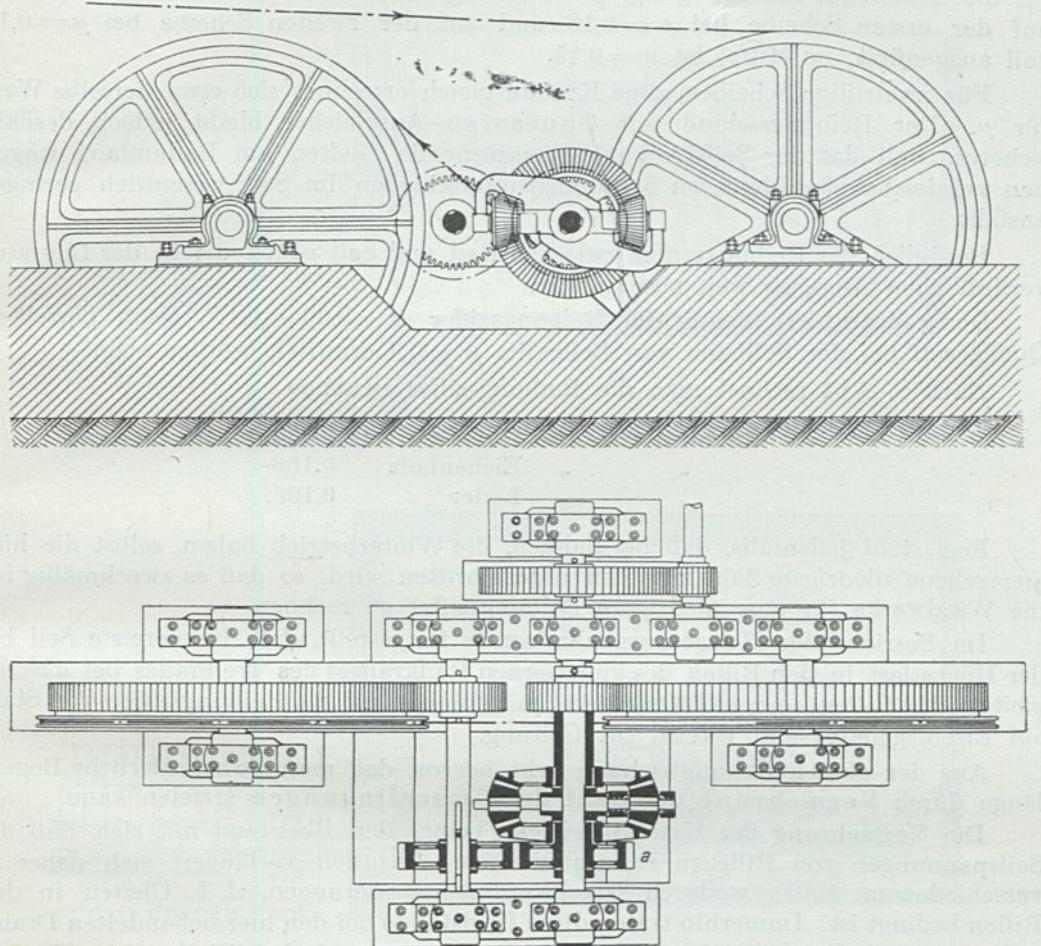


Abb. 588. Anordnung des Spannungsausgleiches Patent Ohnesorge in einem Windwerk.

Die Ungleichmäßigkeit der Lastverteilung kann durch ein Ausgleichsgetriebe Patent Ohnesorge (Abb. 588) wesentlich gemildert werden. Ohnesorge ordnet zwischen je zwei Radkränze ein den Kraftausgleich bewirkendes Planeten-(Differential-)Getriebe an, wodurch das logarithmische Gesetz des Reibungsschlusses in dem Sinne gestört wird, daß die treibenden Radkränze, wenn z. B. deren zwei vorhanden sind, gezwungen werden, dauernd gleiche Drehmomente zu übernehmen. Das Gefälle der Umfangskraft wird auf zwei gleiche Teile geteilt. Das frühere Beispiel $\frac{S_2}{S_1}$ vor Augen haltend, treten folgende Verhältnisse ein.

$$n' = \frac{\frac{S_2 - S_1}{2}}{S_2} = 1,75$$

für die im Sinne des Antriebes ablaufende und

$$n'' = \frac{S_1}{S_2 - \frac{S_2 - S_1}{2}} = 1,43$$

für die ablaufende Umschlingung. Der Reibungsschlüß ist bei diesem Kraftverhältnis auf der ersten Scheibe bei $\mu = 0,18$ und auf der zweiten Scheibe bei $\mu = 0,12$ voll ausgenützt; im Mittel ist $\mu = 0,15$.

Für zweirillige Scheiben ohne Kraftausgleich errechnet sich etwa derselbe Wert für μ . Der Reibungsschlüß mit Ohnesorge-Ausgleicher bleibt jedoch deshalb sicherer, weil das der Seilstreckung entsprechende Gleiten am Radumfang wegen den vergleichsweise kleineren Spannungsunterschieden im Seil wesentlich geringer ausfällt.

Bezüglich der Reibungsziffer zwischen Rad und Seil gehen die in der Literatur vorfindlichen Angaben weit auseinander.

Levy Lambert nennt die Reibungsziffer $\mu = 0,06 - 0,1$. Nach derselben Quelle soll bei der Seilbahn von Belleville $\mu = 0,3$ ermittelt worden sein.

Nach S. Abt rechnet man die Reibungsziffer zwischen

Stahldrahtseil und Gußeisen	$\mu = 0,129$
" " Eichenholz	0,158
" " Leder	0,163.

Fest steht jedenfalls, daß bei Bahnen, die Winterbetrieb haben, selbst die hier angegebene niedrigste Zahl zuweilen unterschritten wird, so daß es zweckmäßig ist, die Windwerke für eine niedrigere Reibungsziffer zu rechnen.

Im Betriebe der Hungerburgbahn wurde festgestellt, daß das vereiste Seil bei der Höchstlast in den Rillen des gußeisernen Radkranzes des Treibrades bei $\mu = 0,1$ gleitet; die Rillen sind nicht gefüttert, es kommt somit die Reibungsziffer von Stahl auf Eisen, gefettet und vereist, zur Geltung.

Aus der obigen Grundgleichung geht hervor, daß man die erforderliche Bogenlänge durch Vermehrung der Zahl der Umschlingungen erzielen kann.

Die Vermehrung der Umschlingungen bringt den Übelstand mit sich, daß die Seilspannungen von Rille zu Rille abnehmen. Das Seil verlängert sich daher in verschiedenem Maße, wodurch Geschwindigkeitsänderungen, d. h. Gleiten in den Rillen bedingt ist. Immerhin traten diese Übelstände bei den hier behandelten Drahtseilbahnen mit Pendelbetrieb nicht so in Erscheinung, wie bei Windwerken für Seilförderung mit kontinuierlichem Betrieb. Bei letzterem verursachte diese Sachlage in den aufeinander folgenden Rillen mit der Seilspannung abnehmende Abnutzungen, die die Nachteile dieser Erscheinungen noch weiter steigern.

Verschiedene Firmen bauen auf Grund dieser Erwägungen einrillige, verhältnismäßig große Seilscheiben und treiben auch die Umlenkrolle an.

Durch diese Anordnung wird der Vorteil erzielt, daß das Seil nur einmal nach der anderen Richtung gebogen werden muß, im Gegensatz zu den meisten mehrrilligen Anordnungen, bei welchen das Seil nach jeder Umleitung in die andere Richtung gebogen werden muß.

Trotz dieses Vorteiles dieser Anordnung wird sie namentlich für steile Drahtseilbahnen unanwendbar bleiben, weil der erforderliche Raum für die Unterbringung dieser Seilscheiben meist fehlt, oder sehr hohe Baukosten verursacht. Nach diesem Grundsatz ist bisher nur das Windwerk der Seilbahn Les Avants-Sonloup gebaut worden (Abb. 589).

Die einfachste und weitverbreitetste Anordnung sieht für das Windwerk eine mehrrillige (2 bis 4) Seilscheibe und eine ebenso gebaute Umlenkrolle vor. Beide sind in der Berührenden der Bahnneigung angeordnet (Mendelbahn, Niesenbahn (Abb. 590), Brébahn, Siders—Vermala).

Die Seilscheibe trägt zugleich die Verzahnung mit einer Übersetzung von etwa 1:5 bis 8.

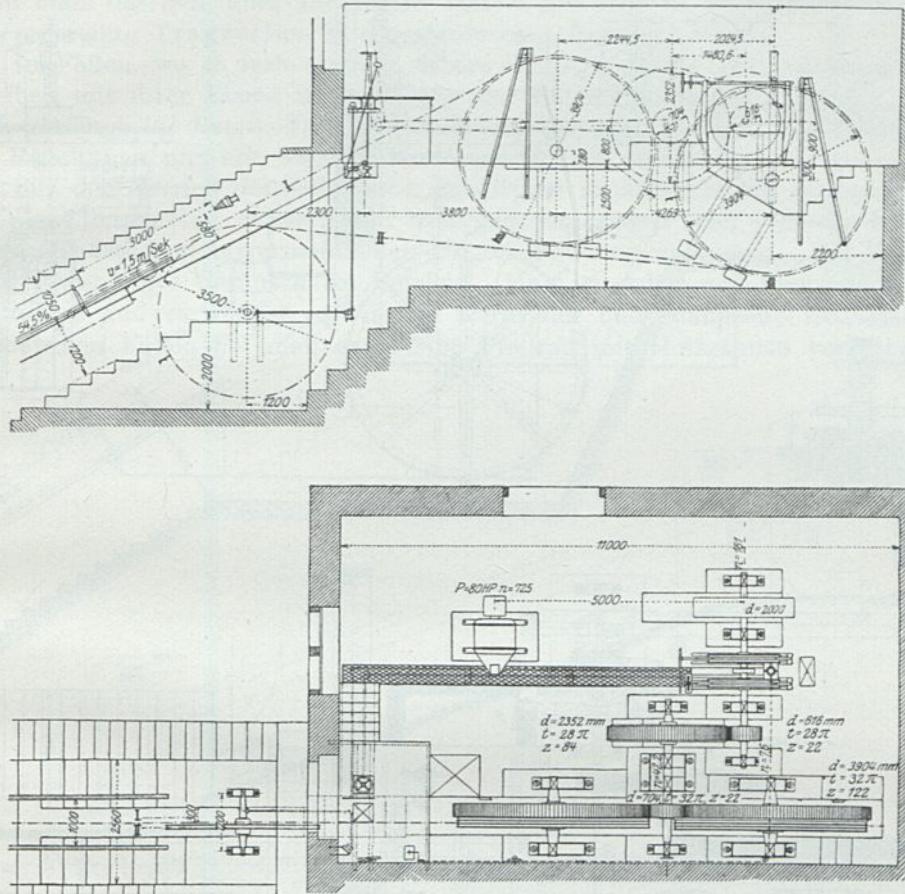


Abb. 589. Windwerk der Seilbahn Les Avants-Sonloup mit zwei angetriebenen Seilscheiben, Seilkreuzung vermieden.

Die zweite Übersetzung wird in verschiedener Weise bewirkt.

Für die meisten schweizerischen Ausführungen ist kennzeichnend, daß die vom Motor angetriebene Vorgelegewelle zugleich zwei Bremsscheiben trägt; auf die eine wirkt die Handbremse, auf die andere die selbsttätige Bremse, die in Wirksamkeit tritt, wenn

- ein Wagen die Endstation überfährt,
die zulässige Geschwindigkeit überschritten wird, oder
der Strom ausbleibt.

Die selbsttätige Bremse kann auch vom Führer ausgelöst werden (Pedalauslösung).

Durch die Anordnung der Bremse auf einer verhältnismäßig schnellaufenden Scheibe erzielt man sanfte, fein abstuifbare Bremswirkungen; man muß dagegen den Nachteil in den Kauf nehmen, daß die beiden Übersetzungen mit Rücksicht

auf die größten, nur beim Bremsen zu gewärtigenden Beanspruchungen gebaut werden müssen.

Zur Vermeidung dieses Nachteiles trägt z. B. die Seilscheibe des Windwerkes der Hungerburgbahn unter einem die von der selbsttätigen Bremse betätigten

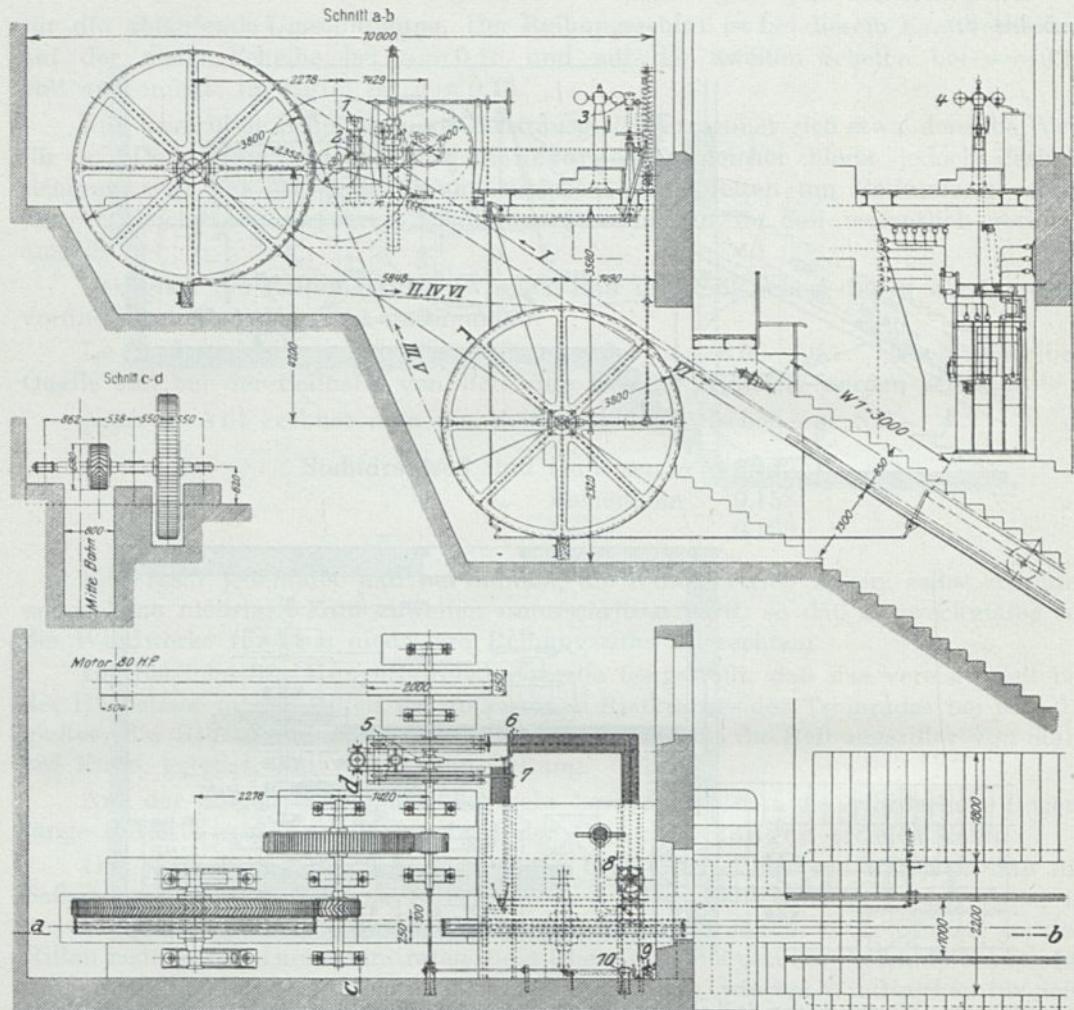


Abb. 590. Windwerk der Niesenbahn. Eine Seilscheibe, eine Umlenkrolle, Seilkreuzung in jedem Trum, Bremsen am ersten Zwischenvorgelege, Riemenantrieb. (Rollsche E.W., Bern).

Bremsscheibe. Zur Milderung der Bremswirkung wird die Raschheit der Auslösung durch einen Oldämpfer gehemmt. Die Handbremse wirkt auf eine auf der ersten Vorgelegewelle sitzenden Seilscheibe.

Diese Windwerkanordnungen kranken an dem Übelstand, daß das Drahtseil entsprechend der Anzahl der Rillen über die Umlaufscheibe gekreuzt geführt werden muß, wodurch ebenso viele Richtungswechsel in der Seilführung nötig sind.

Sieht man für das auf und ab laufende Seil getrennte Gegenscheiben vor, wird nur mehr ein Richtungswechsel des Seiles nötig, ohne daß das Windwerk einen größeren Raumbedarf verursachen würde.

Will man an die durch die Berührende der Bahnneigung gegebene Richtung nicht gebunden sein, was insbesondere dann von Wichtigkeit ist, wenn man das

Aufnahmegebäude am oberen Bahnende für andere Zwecke benötigt, kann man sich durch Anordnung von besonderen Umlenkrollen für das auf- und ablaufende Seil helfen eine Anordnung, die oft verwendet wird und auch nur einen einmaligen Richtungswechsel der Seilbiegung bedingt (Seilbahnen: Seelisberg, Neuchâtel—Chaumont, Heidelberg, Königsstuhl u. a.).

Der große Raumbedarf von besonderen Umlenkrollen kann vermieden werden, wenn man das Seil über im Bogen von $R \geq 8$ bis 10 m angeordnete dicht aneinander gereihte Tragrollen in die gewünschte Richtung lenkt.

In Fällen, wo es insbesondere in der Tiefe an Raum fehlt, können die Seilscheiben mit ihrer Ebene in die Ebene der Bahnneigung gelegt werden. Der Antrieb verlangt in diesem Fall eine Kegelradübersetzung, weil die Elektromotoren der Regeltypen nur mit wagerechter Achse gebaut werden.

Für den Antrieb der Seilscheibe sind früher stets Pfeilräder verwendet worden, die nicht bearbeitet, sondern nur roh gegossen waren und auch die bei derartig großen Gußstücken unvermeidlichen Ungenauigkeiten aufwiesen. Die Folge dieser Mängel war arges Geräusch im Betriebe. Man ist daher von Pfeilrädern ganz abgekommen und verwendet vorwiegend Stirnräder und gekapselte Reduktionstrieb. In manchen Fällen hat man das kleine Pfeilrad mit Holzzähnen versehen.

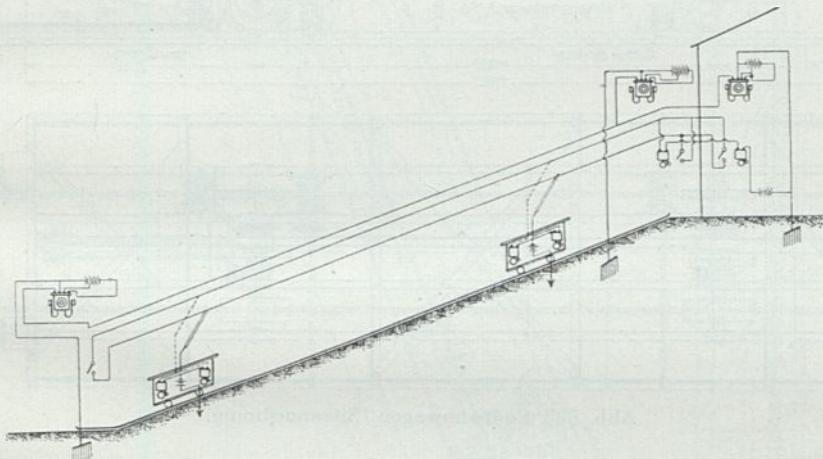


Abb. 591. Schaltung der Signalanlage der Hungerburgbahn, Innsbruck (A.E.G.U.).

20. Signaleinrichtungen. Zum Unterschied von allen anderen Bahnarten wird bei Seilbahnen des betrachteten Systems die Fahrt nicht vom Fahrzeug geregelt, sondern von einem festen Standort meist am oberen Bahnende. Neuerdings werden auch Seilbahnen mit Steuerung des Antriebes von einem Wagen aus eingerichtet. Insofern der Maschinist von seinem Standort die Strecke übersehen kann, also bei kurzen Seilbahnen in gerader Linie, ist ein besonderes Verständigungsmittel entbehrlich. Man begnügt sich in solchen Fällen mit akustischen Signalen. Bei längeren unsichtigen Strecken müssen elektrische Signaleinrichtungen vorgesehen werden, die den Schaffner eines jeden Wagens instandsetzen, sich jederzeit mit dem Maschinenführer zu verständigen.

In der Abb. 591 ist der Schaltplan einer derartigen Einrichtung dargestellt, wobei es von Wichtigkeit ist, daß sich auch auf jedem Wagen eine Batterie befindet, so daß das Ansprechen der Signalglocken von der Wagenstellung unabhängig ist. Die beiden Signalleitungen, die Geber- und Empfängerleitung, sind längs der Bahnachse geführt und können vom Schaffner mittelst eines Kontaktstabes erreicht werden. Sobald er das in Betracht kommende Signal gegeben hat, wofür ihm das

Ertönen der Glocke am eigenen Fahrzeug eine Kontrolle bildet, hängt er den Kontaktstab auf die zweite, die Empfängerleitung, durch die er die Signale vom Maschinenführer erhält. In derselben Weise wird bei neueren Bahnen meist auch eine telephonische Verbindung hergestellt.

21. Fahrzeuge (Abb. 592, 593). Die Wagen für Drahtseilbahnen müssen, sofern es sich um ausgesprochene Steilbahnen handelt, den hohen Beanspruchungen, die beim Bremsen im Falle eines Seilbruches auftreten, Rechnung tragen. Die Bedeutung des

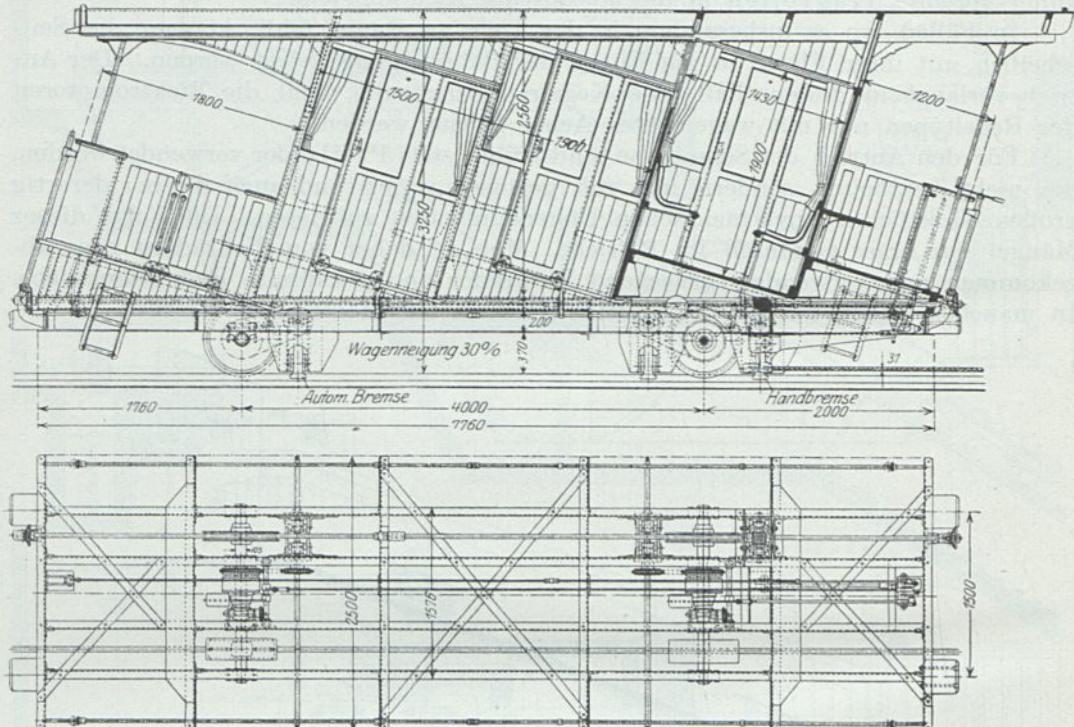


Abb. 592. Seilbahnwagen, Sitzanordnung.

Kippmomentes tritt bei Motorbahnen, die meist mit Keilkopfschienen und Zangenbremsen ausgeführt sind, gegenüber Wasserballastbahnen mit Zahnradbremse zurück, doch verlangen die großen und zufolge der einseitigen Radführung einseitig wirkenden Bremskräfte sehr kräftig gebaute Untergestelle. Diese Anforderung lässt sich nur bei Anordnungen mit verhältnismäßig kleinen Raddurchmessern und Vermeidung einer Achsfederung erzielen. Neuzeitliche Wagen erhalten meistens Raddurchmesser von etwa 600 mm.

Bei der Schweizer Type sind meist drei Zangenbremsen, die möglichst nahe an die Laufräder herangerückt angeordnet werden, vorgesehen (Abb. 592, 593).

Eine Zange wird von Hand betätigt und dient in der Hauptsache zum Festhalten des stillstehenden Wagens im Bedarfsfalle.

Die Wirkungsweise der bei Seilbruch selbsttätig wirkenden, knapp oberhalb der beiden Laufräder angeordneten Bremsen ist die folgende:

Das Zugseil ist mittelst konischen Vergußkopfes im Seilhebel am oberen Wagenende gefaßt und drückt im gespannten Zustande das andere Hebelende gegen eine Klinke, die mittelst Wellen in Verbindung mit den das Einrücken der selbsttätigen Bremsen besorgenden Gewichtshebeln steht. Verschwindet infolge Seilbruch oder Abspannen des Seiles der Druck auf diese Klinke, so können die sonst infolge des

Druckes in ihrer Lage festgehaltenen Gewichtshebel fallen, wobei sie mittelst eines konischen Triebes die auf den beiden Laufachsen gelagerten Klauenkupplungen ein-

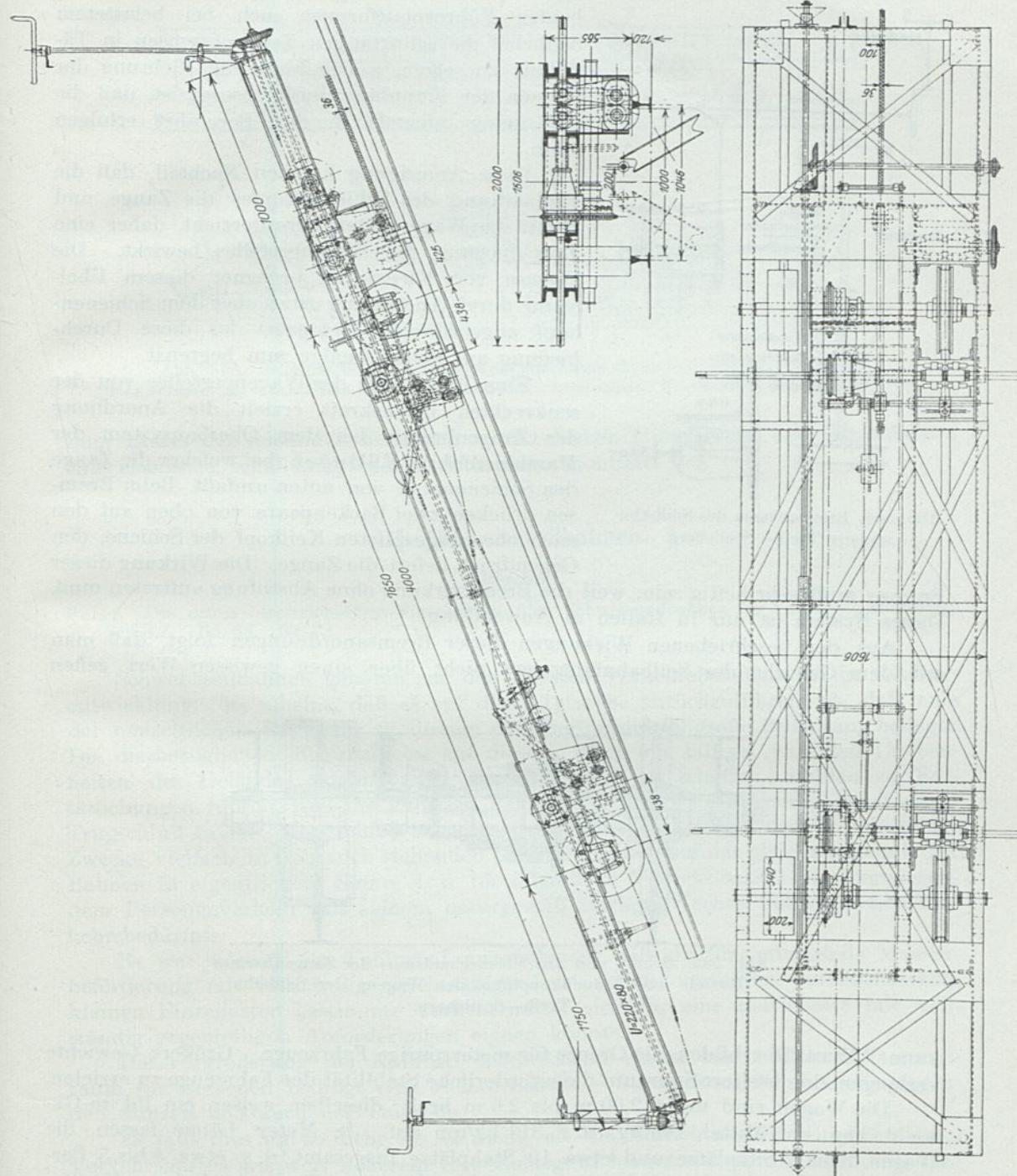


Abb. 593. Untergestell des Wagens der Niesenbahn (Gießerei Bern).

rücken. Von diesen betätigt je ein Kettentrieb auf der Achse die Bremsspindele mit Doppelmutter der beiden Zangenbremsen. Die Zangen werden dabei gegen den konischen Schienenkopf gepreßt. Zwischen Gewichtshebelauslösung und Ketten-

trieb ist je eine Reibungskupplung eingeschaltet, die auf ein bestimmtes Drehmoment eingestellt wird um eine unzulässige Beanspruchung der Bremsorgane zu vermeiden.

Ein besonderes Gestänge ermöglicht, jederzeit von beiden Führerplattformen auch bei belastetem Seilhebel die selbsttätigen Zangenbremsen in Tätigkeit zu setzen, wobei durch die Richtung der Klauen der Kupplung dafür gesorgt ist, daß die Betätigung niemals in der Bergfahrt erfolgen kann.

Diese Anordnung hat den Nachteil, daß die Keilwirkung des Schienenkopfes die Zange und damit das Wagengestell herunterzieht, daher eine Durchbiegung des Wagengestelles bewirkt. Die Bremse von Ruprecht begegnet diesem Übelstand durch Anordnung eines ober dem Schienenkopf angeordneten Stempels, der diese Durchbiegung auf einige wenige mm begrenzt.

Eine Entlastung des Wagengestelles von der senkrechten Bremskraft erzielt die Anordnung der Zangenbremse bei dem Oberbausystem der Maschinenfabrik Eßlingen, bei welcher die Zange den Schienenkopf von unten umfaßt. Beim Bremsen drücken zwei Backenpaare von oben auf den nach oben zugespitzten Keilkopf der Schiene, den Gegendruck liefert die Zange. Die Wirkung dieser

Abb. 594. Bremsschema des Seilbahnwagens Treib—Seelisberg.

Bremse muß sehr heftig sein, weil die Bremswirkung ohne Abstufung auftreten muß. Dieses System ist nur in Italien in Anwendung.

Aus den beschriebenen Wirkungen dieser Bremsanordnungen folgt, daß man mit dem Gewicht der Seilbahnfahrzeuge nicht über einen gewissen Wert gehen

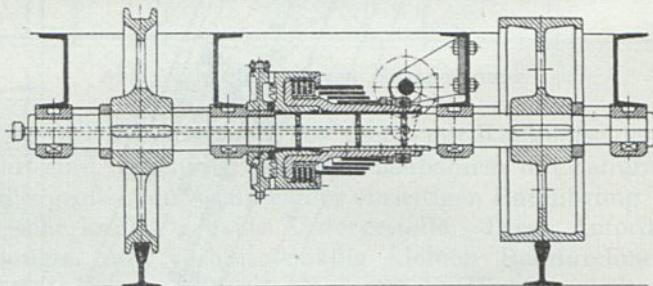


Abb. 595. Schalt- und Antriebsmechanismus der Zangenbremse (Rutsch- und Klauenkupplung) des Wagens der Seilbahn Treib—Seelisberg.

kann. Etwa 16 t bilden die Grenze für meterspurige Fahrzeuge. Größere Gewichte verlangen eine breitere Spur, um die erforderliche Stabilität der Fahrzeuge zu erzielen.

Die Wagen sind meist 2,00 m bis 2,6 m breit; dieselben weisen ein lfd. m-Gewicht von im Mittel 785 kg, d. s. 314 kg/qm auf. Je Meter Länge fassen die Wagen 7 bis 8 Sitzplätze und etwa 10 Stehplätze insgesamt, d. s. etwa 4 bis 5 Personen je qm. Die Wagenbeleuchtung erfolgt von einer längs der Bahn geführten Stromleitung oder von Wagenbatterien aus.

Der Wagenkasten wird entsprechend der mittleren Bahnneigung mit abgestuften Abteilen von etwa 1,5 bis 1,7 m Länge und quer angeordneten Bankreihen

gebaut. Auf möglichst leichte Ausführung wird aus naheliegenden Gründen Wert gelegt. Die Wagen der Åreskutanbahn besitzen Plattformeingänge und Mittelgang.

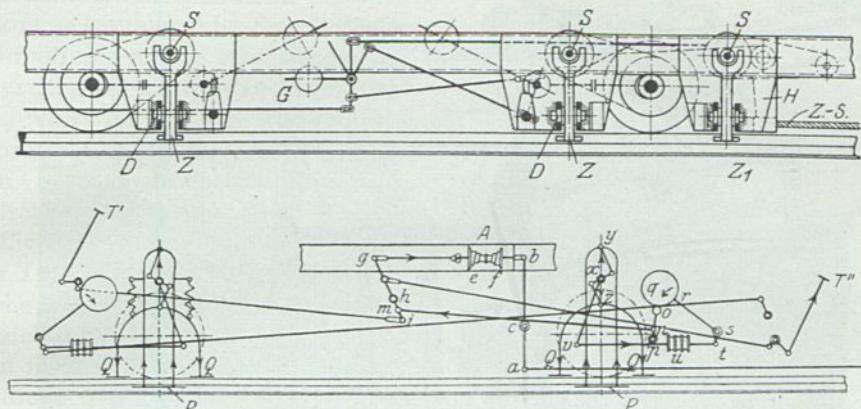


Abb. 596. Seilbahn-Wagen-Untergestell mit Zangenbremsen, Bauart Eßlingen.
Z—S = Zugseil; Z₁ = Handbremse; Z = autom. Bremse; S = Bremsspindel; H = Seilhebel; G = Auslösegewicht.

Zum Ersatz der fehlenden Federung wird zwischen Untergestell und Wagenkasten eine elastische, schalldämpfende Zwischenlage montiert.

III. Schwebeseilbahnen.

Literatur:

Peter. Die neuen österreichischen Vorschriften über Schwebeseilbahnen für Personenbeförderung. Sch.B.Z. Bd. 68. Nr. 22.

Schwebeseilbahnen gehören zu den ältesten Verkehrsbehelfen in der Kulturrentwicklung. Es scheint, daß es auf diese Tatsache zurückzuführen ist, daß man der neuzeitlichen Rückkehr zu diesem Beförderungsmittel große Bedeutung beilegte. Die diesbezüglichen Erwartungen auf diesem Wege ein billiges von den Unebenheiten des Geländes unabhängiges Verkehrsmittel zu schaffen, mußten zu Enttäuschungen führen, weil die günstige Beurteilung dieses Verkehrsmittels auf einem Trugschluß fußte. Man schloß aus den wirtschaftlichen Erfolgen der für industrielle Zwecke vielfach in Gebrauch stehenden Drahtseilbahnen auf das gleiche Ergebnis für Bahnen in eigentlichem Sinne, d. h. für öffentliche Verkehrsmittel mit überwiegendem Personenverkehr mit seinem naturgemäß starkem Wechsel unterworfenen Verkehrsbedürfnis.

Es war vorweg ein Fehlurteil anzunehmen, daß ein für industrielle Massenbeförderung mit vollständig gleichmäßiger Leistung und verteilten, verhältnismäßig kleinen Einzellasten bestimmte Verkehrsmittel sich für eine Betriebsart mit vollständig gegenteiligen Anforderungen eignen könnte.

Die Vergrößerung der Kabinen entsprechend einem angemessenen Fassungsraum für Personen bedingt eine außerordentliche Verteuerung der die Seile tragenden Stützen und auch der Tragseile.

Es fällt dies um so mehr ins Gewicht, als die Einrichtung für ein öffentliches Verkehrsmittel mit weit höherem Sicherheitsgrad hergestellt werden muß, als dies für eine Kohlen- oder Holztransportbahn der Fall ist. Der hierauf zurückzuführende Materialaufwand ist ganz gewaltig und führt dazu, daß zum Unterschied von Industrieseilbahnen, die je nach dem System mit 1 bis 2 Seilen das Auslagen finden, die ausgeführten Drahtseilbahnen bis zu vier Seile je Fahrbahn erhalten müssen.

Die Schwebebahn auf den Kohlererberg (Bozen) weist zwei Zug- und zwei Tragseile auf (Abb. 597). Bei der Lana—Vigiljoch-Bahn (Abb. 598, 599, 600) sind



Abb. 597. Stütze mit Fahrzeug der Schwebeseilbahn Bozen—Kohlern (Bleichert).

vorhanden: ein Tragseil, ein Bremsseil, ein Zugseil und ein Führungsseil, um das Pendeln der Wagen zu verhindern.

Durch diese Aufwendungen für die durchaus hochwertigen Baustoffe der Seile und Stützen sind die Voraussetzungen des Schwebebahnsystems, daß nämlich der kostspielige Unter- und Oberbau erspart wird, vereitelt, indem die Stützpunkte oft ganz bedeutende Fundamente benötigen und die Tragwerke und das Seil unter Umständen nicht weniger wiegen als der für eine Standseilbahn erforderliche Oberbau.

Diese Sachlage beschränkt die vernünftige Verwendung der Schwebeseilbahnen auf diejenigen ihrem Ursprung entsprechenden Fälle, wo es keine andere praktische Möglichkeit gibt, ein anderes Verkehrsmittel vorzusehen, z. B. die Überspannung von Schluchten, Meerengen (Abb. 601, 602), Erklimmung von Höhen über ver-

gletschertes oder sonstwie gefährdetes Gelände, insbesondere wenn Steigungen von mehr als 85 % zu überwinden sind.

Der ohne Zwischenstützen erstellte Bergaufzug Grindelwald—Enge weist zwei Fahrbahnen mit je zwei Tragseilen und zwei Zugseilen auf. Die hier verwendete, von Ruprecht konstruierte Seilbremse hat mehrfach Nachahmung gefunden. Die beabsichtigte Erhaltung der statischen Höhenlage einer Kabine in beliebiger Fahrstellung bei Bruch eines der Tragseile wird durch die Feldmannsche Spanngewichtsanordnung nicht erzielt.

Vom Betriebsstandpunkt sind diese Bahnen durch geringe Leistung und hohe Erhaltungskosten gekennzeichnet.

Die geringe Leistung ist bedingt durch das beschränkte Fassungsvermögen der zur Aufnahme der Personen dienenden Kabinen; im Höchstfall 16 Personen gegen bis 150 Personen für einen Standseilbahnwagen. Es kann auch die Fahrgeschwindigkeit gegenüber derjenigen von Standseilbahnen nicht gesteigert werden.

Die hohen Erhaltungskosten sind durch die außerordentlich empfindlichen und stark beanspruchten Bestandteile der Laufwerke der Wagen, dauernde Schmierung

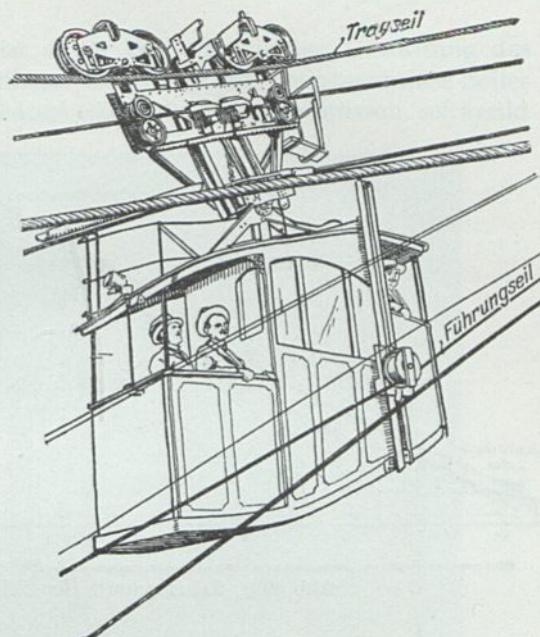


Abb. 598. Fahrzeug der Schwebeseilbahn Lana—Vigiljoch. Fassungsraum 16 Personen.

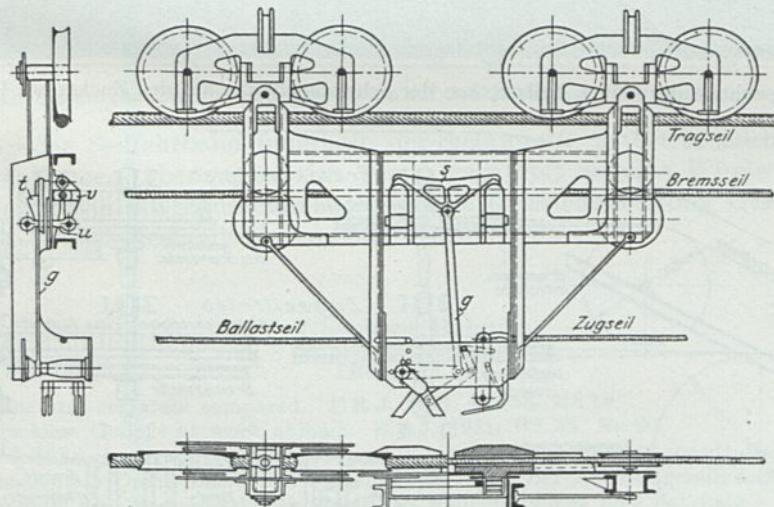


Abb. 599. Laufwerk eines Wagens für die Schwebebahn Lana—Vigiljoch.

der Seile und dadurch bedingt, daß namentlich die Tragseile bei einer einzigen schadhaften Stelle in ihrer ganzen Länge ausgewechselt werden müssen. Spleißstellen sind unzulässig. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied gegenüber einem aus einzelnen Stücken zusammengesetzten Schienenoberbau.

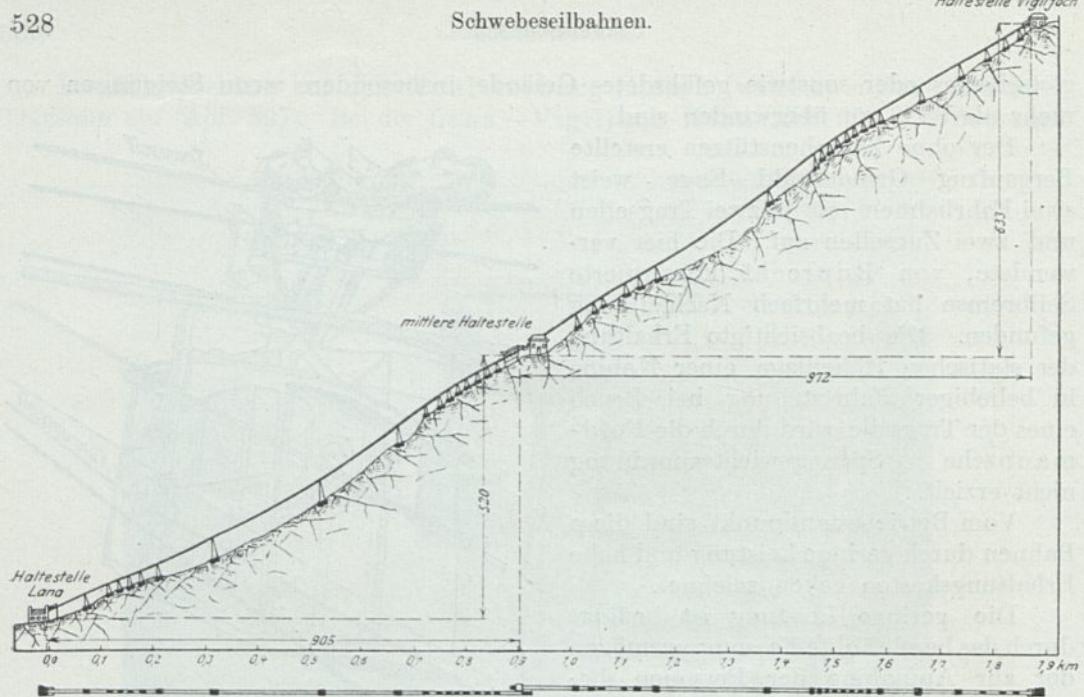


Abb. 600. Längsschnitt der Schwebeseilbahn Lana—Vigiljoch.

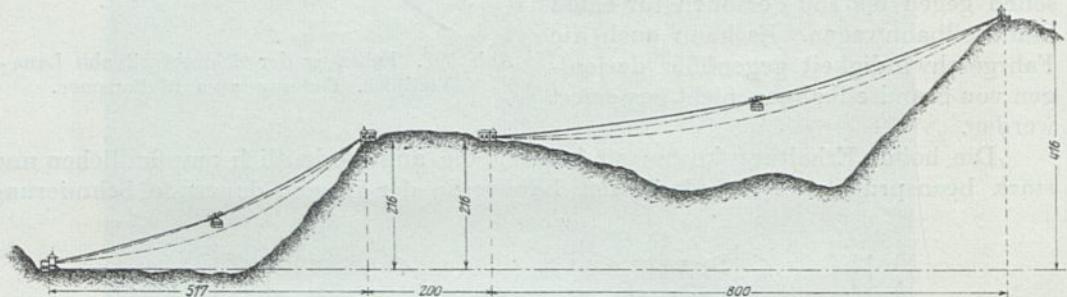


Abb. 601. Längsschnitt der beiden Teilstrecken der Schwebeseilbahn auf den Zuckerhut, Rio de Janeiro.

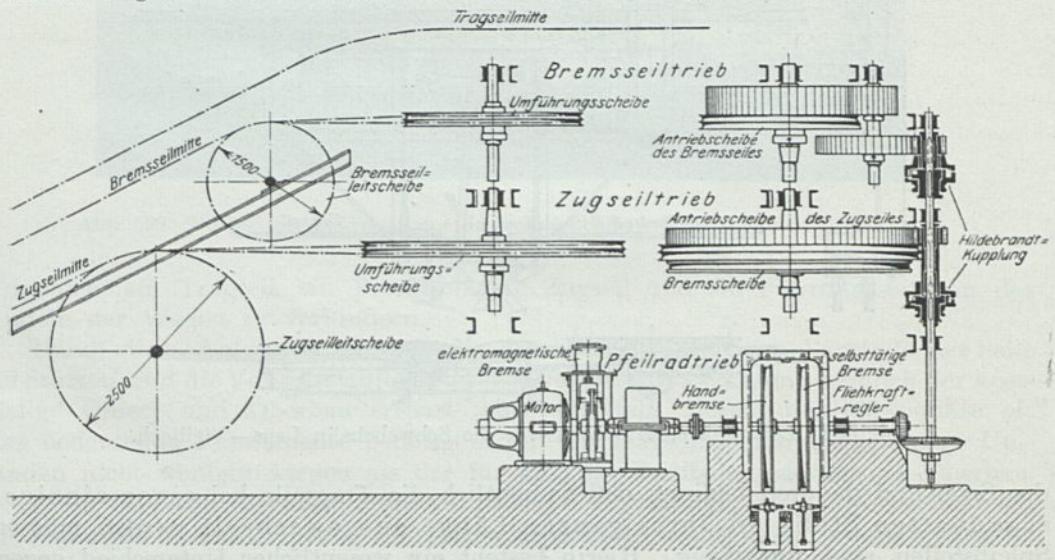


Abb. 603. Windwerk der Seilschwebebahn Lana—Vigiljoch (Ceretti Tanfani-A.E.G.U.).

Alle Schwebeseilbahnen sind für doppelten Pendelverkehr eingerichtet. Der Kraftverbrauch entspricht daher der Differenz der auf beide Fahrzeuge wirkenden Zugkräfte.

Für den Verlauf der Zugkraftkurve ist außer der allgemeinen Gestaltung des Geländes zwischen den einzelnen Stützpunkten die Kurve des freigespannten Seiles maßgebend. Nachdem beträchtliche Durchhänge zugelassen werden müssen, schwankt

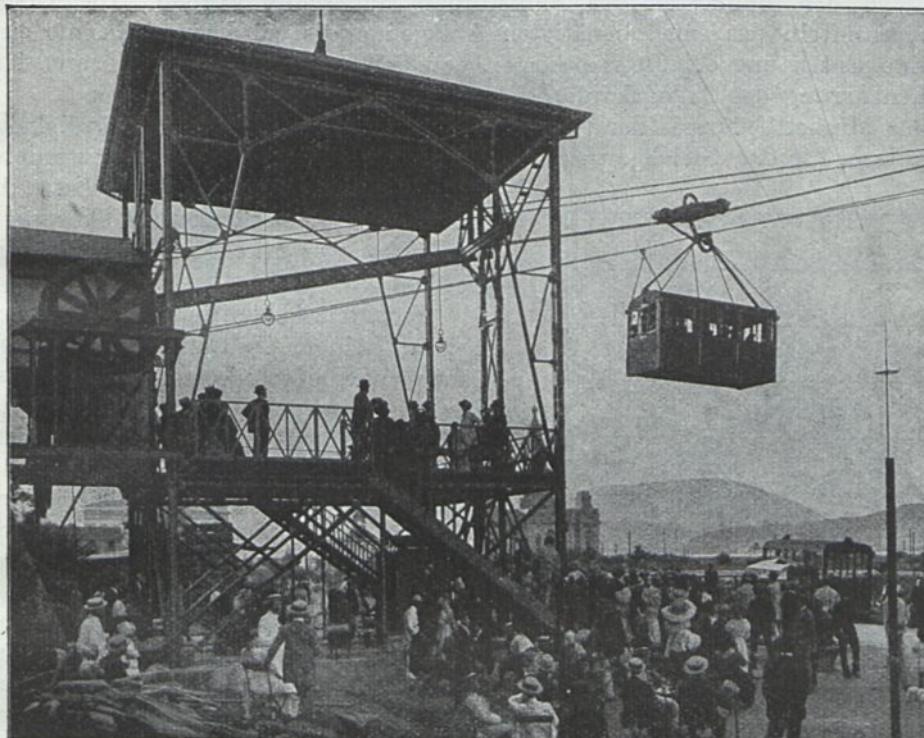


Abb. 602. Untere Station der Schwebeseilbahn auf den Zuckerhut, Rio de Janeiro (Pohlig).

die Steigung der Seilfahrbahn innerhalb der Spannweite in beträchtlichen Grenzen. Diese Schwankungen übertragen sich wenig gedämpft auf das Windwerk. Es ist hier noch mehr wie bei Standseilbahnen für die Zwischenschaltung elastischer oder nachgiebiger Getriebebestandteile zu sorgen (Abb. 603).

IV. Gleislose Bahnen.

Literatur:

- Andrews. Bus and car costs compared. E.R.J. 1921. Bd. 58. Nr. 18.
- Jackson. Trackless trolleys at work abroad. E.R.J. 1921. Bd. 58. Nr. 20.
- Kennelly and Schurig. Tractive resistances on different roads at different speeds. Proc. 1918. H. 6.
- Kurzel. Schienenlose Drehstrombahnen System Kurz. Verl. der Autramgesellschaft. Wien. 1921.
- Oetling. Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen Radbereifungen und Fahrbahn. Verl. R. Oldenbourg, München und Berlin 1919.
- Schiemann. Gleislose Bahnen statt Straßenbahnen. E.K.B. 1921. H. 21.
- Voit. Lastkraftwagenverkehr und Straßenerhaltung. Z.O.I.A.V. 1921. H. 6.
- Automatic control for railless cars. E.R.J. 1921. Bd. 58. Nr. 20.
- Trackless trolleys. E.R.J. 1921. Bd. 57. Nr. 2, 13, 14, 19, 22, 126.

1. Allgemeines. Die gleislosen Bahnen haben zum Ziel für solche untergeordnete Verkehrsaufgaben ein maschinell betriebenes Verkehrsmittel zu schaffen, das

zufolge seiner geringen Anlagekosten mit der animalischen Zugkraft oder Benzinbetrieb in Wettbewerb treten kann, was den letztgenannten Betriebsarten gegenüber durch eine wirtschaftlich arbeitende Betriebskraft erzielt werden soll.

Der Gedanke einem mit Elektromotor angetriebenen freizügigen Fahrzeug den Strom mit einer — in diesem Falle unvermeidlich — zweipoligen Oberleitung zuzuführen, ist insofern naheliegend, als vier Fünftel der Anlagekosten einer elektrischen Bahn von den Baukosten des Bahnkörpers aufgezehrt werden. Die Ersparung von Vierfünfteln des sonst benötigten Anlagekapitals würde zweifelsohne eine bedeutende Entlastung der Betriebskosten von den festen durch Verzinsung, Tilgung und Erneuerung des Anlagekapitales verursachten Ausgaben bedeuten.

Das Mindestbedürfnis der Verkehrsleistung, welches für die Bauwürdigkeit einer Bahnanlage, für das Gleichgewicht der Betriebsrechnung vorausgesetzt werden muß,

kann demnach für diese Betriebsart, die die Herstellung eines eigenen Bahnkörpers nicht verlangt, wesentlich niedriger angesetzt werden.

Trotzdem haben derartige Unternehmen fast in keinem Fall zu einem wirtschaftlichen oder technischen Erfolg geführt. Die technischen Mißerfolge sind darauf zurückzuführen, daß die verhältnismäßig schweren Fahrzeuge und deren elektrische Einrichtung den heftigen, durch die Unebenheit der Straßendecke verursachten Stößen nicht gewachsen waren. Diese Sachlage wird insbesondere deshalb mißlich, weil im Laufe der Zeit auch der Zustand der Straßendecke durch den Verkehr der schweren Fahrzeuge leidet. Mit dem Fortschritt der Automobiltechnik ist der erstere Übelstand wesentlich gemildert worden; der letztere besteht nach

Abb. 604. Rollwiderstände auf Straßen.
1. Asphalt. 2. Holzpflaster. 3. Makadam. 4. Ziegelsteinpflaster. 5. Geteeter Makadam. 6. Granitpflaster mit zementvergossenen Fugen. 7. Schlacke. 8. Kies. 9. Sehr schmutzige, geteerte Straße. 10. Gewöhnliches Pflaster.

wie vor. Die Zerstörung der Straßendecke ist insbesonders bei denjenigen Anlagen eine beträchtliche, bei welchen eine mehr oder weniger gleichmäßige, dichte Zugfolge eingehalten wurde. Demgegenüber ist das Verkehrsbedürfnis derartiger Anlagen sprunghaft schwankend auf kurze Zeiträume zusammengedrängt, ein weiterer Umstand, demzufolge es schwer wird, der vorliegenden Aufgabe gerecht zu werden.

Für die Beanspruchung der Fahrzeuge und der Straßendecke bildet der Rollwiderstand ein kennzeichnendes Maß.

Nach dem Bericht E. von Nier gelten für Fahrzeuge mit Vollgummireifen folgende Werte.

Asphaltstraße	20	kg/t
Steinpflaster	20 bis 35	"
, trocken	20 bis 25	"
, naß	25 bis 35	"
, schlammig	35 bis 45	"
Landwege	50 bis 100	"

Kennelly und Schurig haben die in Abb. 604 wiedergegebenen Kurven für die Rollwiderstände ermittelt.

Rechnet man weiter mit einem Leergewicht der gleislosen Fahrzeuge von 140 kg für den Fahrgast und mit einer, günstig gerechnet, 50%igen Ausnutzung der gebotenen Fahrgelegenheit, kann man die für den Stromverbrauch maßgebenden Vergleichszahlen berechnen.

Abb. 604. Rollwiderstände auf Straßen.
1. Asphalt. 2. Holzpflaster. 3. Makadam. 4. Ziegelsteinpflaster. 5. Geteeter Makadam. 6. Granitpflaster mit zementvergossenen Fugen. 7. Schlacke. 8. Kies. 9. Sehr schmutzige, geteerte Straße. 10. Gewöhnliches Pflaster.

wie vor. Die Zerstörung der Straßendecke ist insbesonders bei denjenigen Anlagen eine beträchtliche, bei welchen eine mehr oder weniger gleichmäßige, dichte Zugfolge eingehalten wurde. Demgegenüber ist das Verkehrsbedürfnis derartiger Anlagen sprunghaft schwankend auf kurze Zeiträume zusammengedrängt, ein weiterer Umstand, demzufolge es schwer wird, der vorliegenden Aufgabe gerecht zu werden.

Für die Beanspruchung der Fahrzeuge und der Straßendecke bildet der Rollwiderstand ein kennzeichnendes Maß.

Nach dem Bericht E. von Nier gelten für Fahrzeuge mit Vollgummireifen folgende Werte.

Asphaltstraße	20	kg/t
Steinpflaster	20 bis 35	"
, trocken	20 bis 25	"
, naß	25 bis 35	"
, schlammig	35 bis 45	"
Landwege	50 bis 100	"

Kennelly und Schurig haben die in Abb. 604 wiedergegebenen Kurven für die Rollwiderstände ermittelt.

Rechnet man weiter mit einem Leergewicht der gleislosen Fahrzeuge von 140 kg für den Fahrgast und mit einer, günstig gerechnet, 50%igen Ausnutzung der gebotenen Fahrgelegenheit, kann man die für den Stromverbrauch maßgebenden Vergleichszahlen berechnen.

Ein Straßenbahntriebwagen wiegt — Sitz- und Stehplätze in beiden Fällen berücksichtigt — 120 kg für die Person; dieselbe Zahl für den Anhängewagen kann mit 70 kg angesetzt werden. Da beide Betriebsmittelarten etwa hälftig am Verkehr teilnehmen, ist im Mittel mit einem Totgewicht von 95 kg für den Fahrgast zu rechnen.

Der Zugwiderstand sei reichlich gerechnet 8 kg/t, für das gleislose Fahrzeug 25 kg/t. Die mittlere Steigung sei in beiden Fällen 10 %.

Die für den Stromverbrauch maßgebende Zugkraft je Fahrgast wird für den gleislosen Betrieb:

$$(140 \times 2 + 75) (10 + 25) = 12400$$

und für den Straßenbahnbetrieb:

$$(95 \times 2 + 75) (10 + 8) = 4770,$$

d. h. der erstere erfordert einen $\frac{12400}{4770} \cong 2,6$ fachen Kraftaufwand, der für die Abnützung von Fahrzeug und Straßendecke aufgewendet wird und insbesondere in der Abnützung der kostbaren Gummibereifung in Erscheinung tritt.

Diese Rechnung übereinstimmt gut mit den verschiedentlich veröffentlichten Stromverbrauchszahlen. Der Stromverbrauch für das Tonnenkilometer beträgt 110 bis 210 Wh, im Mittel etwa 150 Wh, d. h. das 2,5 bis 3 fache des bei Straßenbahnen unter ungünstigsten Verhältnissen erzielten Werten.

Diese Betrachtungen weisen dem gleislosen Betrieb diejenigen Verhältnisse zu, für welche derselbe mit einigen Aussichten auf Erfolg in Betracht gezogen werden kann.

Die Voraussetzung ist eine tragfähige, in gutem Zustand erhaltene Straßendecke, spezifisch leichte, kräftig gebaute Fahrzeuge, die mit mäßiger Geschwindigkeit fahren.

Bei den ausgeführten Anlagen findet man Fahrgeschwindigkeiten bis 35 km/h und Reisegeschwindigkeiten von 15 bis 25 km/h, im Mittel etwa 13 bis 15 km/h. Wenn man bedenkt, daß diese Ergebnisse selbst mit einem hochentwickelten Verkehrsmittel auf vorzüglicher Fahrbahn, wie es die Straßenbahnen sind, kaum übertragen werden können, so ist es einleuchtend, daß die Geschwindigkeiten zu hoch gewählt sind und eine Hauptursache für den hohen Verschleiß der Fahrzeuge und der raschen Zerstörung der Straßendecke bilden. Die hohe Geschwindigkeit anzuwenden, ist um so weniger Anlaß, als eine Konkurrenzierung durch andere Verkehrsmittel kaum in Frage kommen wird.

Wenn man die gleislosen Bahnen für Verkehrsaufgaben einrichtet, wie sie von animalischem Omnibusverkehr bewältigt werden können und die Geschwindigkeit nicht gleich auf das Vielfache erhöht, wird man gute Erfolge erwarten können. So ist z. B. der Vorspannbetrieb auf Steilrampen ein aussichtsreiches Gebiet. Allerdings versagt auch der gleislose Betrieb bei Glatteis oder arg verschmutztem, schlammigem Straßenzustand.

2. Die Fahrleitung; die Stromabnehmer. Die zwei Leiter der Fahrleitung werden voneinander — neben- oder übereinander — in geringer Entfernung, 15 bis 50 cm, angeordnet.

Schiemann ordnet die Drähte nebeneinander an und bestreicht dieselben mit zwei, auf einer Rute gelenkig sitzenden Schleifikontakten von unten. Die

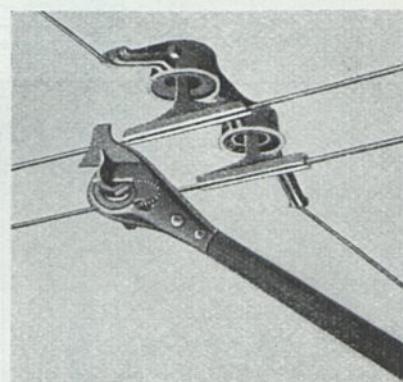


Abb. 605. Stromabnehmer Bauart Schiemann.

Fahrleitung kann genau so wie eine gewöhnliche Straßenbahnfahrleitung aufgehängt werden (Abb. 605). Die Rute des Stromabnehmers ist drehbar gelagert, ihre Länge etwa 5,5 m, so bemessen, daß die Fahrzeuge nach beiden Seiten, gerechnet von der Achse der Fahrleitung, auf eine Entfernung von 3,5 m ausweichen können.

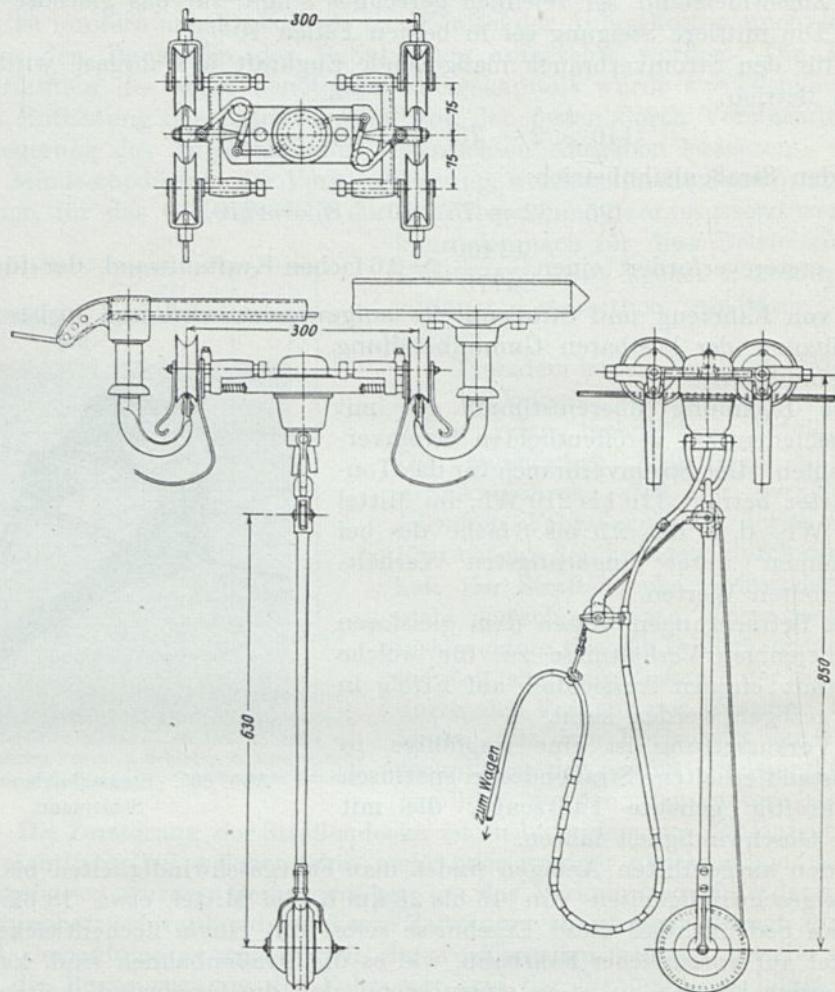


Abb. 606. Stromabnehmer Bauart Stoll.

Von zwei sich begegnenden Wagen hat nur der eine seine Stromabnehmer niederzuziehen, damit der andere ungehindert durchfahren kann.

Beim System Stoll besteht der Stromabnehmer (Abb. 606) aus einem vierrädrigen Wägelchen, welches mittels einer gefederten Schnur nachgeschleppt wird. Die Fahrdrähte sind von oben bestrichen und müssen durch gekröpfte Halter von unten gestützt werden. Die Fahrdrähte sind in 30 cm Entfernung nebeneinander angeordnet. Je nach der Länge des Schleppseiles ist ein seitliches Ausweichen bis 10 bis 12 m möglich.

In der Anordnung Lloyd-Köhler sind die beiden Fahrdrähte übereinander angeordnet; der obere Draht wird von oben bestrichen. Auf diesem laufen zwei Rollen des einen Poles des Stromabnehmers, der untere Draht wird auf der unteren Seite von zwei Schleifbügeln bestrichen (Abb. 607).

Bei beiden letztangeführten Systemen müssen die Stromabnehmer von zwei

sich begegnenden Wagen ausgetauscht werden, zu welchem Zweck die Stromabnehmerkabel mit Steckdosen versehen sind.

Aus der Bauart der Stromabnehmer folgt, daß das System Stoll in bezug auf die räumliche Anordnung der Leitung den geringsten Einschränkungen unterworfen ist. Es können kurze Ausleger und in Kurven verhältnismäßig wenige Stützpunkte vorgesehen werden.

Die Bauart Schiemann verlangt im Hinblick auf den Richtungsbetrieb die Anordnung der Fahrleitung in der Straßenmitte (Abb. 608).

In breiten Straßen wird es nötig, für jede Richtung eine eigene Doppelleitung anzulegen.

Nachdem die Reichweite der Fahrleitung — es fehlen die hochwertigen Schienen — verhältnismäßig gering ist und bei einigermaßen lebhaftem Straßenverkehr das Umwechseln der Stromabnehmer unerwünschte Aufenthalte verursacht, pflegt man bei allen drei Systemen für jede Fahrt Richtung eine eigene Doppelleitung anzulegen, die am Bahnende als Schleife befahren wird. Unter einem ist auf diese Weise der elektrische Querschnitt auch verdoppelt.

3. Stromsystem; Betriebsspannung. Zufolge notwendigerweise geringer Nähe der beiden Fahrdrähte und der Umständlichkeit der Isolation des Stromabnehmers sind der verwendbaren Betriebsspannung enge Grenzen gesetzt. Die ausgeführten Anlagen verwenden meist Gleichstrom

von 500 bis 600 Volt. Auch vom Standpunkt der Sicherheit der Fahrgäste, darf keine Hochspannung zur Anwendung gelangen, weil die sichere Erdung der Fahrzeuge kaum erreichbar ist.

Da die Leitungsanlage isoliert und praktisch bifilar angeordnet ist, treten keine Fernwirkungen auf; es kann von diesem Gesichtspunkt ohne weiteres Wechselstrom der gebräuchlichen Wechselzahl verwendet werden.

4. Die Fahrzeuge. Bauarten, die den neuzeitlichen Regeln des Automobilbaues Rechnung tragen, werden auch bei dieser Betriebsart gute Erfolge zeitigen.

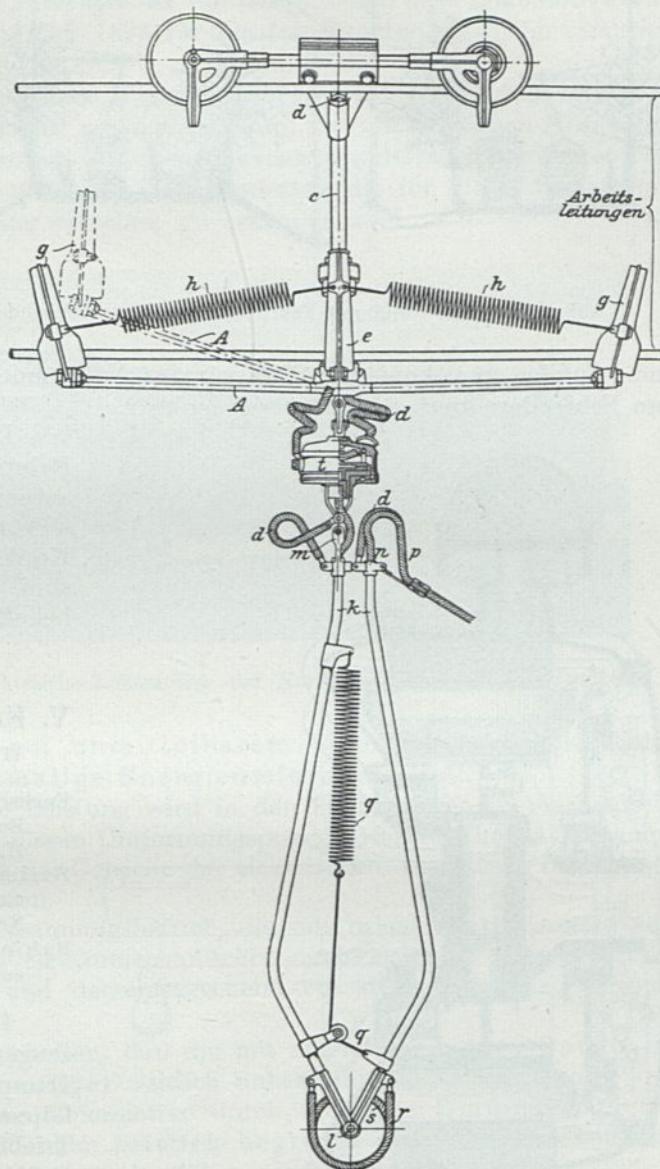


Abb. 607. Stromabnehmer Bauart Köhler.

Von diesem Standpunkt kann die Bauart mit in die Radnabe verlegten Motoren (Abb. 609) als überholt angesehen werden, weil die ungefederten Massen zu groß

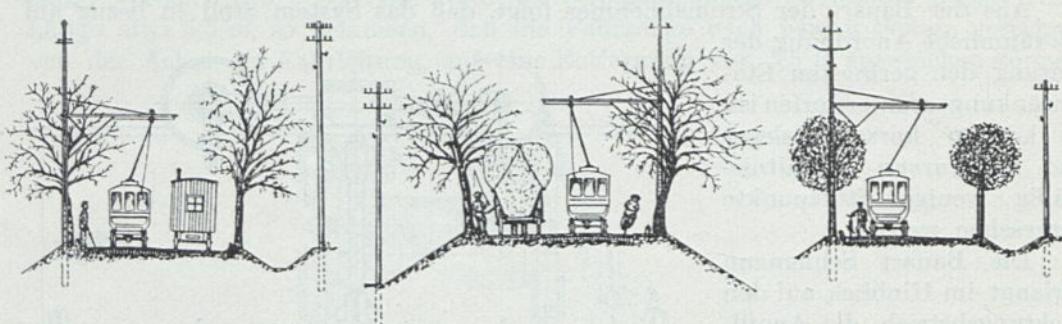


Abb. 608. Straßenbild mit Fahrleitung und ausweichenden Fahrzeugen (Schiemann).

sind. Zufolge gyroskopischer Wirkung der Nabennmotoren neigen diese Wagen mehr zum Schleudern und sind schwerer lenkbar.

Die Befestigung des Motors im Rahmen ebenso wie bei Benzinautomobilen, ist mechanisch wohl umständlicher, weil Wechselgetriebe, Kardan- und ev. Kettenantrieb nötig sind, doch sind diese Übertragungsbehelfe durchaus betriebssicher.

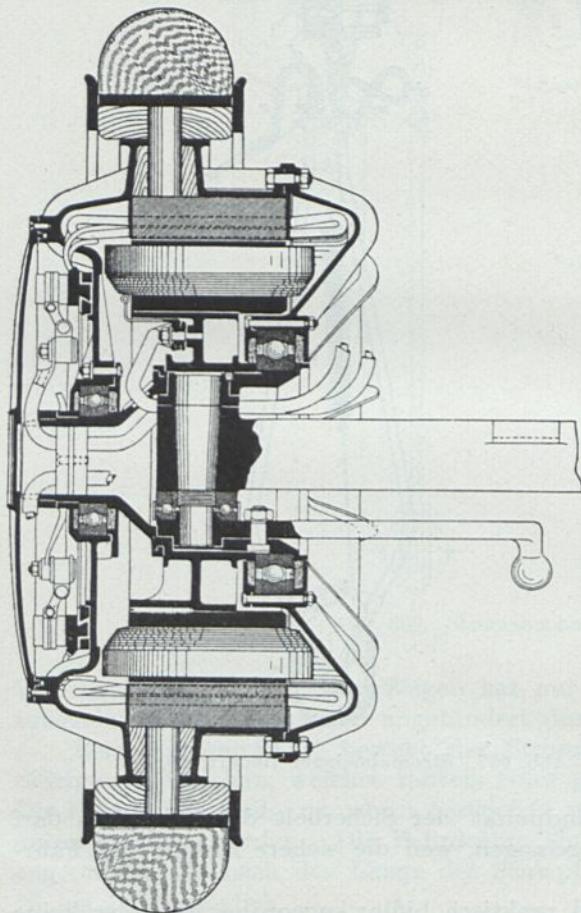


Abb. 609. Nabenzug im Lenkrad
(Lohner—Porsche — Daimler).

in dieser Hinsicht, wenn ein hochwertigerer Brennstoff als Kohle in einer wärme-

V. Kalorische Fahrzeuge mit elektrischer Kraftübertragung.

Englische Turboelektrische Lokomotive.
Eng. 1909. S. 613. Ref. E.K.B. 1910.
H. 15.

Heilmann. La locomotive électrique Heilmann. Paris 1894. G.C. 1893. Bd. 22.
Nr. 14 u. 22.

Pahin. La traction thermoelectrique par automotrices. L.E. 23. Okt. 1915.

1. Allgemeines. Diese Art Fahrzeuge bilden die Brücke von der Dampflokomotive über das Speicherfahrzeug zu dem rein elektrischen Triebfahrzeug, das die Triebkraft der Fahrleitung entnimmt.

Letzteres kann ohne Fahrleitung überhaupt nicht fahren.

Der Speicherwagen führt eine Stromquelle zeitlich verhältnismäßig begrenzter Leistung mit.

Das kalorisch-elektrische Fahrzeug hat als dritte Stufe mit der Dampflokomotive die große Reichweite gemein, übertrifft diese

technisch vollkommeneren Maschine — Benzin- (Benzol-) oder Dieselmotor — zur thermomechanischen Energieumformung verwendet wird.

2. Grundsätze, dampf-elektrische Lokomotive. Als erster Vorläufer eines kalorisch-elektrisch betriebenen Fahrzeuges ist die dampf-elektrische Lokomotive von Heilmann anzusehen, die im Jahre 1893 für die französische Nordbahn versuchsweise gebaut wurde.

Ohne über den Rahmen dieses Werkes hinausgehend Geschichte schreiben zu wollen, soll diese nur einmal in veränderter Form von der Britischen-Nordbahn-Gesellschaft (Abb. 610) wiederholte Versuchsausführung grundsätzlich betrachtet werden, weil an Hand dieses Beispieles die Gesichtspunkte, die für dieses System mit selbstbeweglicher Stromerzeugung sprechen, zu erkennen sind.

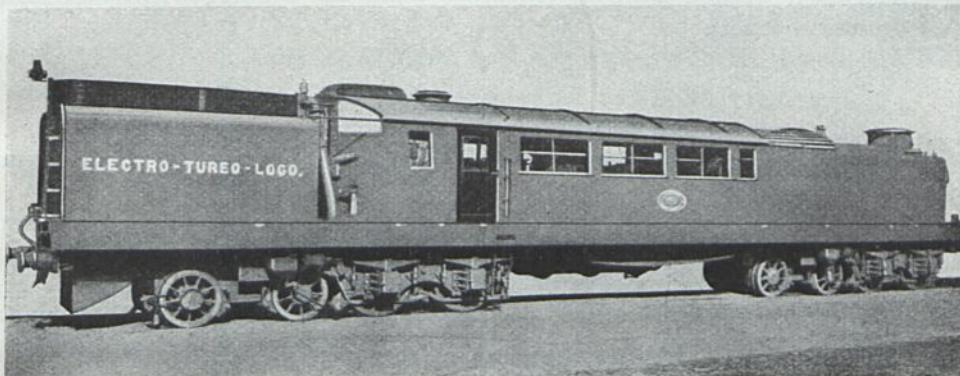


Abb. 610. 1000 PS-Dampf-Turboelektrische Lokomotive der North British Ry. Co. Gewicht 132 t.

In einem Triebfahrzeug mit unmittelbarem Strombezug aus der Fahrleitung findet nur eine einmalige Energieumformung statt.

Die zugeführte elektrische Leistung wird in den Triebmotoren in mechanische Leistung umgeformt. Die für diesen Umformungsprozeß erforderlichen aktiven und Konstruktions-Baustoffe, die das Gewicht der elektrischen Ausrüstung bestimmen, sind somit nur einmal vorhanden.

Auf Fahrzeugen mit Hochspannungsbetrieb, die mit ruhenden Abspannern ausgerüstet sind, ist außer diesen elektromechanischen auch noch eine rein elektromagnetische Umformung und dementsprechend ein Mehraufwand an Gewicht nötig.

Weiter ist vor Augen zu halten, daß die mit einem bestimmten Gewichtsaufwand erzielten Dauerleistungen zeitlich unbeschränkt erzielbar sind.

Demgegenüber ist die Dampflokomotive durch mehrere Umformungsvorgänge gekennzeichnet, die außerdem zeitlich begrenzt sind, weil Heizstoff und Wasser nur in einer gewissen Menge mitgeführt werden können.

Als primäre Arbeitsträger mit zeitlich beschränkter Leistung ist der Kohlen- und Wasservorrat der Dampflokomotive anzusehen. Das Gewicht dieser Energieträger erreicht im Mittel etwa das Gewicht der übrigen auf der Dampflokomotive mitgeführten Einrichtungen zur Arbeitsumformung.

Die zweite Form nimmt die im Brennstoff verborgen gewesene Arbeit im Kessel an, indem Wärme und durch diese Dampfdruck erzeugt wird. Eigentlich ist der Umformungsvorgang im Kessel auch kein einheitlicher, vielmehr findet einerseits primär die Umformung der im Brennstoff enthaltenen Energie in Wärme und sekundär durch die Wärme eine Verdampfung des Wassers und dadurch eine Überdruckerzeugung statt.

Die Dampfmaschine besorgt schließlich die Umformung in die mechanische Triebkraft.

Die Dampflokomotive wird dementsprechend ein Gewicht für die vier zu ihrem Betrieb erforderlichen Energieformen aufweisen. Tatsächlich ist ihr spezifisches Dienstgewicht einschließlich Tender wesentlich höher als dasjenige der gleichwertigen elektrischen Lokomotiven.

Heilmann hat diesen vier Umformungsprozessen noch zwei weitere hinzugefügt, indem er die Dampfmaschine elektrischen Strom erzeugen ließ, welcher zum Antrieb aller Achsen der Lokomotive verwendet wurde.

Die Mechanik des Getriebes der Dampflokomotiven erschwert die Vermehrung der Anzahl der Triebachsen, so daß meistens nicht einmal sämtliche Lokomotivachsen angetrieben werden können; jedenfalls kann das Tendergewicht zum Antrieb nicht ausgenutzt werden.

Das Ziel des Heilmann-Systems war allem Anscheine nach:

1. der Antrieb aller Achsen, somit auch derjenigen, die durch die Brennstoff- und Wasserbehälter belastet waren, zu ermöglichen;
2. eine wirtschaftlich arbeitende, vom Laufwerk unabhängige Dampfmaschine und
3. schließlich eine gute Geschwindigkeitsregelung in dem Sinn zu erzielen, daß es durch geeignete Schaltung der Motoren und Regelung der Spannung möglich ist, bei jeder Geschwindigkeit — innerhalb sehr weiter Grenzen — die volle Leistung der Dampfmaschine auszunützen.

Der Heilmannsche Versuch konnte zu keinem wirtschaftlichen Erfolg führen, weil die große Zahl der Umformungsprozesse in Verbindung mit den verhältnismäßig schweren Kraftquellen der Dampfmaschine zu ganz unpraktikablen Gewichten führen muß. Diesbezüglich genügt der Hinweis, daß schon bei rein elektrischen Lokomotiven für höhere Geschwindigkeiten das Baugewicht größer ist als das Triebgewicht; Laufachsen sind auch bei diesen unvermeidlich.

Der Vorteil einer wirtschaftlich arbeitenden Dampfmaschine dürfte bei dem damaligen Stande der Technik — es gab noch keine Dampfturbinen — und in Ermanglung einer Kondensation mit den verwendeten schnellaufenden Vertikalmaschinen kaum erreicht worden sein.

Ein im Jahre 1910 von der Britischen Nordbahn-Gesellschaft mit einer 1000 PS Turbolokomotive unternommener Versuch hat auch keine weitere Nachahmung gefunden. Die nach dem Schema $2 - 2A + 2A - 2$ gebaute Lokomotive (Abb. 610) wog 132 t, d. h. reichlich das Doppelte einer rein elektrischen Maschine und hatte eine enorme Länge. Für den Antrieb war eine 3000-turige Zoellyturbine samt Kondensator vorhanden. Das Triebgewicht betrug 89 t.

Wie sich die Maschine im Betrieb bewährt hatte, darüber ist nichts verlautet.

Der Vorteil der wirtschaftlichen Geschwindigkeitsregelung mit elektrischer Kraftübertragung ist unter den bei der Dampfmaschine obwaltenden Umständen zu teuer erkauft und nicht am Platze, denn gerade in diesem Belange ist die Dampfmaschine dem Elektromotor beinahe überlegen, denn der Elektromotor braucht besondere Hilfsmittel zur Regelung der Drehzahl.

3. Diesel- und benzinelektrische Fahrzeuge. Die elektrische Kraftübertragung kommt bei solchen kalorischen Antriebsmaschinen in Frage, die in jeder Hinsicht anders geartet sind als die Dampflokomotive mit ihrem Tender.

Die Vermehrung der Umformungsprozesse gegenüber rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen ist hierbei unvermeidlich; dieselbe kann in Kauf genommen werden, wenn durch die Art des Brennstoffes und der Betriebsmaschine die durch die praktischen Verhältnisse gegebenen Gewichte nicht überschritten werden. Die

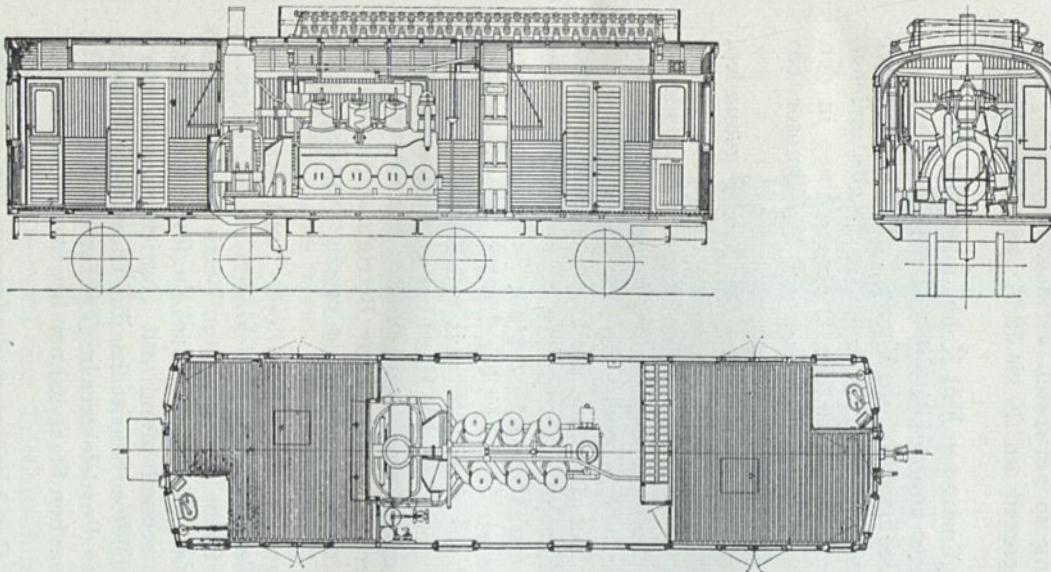


Abb. 611. Diesel-elektrischer Triebwagen (D.E.V.A.) 2A + 2A.

Länge über die Puffer	10850 mm	Spurweite	891 mm	Zuggewicht einschl. Triebwagen in 10‰ Steigung
Radstand (fest)	2100 mm	Leistung	190 PS	92 t bei 20 km/h.
		Dienstgewicht	27,6 t	

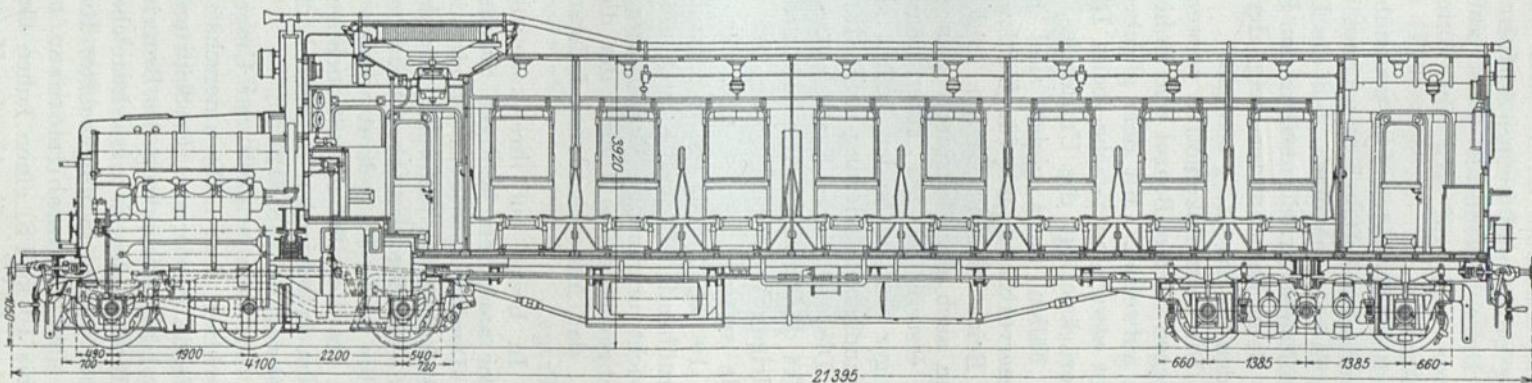


Abb. 612. Diesel-elektrischer Triebwagen der sächsischen Staatsbahnen (Sulzer-B.B.C.)

Leistung der Triebmaschine	200 PS	Spannung	300 V	Fahrgeschwindigkeit	40—70 km/h
Umlaufzahl	400/min	Dienstgewicht leer	64 t	Länge über Puffer	21395 mm
Leistung des Generators	190/140 KW			Radstand fest	4100 mm

elektrische Kraftübertragung gewinnt des weiteren eine Berechtigung, wenn die Antriebsmaschine keine oder nur eine mangelhafte Geschwindigkeitsregelung zuläßt und keine Anfahrgeschwindigkeit zu entwickeln vermag.

Diese Erkenntnis weist auf den im ortsfesten Betrieb bewährten Dieselmotor und auf den im Automobilwesen hochentwickelten Benzin-(Benzol)-Motor hin.

Beide Bauarten sind gegenüber dem Dampfbetrieb durch eine bedeutend bessere Wärmewirtschaft gekennzeichnet und verwenden hochwertige Brennstoffe.

Es ist zu erinnern, daß die Dampflokomotive nur 3 bis 4 % der im Brennstoff enthaltenen Arbeit nutzbar am Radumfang zu verwerten vermag.

Beim Benzinmotor steigt der Wirkungsgrad auf 20 bis 22 %; beim Dieselmotor werden 30 bis 32 % erreicht.

Die Dampflokomotive verwendet im günstigsten Fall Kohle mit 7000 Kalorien, wogegen Benzin, Benzol und Rohöl Heizwerte von im Mittel 10000 bis 10500 Kalorien aufweisen. Mit dem gleichen Brennstoffgewicht wird man beim Benzinmotor somit etwa eine 7-fache, beim Dieselmotor eine rund 10fache Reichweite erzielen, unberücksichtigt des Umstandes, daß die Totgewichte der Triebmaschinen in den drei Fällen nicht gleich sind und daß für den Benzin- und Dieselmotor ein Wasserverbrauch nur für Kühlzwecke in Betracht zu ziehen ist.

Beide Maschinenarten sind praktisch an eine feste Drehzahl gebunden, wenn auch der Benzinmotor in diesem Belange den Dieselmotor übertrifft, indem der erstere in den Turen nennenswert gedrosselt werden kann. Nichtsdestoweniger ist in beiden Fällen ohne ein besonderes Übertragungsmittel eine Geschwindigkeitsänderung nicht durchführbar, ebensowenig das Anfahren.

Die elektrische Kraftübertragung ist hier durchaus am Platze und vom Standpunkt der Gewichtswirtschaft auch durchführbar, insbesondere innerhalb derjenigen niedrigen Leistungsgrenzen bei welchen verhältnismäßig große Totgewichte keine Rolle spielen. So ist z. B. für Lokomotiven mit 100 bis 250 PS ein Totgewicht von 100 bis 150 kg/PS und darüber durchaus erträglich und mit Rücksicht auf die auszuübenden Zugkräfte auch nötig. Für eine 1000 PS-Maschine gibt dasselbe spez. Gewicht ungünstige Verhältnisse insbesondere eine mangelhafte Ausnutzung des Triebgewichtes; es kommt der diesel- oder benzinelektrische Betrieb abgesehen davon, daß Motoren dieser Leistung noch nicht handelsfähig erzeugt werden, nicht in Frage.

In bezug auf ihre konstruktive Eignung sind der Diesel- und der Benzinmotor nach dem heutigen Stande ihrer Technik ganz verschieden zu beurteilen.

Der Dieselmotor ist eine in erster Reihe für ortsfesten Betrieb ausgebildete, verhältnismäßig schwere, langsamlaufende Maschine. Für Zugförderungszwecke wird dieselbe erst brauchbar, wenn sie schnellaufend mit Gewichten von etwa 20 bis 25 kg/PS gebaut werden kann. Diesen Schritt ist die Dieselmotortechnik erst im Begriffe zu unternehmen; einige dieselelektrische Triebwagen (Abb. 611) stehen in Schweden in Betrieb. Die sächsischen Staatsbahnen besitzen einen 200 PS-Triebwagen (Abb. 612).

Die Schwierigkeit der Umgestaltung der bewährten Bauformen der ortsfesten Maschinen darf nicht unterschätzt werden, indem der Übergang auf leichte schnelllaufende Bauformen die Schwierigkeiten in jedem Belange vermehrt.

Die Verwendung des Benzinmotors ist dagegen trotz seiner höheren Brennstoffkosten derzeit aussichtsreicher, weil der Weg zu einem guten Bahnfahrzeugmotor gerade in umgekehrter Richtung führt.

Die Automotoren haben mit hoher Drehzahl und niedrigem Gewicht (8 bis 10 kg/PS) einen hohen Grad der Vollkommenheit und Betriebssicherheit erreicht. Sie werden für die Massenwirkungen des schweren Bahnbetriebes geeignet,

indem man sie unter höherem Baustoffaufwand schwerer und mit niedrigeren Drehzahlen, daher betriebssicherer baut.

Die für den Benzinmotor als Bahnfahrzeugmotor anzuwendenden Bauregeln führen somit grundsätzlich zu Bauarten mit erhöhter Betriebssicherheit; beim Dieselmotor ist das Umgekehrte der Fall.

4. Bauregeln für die fahrbare Triebmaschine (Benzinmotor). Der für einen Selbstfahrer vorzusehende Benzinmotor wird eine den ortsfesten Motoren angelehnte kräftige Bauart mit etwa 20 bis 25 kg/PS Gewicht und nicht über 700 bis 800 Uml./min aufweisen. Sorgfältige Auswuchtung, gute Kühlung und ein die Drehzahl selbstdäig festhaltender Fliehkraftregler sind für einen einwandfreien Betrieb unerlässlich (Abb. 613, 614).

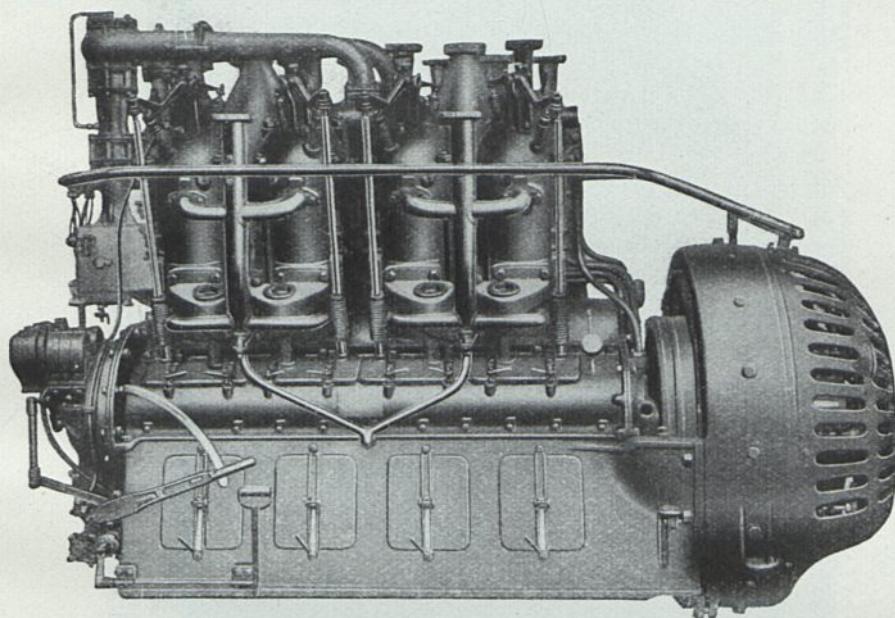


Abb. 613. Achtzylinder-benzinelektrische Gruppe für eine 55 t-Lokomotive (G.E.C.).
Leistung 175 PS — 120 kw, 600 V max. 720 A max während 30 sek., Drehzahl 550/min.

Die Brennstoffwirtschaft verlangt, daß die Drehzahl des Fahrzeuges rein elektrisch geregelt wird und nicht etwa dadurch, daß man die Antriebsmaschine langsamer laufen läßt. Ein einwandfreies Zündgemisch und daher geringen Verbrauch erzielt man nur dann, wenn man die Beeinflussung der Brennstoffzufuhr dem Fahrer entzieht und auf rein mechanischem Wege entsprechend der Beanspruchung selbsttätig regelt. Unabhängig von dieser selbsttätigen Festhaltung der Drehzahl des Benzinmotors wird man jedoch Vorkehrungen treffen, um bei länger anhaltendem Leerlauf die Drehzahl der Triebmaschine auf das mögliche Minimum — etwa 300 Touren — herabzusetzen, um auch hierfür den Brennstoffverbrauch einzuschränken.

Im Hinblick darauf, daß bei benzinelektrischen Selbstfahrern eine Elastizität des Motors nicht zu verlangen ist, da der Motor mit unveränderlicher Drehzahl läuft, ist es zwecklos, aus diesem Grunde die Zahl der Zylinder zu vermehren. Man wird Vierzylinder-Motoren bis zu jenen Leistungen wählen, die sich noch zweckmäßig bauen lassen. Die Verminderung der Anzahl aller einer Wartung bedürfenden Bestandteile wird auf diese Weise erzielt.

Die Schwierigkeiten, mit denen man anfänglich mit den benzinelektrischen

Fahrzeugen zu kämpfen hatte, waren durchweg nicht grundsätzlicher Natur, sondern lediglich auf die Nichtbeachtung der hier kritisch beleuchteten Gesichtspunkte zurückzuführen.

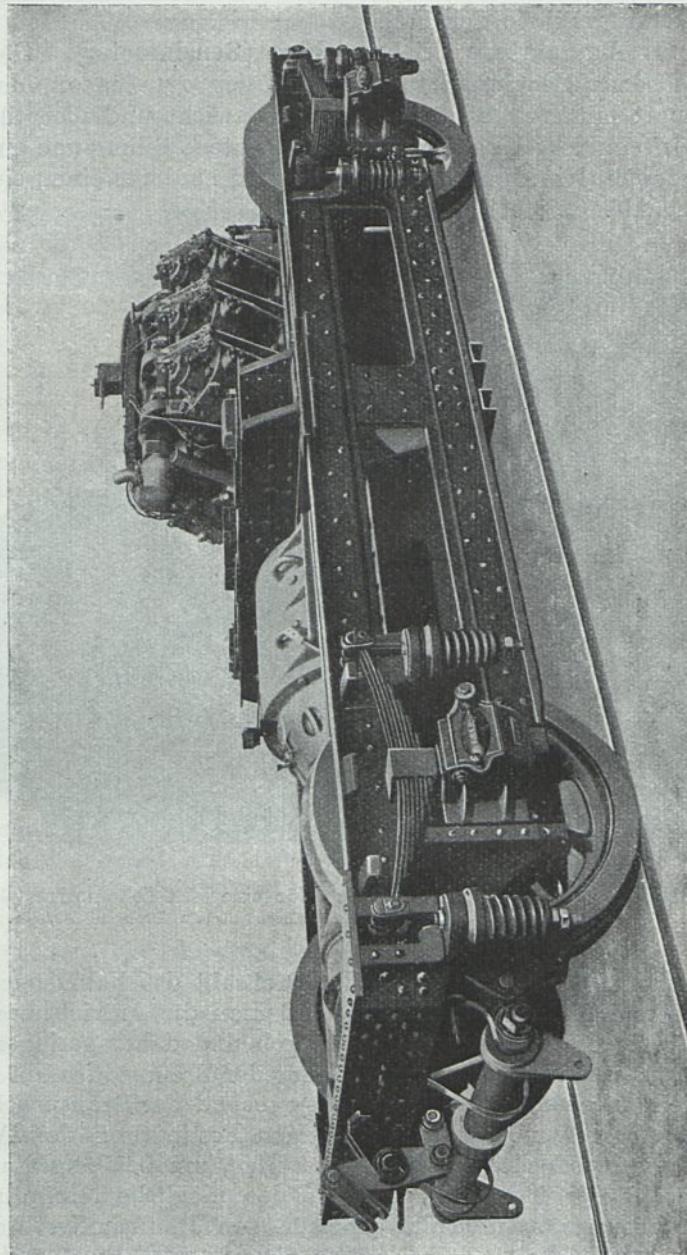


Abb. 614. Maschinengestell des 120 PS, 750 Uml./min. benzenelektrischen Triebwagens der preuß. Staatsbahnen. (A.E.G.).

Man verwendete schnellaufende, leichte Automobilmotoren, regelte die Benzin-zufuhr und damit die Geschwindigkeit von Hand.

An Benzin (Benzol) wird für die PS-h 270 bis 300 g verbraucht.

5. Bauformen der Triebfahrzeuge. Von nicht geringerer Wichtigkeit ist die Anordnung der Antriebsmaschine am Fahrzeug, wie auch die Anordnung der Maschinenanlage überhaupt. Es ist gänzlich verfehlt, die Maschinenanlage und ihr

Zubehör wie Kühler usw. irgendwo im Fahrzeug hinzuzwängen, ohne auf bequeme Wartung und Instandhaltung Rücksicht zu nehmen.

Die nach dem Vorbild der Straßenautomobile ausgeführten Selbstfahrer (Abb. 615)

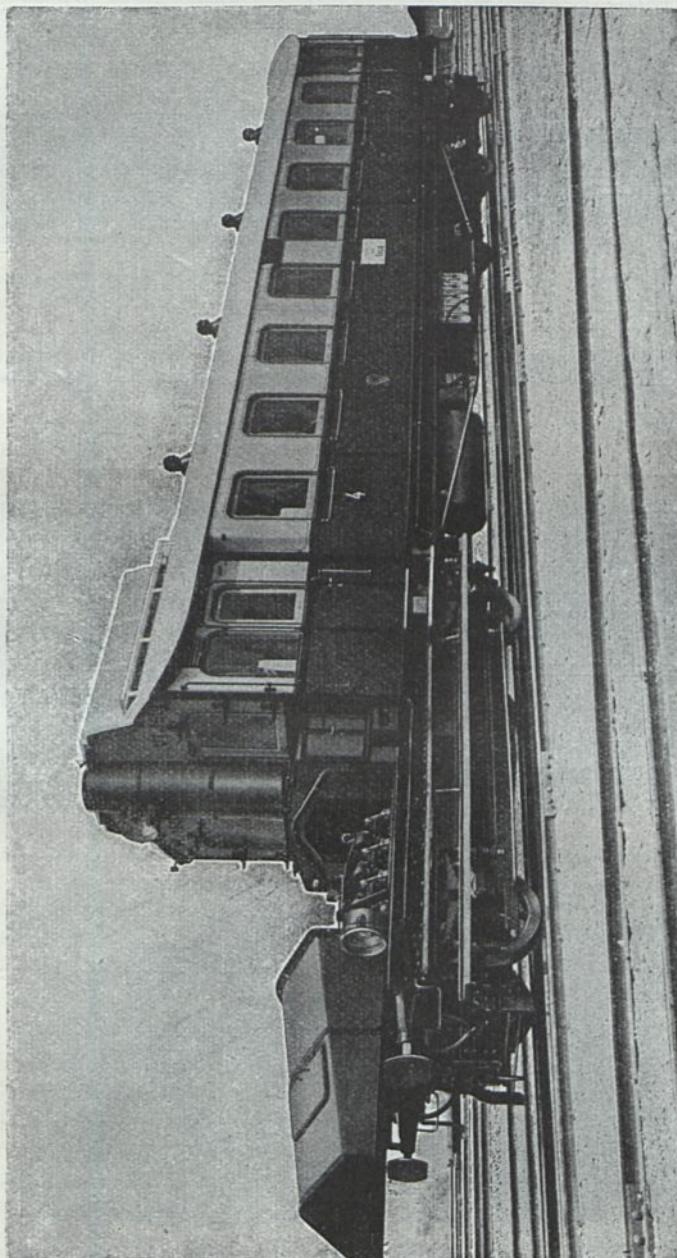


Abb. 615. 120 PS benzolelektrischer Triebwagen der preuß. Staatsbahnen (A. E. G.)
Fassungsraum 100 Personen Höchstgeschwindigkeit 60 km/h

der preußischen Staatsbahnen sind für sachgemäßen Aufbau vorbildlich, wenn auch der Einbau des Kühlers in die Decke des Wagenkastens noch Bedenken erwecken muß.

Bei diesen selbstfahrenden Triebwagen ist die Maschinenanlage in einem besonderen, unter einem Vorbau befindlichen Laufgestell (Abb. 614, 615) untergebracht, so daß nach Abnehmen des Deckels alle Einrichtungen leicht zugänglich sind.

Einer zweckdienlichen Gewichtsausteilung entsprechend, befinden sich die Fahrzeugmotoren in einem zweiten Drehgestell.

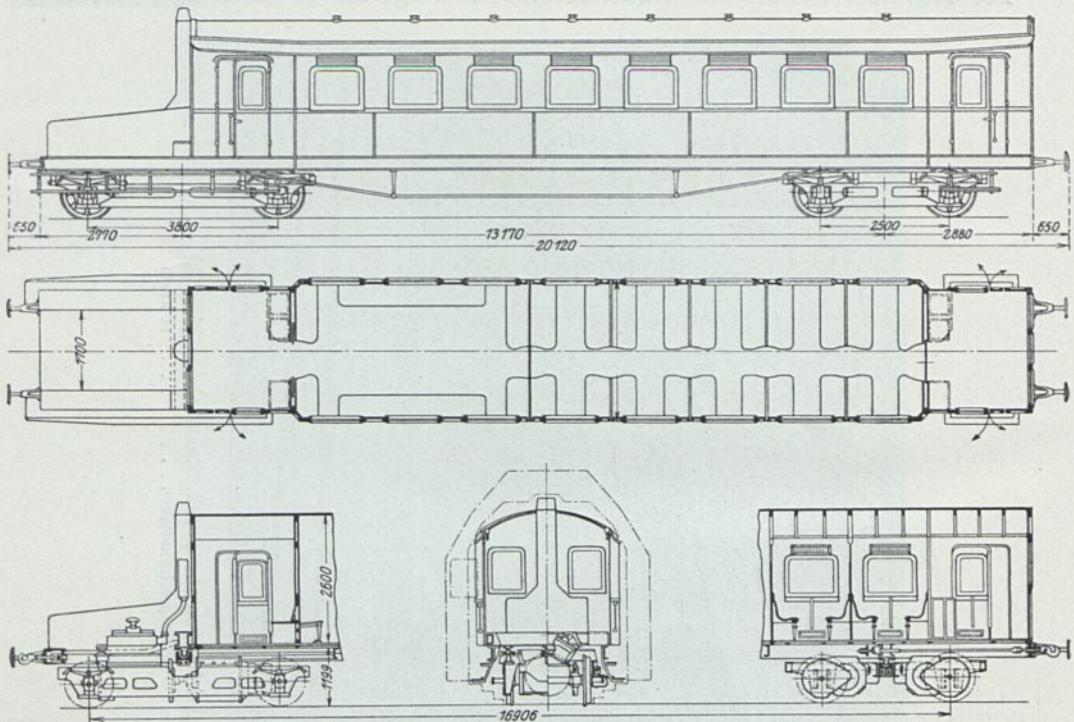


Abb. 616. 120 PS-Benzolelektrischer Triebwagen der preuß. Staatsbahnen (A.E.G—Deutz).

Nach streng technisch-wissenschaftlichen Gesichtspunkten organisch aufgebaut, ist die in den Abb. 617, 618 dargestellte 120 PS-benzinelektrische Schmalspurlokomotive (A.E.G.U.).

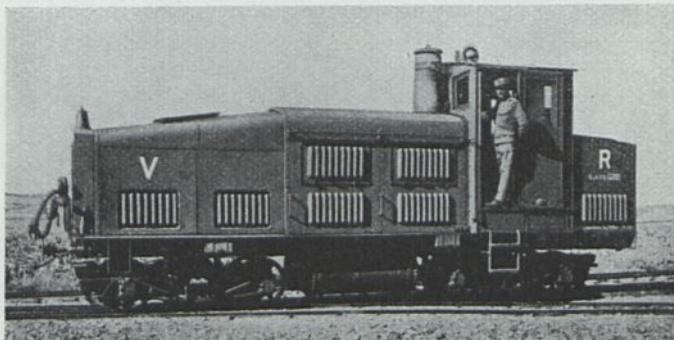


Abb. 617.

Vierachsiger benzinelektrischer Generatorwagen für Schmalspur. (A.E.G.U.)

Benzinmotor	120 PS	Betriebsspannung	0—600 V
Uml./min	750	Leistung	80 kw/h
Gewicht			14 t.

An einem Ende befindet sich der Kühler, hinter diesem das Kreiselgebläse, dessen Flügelrad unter Zwischenschaltung einer elastischen Kupplung auf der verlängerten Dynamoachse ruht, die auch die Erregermaschine trägt.

Das Schwungrad bildet zugleich die elastische Kupplung zwischen Dynamo und Benzinmotor. Der Benzinmotor ist auf der einen Seite der Kuppelung mit dem Wagengestell fest verschraubt. Das andere Ende ruht in einem mit Kugelpfanne versehenen Schlitten und ist mit gefederten Stangen am Wagengestell verankert. Durch diese Anordnung sind schädliche Spannungen bei Erwärmung des Benzinmotors vermieden, ebensowenig können die unvermeidlichen Verwindungen des Wagengestelles das Motorgehäuse beanspruchen.



Abb. 618. Benzinelektrischer Triebwagenzug mit 16 angetriebenen Achsen für große Steigungen.

pfanne versehenen Schlitten und ist mit gefederten Stangen am Wagengestell verankert. Durch diese Anordnung sind schädliche Spannungen bei Erwärmung des Benzinmotors vermieden, ebensowenig können die unvermeidlichen Verwindungen des Wagengestelles das Motorgehäuse beanspruchen.

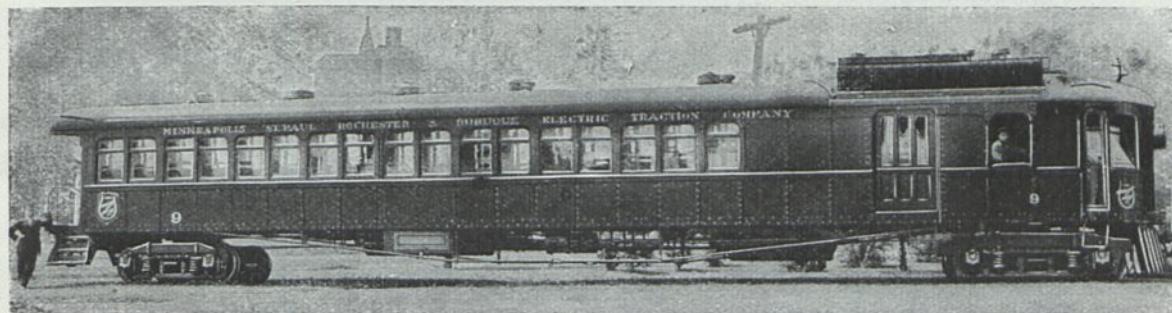


Abb. 619. Benzinelektrische Triebwagen für beschleunigten Ueberlandverkehr.

Die hier für den benzintechnischen Teil der Selbstfahrer zum Ausdruck gebrachten Gesichtspunkte gelten sinngemäß auch für dieselektrische Fahrzeuge, nur lassen sich bei diesen die gestellten Anforderungen weniger leicht erfüllen.

Das Anlassen des Benzin- oder Dieselmotors kann auf elektrischem Wege mit Hilfe einer auch für Nebenzwecke etwa nötigen Batterie erfolgen. In diesem Falle ist beim Benzinmotor keine Druckluftanlage notwendig, die sonst zur Inbetriebsetzung nötig ist. Beim Dieselmotor ist eine für hohen Druck gebaute Druckluftanlage unerlässlich, weil der Brennstoff den Zylindern unter Druck zugeführt werden muß.

In Amerika sind vergleichsweise große Triebfahrzeuge (Abb. 619) und Lokomotiven (Abb. 620) dieses Systems gebaut worden.

6. Die elektrische Ausrüstung. Der elektrische Stromerzeuger und die Antriebsmaschine sind im Selbstfahrer räumlich aneinander gebundene Einzelteile eines Getriebes mit veränderlicher Übersetzung. Die ganze Umständlichkeit des Systems erscheint nur gerechtfertigt, wenn die elektrische Einrichtung dieser Voraussetzung in weitmöglichstem Umfang nachkommt.

Abgesehen demnach von den besonderen Vorteilen der Dieselmaschine und des Benzinmotors gegenüber einer Dampfmaschine, wie rasche Betriebsbereitschaft, leichtes Abstellen, kein Brennstoffverbrauch beim Stillstand usw. wird der kalorisch-

elektrische Selbstfahrer der Dampflokomotive nur dann überlegen sein können, wenn durch die veränderliche Übersetzung der Kraftübertragung innerhalb verhältnismäßig großer Geschwindigkeitsgrenzen die volle Leistung der Antriebsmaschine



Abb. 620. Benzinelektrische Lokomotive.

Achsenfolge	$2A + 2A$	Stromerzeuger	$2 \times 120 \text{ kw}$
Dienstgewicht	55 t	Motorleistung	$4 \times 100 \text{ PS}$
Höchste Geschwindigkeit	60 km/h		

mit guter Wirtschaftlichkeit ausgenützt werden kann. Trotz guter Geschwindigkeitsregelung ist die Dampflokomotive gerade in diesem Belang unvollkommen, indem sie bei hohen Zugkräften und kleinen Geschwindigkeiten sehr hohe Dampfverbrauchs-zahlen aufweist.

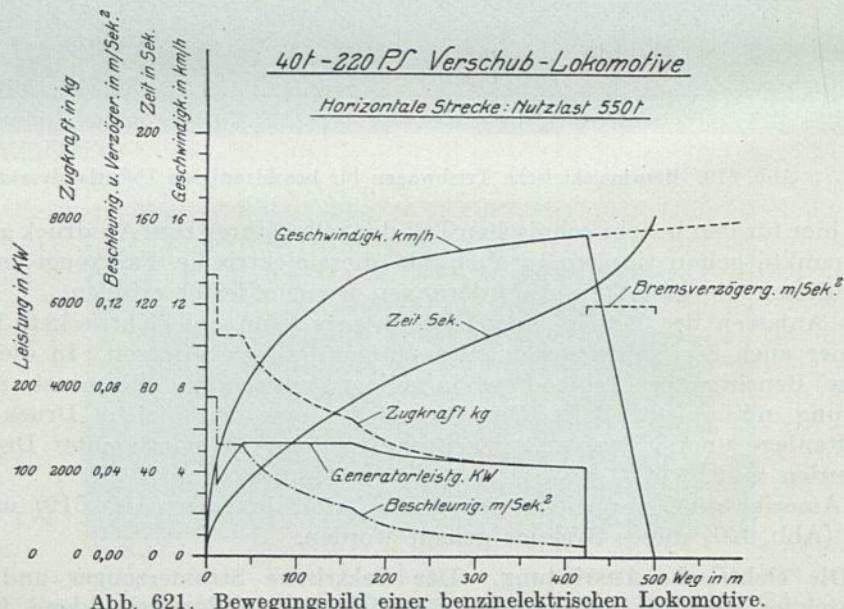


Abb. 621. Bewegungsbild einer benzinelektrischen Lokomotive.

Daß nur ein Gleichstrombetrieb in Betracht kommen kann, bedarf keines besonderen Nachweises. Die Spannung muß von Null bis zum Höchstwert regelbar sein, daher ist für den Stromerzeuger Fremderregung vorzusehen (Abb. 622).

Verfolgt man die Wirkungsweise des elektrischen Antriebes während einer Anfahrt, gewinnt man Einblick in die diesbezüglichen Verhältnisse (Abb. 621).

Im allgemeinen wird das Triebfahrzeug zumindest zwei Triebmotoren erhalten: die Reihenbeneinanderschaltung ist demnach auch hier anwendbar.

Mit dieser von Nullspannung beginnend, wird die Spannung im Schritt der Beschleunigung gesteigert, so daß diese und die Stromstärke festgehalten wird.

Die Grenze bildet die höchste Beanspruchung eines Motors und das Reibungsgewicht, wenn der Motor zweckdienlich bemessen ist und wenn es sich um ein Fahrzeug handelt, das hohe Zugkräfte zu entwickeln hat.

Die Spannung wird bis zum Höchstwert der Dynamospannung gesteigert und dann auf Parallelschaltung gegangen. Hierfür ist diejenige Geschwindigkeit maßgebend, bei welcher die zulässige Höchststromstärke des Stromerzeugers nicht überschritten wird.

An dieser Stromstärke festhaltend, wird die Spannung und damit die Leistung bis zur Leistung der Antriebsmaschine gesteigert.

Mit Abnahme der Stromstärke entsprechend der Eigencharakteristik der Triebmotoren wird die Spannung weiter unter voller Ausnutzung der Leistung erhöht, bis schließlich die höchste Betriebsspannung erreicht ist und das Fahrzeug sich entsprechend der Eigencharakteristik der Triebmotoren weiter beschleunigt. Die Abb. 621 läßt die einschlägigen Verhältnisse einer 220 PS-Verschiebelokomotive erkennen.

Dank der wirtschaftlich regelbaren und von der Fahrgeschwindigkeit unabhängigen Spannung lassen sich diese Fahrzeuge bequem mittelbar elektrisch bremsen. Man braucht den Stromerzeuger statt auf die Triebmotoren auf die Solenoide der Bremsen zu schalten, um jede gewünschte Bremskraft bei Stillstand oder in Fahrt zu erzielen.

Die bequeme Verteilung der Triebkraft auf eine beliebige Achszahl ist eine bei diesem System mit gutem Erfolg angewandte Anordnung. Die österreichischen Feldbahnen hatten Züge bestehend bis aus 26 vierachsigen Fahrzeugen mit 52 angetriebenen Achsen und 26 Motoren für Achsdrücke von 1 t im Betrieb.

Für die österreichische Heeresverwaltung sind 120 PS-Fahrzeuge mit 4 Tonnen Achsdruck gebaut worden, die Strom für bis 20 Achsen, je angetrieben mit einem Motor von 10 PS Nennleistung (Abb. 618) lieferten.

Besondere Überlegung erfordert die Bemessung der Generator- und Triebmotorleistung im Verhältnis zur Antriebsmaschine.

Die Höchstleistung der letzteren ist unter einem ihre Dauerleistung. Der Stromerzeuger wird diese nur dann ausnützen können, wenn er dieselbe Dauerleistung aufweist. Mit der Dauerleistung des Generators ist dessen Stromstärke und damit die Motorzugkraft für eine bestimmte Schaltung gegeben. Die Triebmotoren könnten nur dann ausgenutzt werden, wenn sie ebenfalls die gleiche Dauerleistung aufweisen. Diese ist bei Bahnmotoren nur etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{3}$ der Stundenleistung, die wieder für die zu entwickelnde Zugkraft maßgebend ist. Um demnach die volle Zugkraft der Triebmotoren beim Anfahren auszunützen, genügt die reine Fremderregung von Null aufwärts nicht. Man bedient sich vielmehr der Reihenschaltung, durch die die Verdopplung der Dauerstromstärke der Triebmotoren möglich wird ohne die Dynamo übermäßig dimensionieren zu müssen.

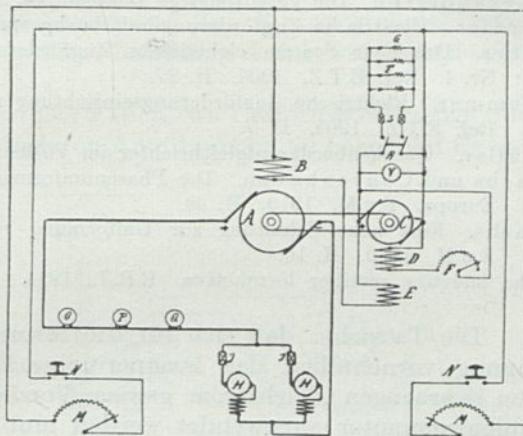


Abb. 622. Schaltbild eines benzinelektrischen Triebfahrzeugs.

In Reihenschaltung entspricht somit der Stromstärke der Dynamo die doppelte Zugkraft wie in Parallelschaltung, so daß einerseits die volle, der Stundenleistung der Triebmotoren entsprechende Zugkraft ausgenützt werden kann, andererseits auch die Dauerleistungen von Generator und Motor gut übereinstimmen.

VI. Umformerfahrzeuge (Lokomotiven).

Literatur:

- Adler. Neuer Einphasenmotor und Phasenumformer für Lokomotiven. E.K.B. 1914. H. 2.
 Alexanderson. Die geteiltphasige Lokomotive. E.T.Z. 1913. H. 49. E.R.J. 1913. Bd. 42. Nr. 15.
 Amsler. Elektrische Zugförderung mit hochgespanntem Gleichstrom. E.T.Z. 1914. H. 18.
 Heys. Das neue System elektrischer Zugförderung auf Vollbahnen (Ferrand). V.T.W. 1907. Nr. 4. Ref. E.T.Z. 1907. H. 27.
 Kummer. Elektrische Zugförderungseinrichtung mit fahrbarem Umformer. E.K.B. 1906. H. 17. Ref. E.T.Z. 1908. H. 7.
 Müller. Quecksilberdampfgleichrichter im Vollbahnbetrieb. E.K.B. 1914. H. 2.
 Sachs und Couvenhoven. Die Phasenumformerlokomotive und ihre Verwendungsmöglichkeit in Europa. E.u.M. 1919. H. 39.
 Sachs. Eine neue Schaltung zur Umformung von Zweiphasenstrom in Dreiphasenwechselstrom. E.u.M. 1920. H. 10.
 The mercury rectifier locomotive. E.R.J. 1914. Bd. 44. Nr. 25. Ref. Z.O.I.A.V. 1914. H. 19.

Die Tatsache, daß sich für die Stromerzeugung und wirtschaftliche Fernübertragung vornehmlich das hochperiodige Drehstromsystem eignet, für den Antrieb von Fahrzeugen Gleichstrom gewisse Vorzüge aufweist oder der an sich ungeeignete Drehstrommotor angewendet werden muß, wenn die Höhe der Periodenzahl günstige Einphasen-Kollektormotorbauarten ausschließt, hat zum Bau von Umformerlokomotiven geführt.

Hierunter ist eine Bauart zu verstehen, bei welcher nicht nur eine Spannungswandlung wie bei allen Wechselstromlokomotiven mit Kollektormotoren erfolgt, sondern auch eine Umformung der von der Fahrleitung genommenen Stromart in eine für den Motorantrieb vorgezogene andere Stromart stattfindet.

Die Überlegenheit der einpoligen Oberleitung gegenüber der zweipoligen steht außer Zweifel. Für die Speisung der Fahrleitung kommt daher nur hochgespannter Gleichstrom oder Einfach-Wechselstrom in Betracht.

Für die bis jetzt angewendeten (3000 V) oder versuchten (5000 V) Gleichstromspannungen konnte von einer Umformung überhaupt abgesehen werden.

Bei Bezug von Einfach-Wechselstrom aus der Fahrleitung kommt eine Umformung in Gleichstrom oder Drehstrom dann in Betracht, wenn die Periodenzahl dem Bau von guten Kollektormotoren im Wege steht.

Zur Umformung in Gleichstrom empfehlen sich zunächst die in bezug auf ihr Gewicht sehr günstigen Quecksilberdampfumformer.

Außer einer Versuchsausführung in Amerika ist über dieses System nichts weiter bekannt geworden.

Es darf angenommen werden, daß der Gleichrichter gegen die unvermeidlichen Erschütterungen eines in Bewegung befindlichen Fahrzeuges nicht ganz unempfindlich ist und sich der erzielte den pulsierenden Gleichstrom für den Betrieb mit den gewöhnlichen Bahnmotoren als nicht geeignet gezeigt hat: Die Frage der betriebs-sicheren Wasserkühlung der Elektroden dürfte auf einem Fahrzeug auch seine Schwierigkeiten haben.

Wesentlich ist auch der Umstand, daß die Umformung bisher nur von Drehstrom mit befriedigendem Erfolg durchgeführt wurde. Bei Einfach-Wechselstrom ist der erzeugte Gleichstrom pulsierend.

Die Gleichstromausrüstung des Fahrzeuges übereinstimmt sonst durchaus mit einer mit gleicher Spannung unmittelbar an der Fahrleitung liegenden Ausrüstung. Die Serienparallelorschaltung und Widerstandsregelung ist ohne weiteres anwendbar, wie auch die Zugsteuerung.

Die grundsätzlich mögliche und an sich wirtschaftliche Umformung mit Einankermaschinen kommt wegen des umständlichen Synchronisierungsvorganges und der Gefahr des Außertrittfallens bei ungewöhnlich hohem Spannungsabfall außer Betracht.

Die Umformung mit Motorgenerator krankt an diesem Übelstand weniger, wenn zwar demgegenüber der Nachteil eines schlechteren $\cos \varphi$ und des größeren Gewichtes steht. Letzteres wird durch die äußerst wirtschaftliche rein stufenlose Geschwindigkeitsregelung durch die Änderung der Spannung des fremderregten Stromerzeugers aufgewogen. Es werden hierdurch Anfahrwiderstände gänzlich überflüssig.

Es spricht Vieles dafür, daß in denjenigen Fällen, wo Umformerfahrzeuge überhaupt am Platze sind, diese Bauart mit anderen Anordnungen in bezug auf Gewicht und wirtschaftliche Regelung der Zugkraft und Geschwindigkeit mit Erfolg in Wettbewerb treten kann.

Praktisch ausgeführt wurde in Amerika die Wechselstrom-Drehstrom-Lokomotive, nachdem hierfür Kummer schon im Jahre 1906 eingetreten ist und die M. F. O. auf der Seebach-Wettingener Strecke eine Umformerlokomotive erprobte.

Die Lokomotiven der Pennsylvania- und Norfolk- und Westernbahn sind mit diesem System ausgeführt worden.

Der der einpoligen Fahrleitung entnommene Einfachwechselstrom — bei den ausgeführten Bahnen beträgt die Periodenzahl 25/sec., die Betriebsspannung 11000 V — wird in einem ruhenden Transformator auf die Motorspannung umgeformt und dann in einem Spaltumformer — im Wesen eine Induktionsmaschine mit Käfiganker — in Zweiphasenstrom zerlegt. Durch entsprechende Zusammenschaltung entsteht Dreiphasenstrom, der den Triebmotoren zugeführt wird (Abb. 623).

Die Geschwindigkeitsregelung erfolgt wie bei Drehstromlokomotiven.

Dieses Betriebssystem weist alle Nachteile des Drehstrombetriebes bis auf die einfache Fahrleitung auf; dabei ist die Umformeranlage schwer und umständlich.

Tatsächlich weisen die ausgeführten Lokomotiven in Anbetracht ihrer enormen Leistung sehr große spezifische Gewichte auf. In diesem Belange wird die Sachlage bei kleineren Leistungen noch ungünstiger, so daß dieses System schon aus diesem Grunde keine Aussicht auf allgemeine Ausführung haben kann. Der Bahnbetrieb verlangt ein Stromsystem, welches unabhängig von der Größe der Leistung den wirtschaftlichen Bau und einen sparsamen Betrieb der Fahrzeuge ermöglicht. Die Leerlaufverluste des Spaltumformers und dessen schlechter $\cos \varphi$ spielen keine geringe Rolle.

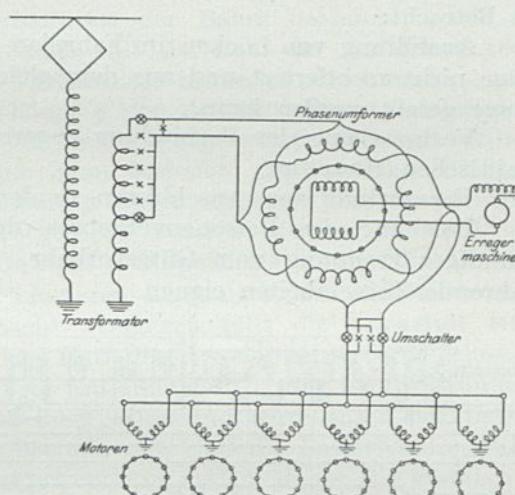


Abb. 623. Schaltbild der Umformer-Lokomotive der Norfolk-Western-Bahn. (Wechselstrom 11000 V Drehstrom).

VII. Speicherfahrzeuge.

Die Fahrleitung ist ein unerwünschtes Beiwerk des elektrischen Bahnbetriebes. Bei geringer Verkehrsichte belasten die Kosten des Kapitalaufwandes den Betrieb so, daß namentlich bei niedrigen Stromkosten eine in bezug auf den Stromverbrauch unwirtschaftlichere Betriebsart doch billiger zu stehen kommt, wenn nur die Fahrleitung entfällt. Die schlechte Ausnützung des Kraftwerkes verschlimmert in diesem Belang die Sachlage noch weiter. Andererseits ist bei schwachem Verkehr der Dampfbetrieb erst recht unwirtschaftlich, weil das Warmhalten des Kessels unverhältnismäßig große Brennstoffmengen verzehrt (40 kg/h und 1 qm Rostfläche), das Lokomotivgewicht verhältnismäßig sehr groß ist und die Personalkosten fast ebenso groß sind, als wenn die Lokomotive dauernd Dienst machen würde.

Die in der Hauptsache angedeuteten Übelstände der beiden Betriebsarten zu umgehen ist das Ziel des Speicherbetriebes. Derselbe kann jedoch nur dann in Betracht gezogen werden, wenn Verkehrsaufgaben mit gegebenen Grenzwerten in bezug auf die mit einer Ladung zurückzulegende Weglänge vorliegen.

Der Speicherwagenbetrieb kommt demnach für nachbenannte Betriebsaufgaben in Betracht:

Ausfüllung von Lücken im Fahrplan, wenn das Verkehrsbedürfnis volle Dampfzüge nicht rechtfertigt und aus dem gleichen Grunde Fahrleitungsbetrieb nicht ins Auge gefaßt werden kann.

Verbesserung der Verbindung engerer Bezirke mit ihrem wirtschaftlichen und politischen Hauptort.

Vermittlung von Anschlüssen zu den Zügen des Fernverkehres.

Belebung des Personenverkehrs durch häufigere Fahrglegenheit bei vollständiger Trennung vom Güterverkehr, für welchen sich größtmögliche langsam fahrende Zugseinheiten eignen.

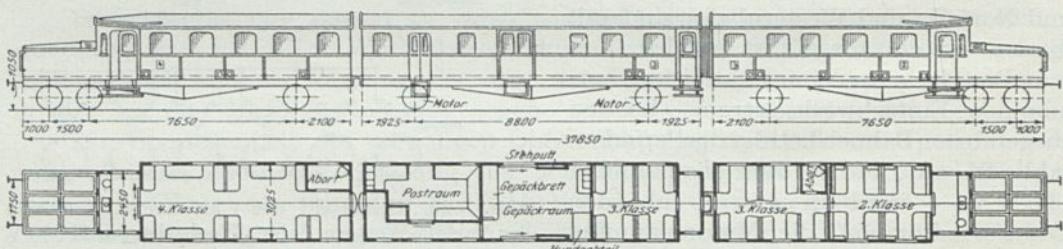


Abb. 624. Dreiteiliger Speicher-Triebwagen der preuß. Staatsbahnen.

Gewicht leer 85 t, besetzt 95 t. Elektrische Ausrüstung 2 Motoren je 85 und 95 PS, Speicher: 168 Elemente 245 kwh, 24 t. Gewicht, Reichweite 180 km, Geschwindigkeit (höchstens) 60 km.

Als besondere Eigenschaften dieser Betriebsart von Belang sind noch anzuführen: kein Arbeitsverbrauch bei Stillstand, dauernde Betriebsbereitschaft, große Überlastungsfähigkeit, Bedienung durch minderqualifiziertes Personal.

Beim Akkumulatorenbetrieb tritt gegenüber den benzinelektrischen Fahrzeugen die Einschränkung hinzu, daß dem Speicher nur eine bestimmte Arbeit entnommen werden kann.

Es sei a der Stromverbrauch in Wh für das Tonnenkilometer auf der in Frage kommenden Strecke, q t das Eigengewicht der Batterie für eine abgegebene KWh, so ist die ideelle Reichweite einer Batterie

$$L_b = \frac{1000}{aq} \text{ km}$$

und wenn das Zugsbrutto das n -fache des Batteriegewichtes beträgt, wird die Reich-

weite für den Zug:

$$L_z = \frac{1000}{aqn}.$$

Für vollkommen ebene Strecken wird $a = 20$ bis 25 Wh, bei besonders günstigen Verhältnissen 15 Wh. Nachdem Straßenbahnen und Gebirgsbahnen einen Verbrauch von 40 bis 60 Wh aufweisen, erscheint der Speicherbetrieb für diese ausgeschlossen, denn eine Reichweite von 30 bis 40 km kommt praktisch nicht in Betracht.

Eine z. B. $23,5$ t schwere Batterie gibt bei 310 V mittlerer Spannung etwa 245 KWh ab, sie wiegt ≈ 100 kg/KWh; bei einem $a = 4$ -fachen Zugsgewicht wird die Reichweite

$$L_z = \frac{1000}{20 \cdot 4 \cdot 0,10} = 125 \text{ km}.$$

Dieser Rechnungsgang gibt eine angeneherte Orientierung über die erzielbaren Verkehrsleistungen, er ist nicht für alle Fälle ohne weiteres anwendbar, weil a , q und auch n keine Festwerte sind, sondern von den jeweils vorliegenden Verhältnissen beeinflußt werden.

a ist bestimmt durch die Anlageverhältnisse der Bahn; nachdem a mit der Steigung, mit der Geschwindigkeit und auch mit der Zahl der Anfahrten rasch wächst, setzt der Speicherbetrieb günstige Verhältnisse in diesen Beziehungen voraus.

Auch q ist kein Festwert, vielmehr hängt q von der Entladezeit, andererseits auch von dem Wert der Leistung, die der Batterie zugemutet wird und schließlich von der Betriebsspannung ab. Wenn man bedenkt, daß niedrige Betriebsspannungen an sich zwar zu leichteren Bauarten führen, dagegen diese aus anderen Gründen nur bei kleineren Leistungen vorgesehen werden können, so stellt sich schließlich heraus, daß das spezifische Gewicht des Speichers wenig von der Betriebsspannung beeinflußt wird, weil bei kleineren Leistungen das nichtaktive Gewicht der Batterien relativ mehr ausmacht. Dagegen fällt die Kapazität einer Batterie sehr rasch durch Kürzung der Entladezeit; sie beträgt bei einstündiger Entladung nur 60% , bei zweistündiger Entladung 82% der bei dreistündiger Entladung vorhandenen Kapazität. Auch dieser Umstand wird unter praktischen Verhältnissen den Festwert q nur wenig beeinflussen, weil die Batterien im Bahnbetrieb nur für mehrstündigen Dienst Verwendung finden, daher die jeweils vorhandene größte Kapazität in Betracht zu ziehen ist.

Großen Einfluß auf das Gewicht hat die Bauart und der Baustoff der Platten.

Der Bleiakkumulator mit Masseplatten wiegt etwa 100 bis 120 kg/KWh; mit Gitterplatten nur etwa 45 kg. Dafür verträgt letztere Bauart nur etwa 200 Entladungen.

Die zulässigen Achsdrücke begrenzen die Kapazität der Batterie. Die Bestrebungen, das Batteriegewicht herabzusetzen und dadurch die Reichweite zu erhöhen, sind daher naheliegend.

Im Vergleich zu dem mit Bleiakkumulatoren erzielten spezifischen Gewicht von 45 und 120 kg/KWh weist der Nickel-Eisen-Akkumulator nur etwa 40 kg/KWh Eigengewicht auf; die Beschaffungskosten sind jedoch beträchtlich höher.

Der Wirkungsgrad des Bleiakkumulators erreicht 75% , im praktischen Betriebe 70 bis 72% . Der Wirkungsgrad des Nickel-Eisen-Akkumulators wird mit etwa 10% weniger angegeben. Durch das Mehrgewicht des mitgeschleppten Akkumulators wird der Wirkungsgrad der Zugförderung vorweg verschlechtert. Da das Gewicht des Nickel-Eisen-Speichers etwas geringer ist, wird ein Teil des schlechteren Wirkungsgrades hierdurch gegenüber dem Bleiakkumulator wett gemacht.

Wesentlich ist die Wahl der Betriebsspannung im Hinblick auf die Isolation der Batterie. Bei den Fahrzeugbatterien geht man nicht gerne viel über

300 Volt. Für Vollbahnbetrieb sind 168 Elemente als zweckmäßige Regelzahl gebräuchlich.

Aus Gründen der Gewichtswirtschaft und Haltbarkeit der Platten geht man mit abnehmender Leistung auch mit der Spannung herunter.

Nach anfänglichen argen Mißerfolgen hat sich der Speicherbetrieb für die oben umschriebenen Verkehrsaufgaben gut eingeführt.

Die mangelhafte mechanische Festigkeit der Platten war an den Mißerfolgen nicht wenig beteiligt. Das schwammförmige metallische Blei der negativen Platte hat die

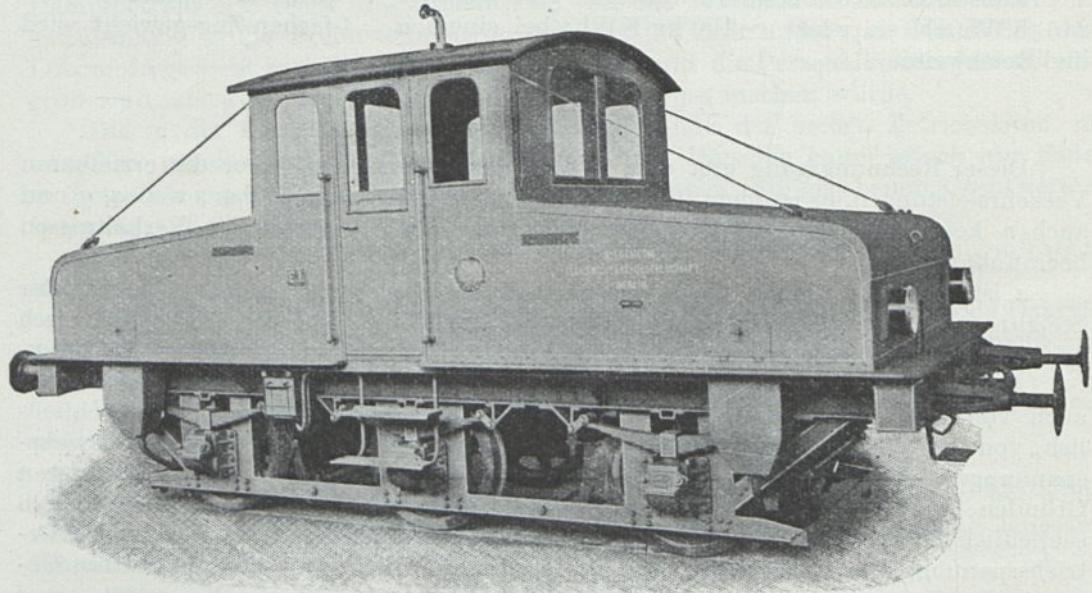


Abb. 625. 3 A. Speicher-Lokomotive für den Verschiebedienst der Eisenbahn-Werkstätten Tempelhof (A.E.G.).

Leistung	$2 \times 20 = 40$ PS/h	Gewicht	34,3 t
Geschwindigkeit	12 km/h	Kapazität	235 Ah., 75,3 kwh
Betriebsspannung	300 V.		

Neigung, während des Betriebes sich allmählich zusammenzuballen und eine festere Masse zu bilden. Hierdurch geht die Leistung der negativen Platte allmählich zurück. Um diesem Mangel vorzubeugen, setzt man der aktiven Masse chemisch indifferenten porösen Stoffe zu. Die Masse ist dann zum Eintragen in Gitterplatten nicht mehr geeignet. Bei den sogenannten Kastenplatten, die derzeit für mobile Zwecke vorwiegend Verwendung finden, sind die Gitter durch durchlöcherte Bleiblechplatten abgedeckt, wodurch das Herausfallen der aktiven Masse verhindert wird. Unter einem kann der Gitterrahmen großmaschiger hergestellt und daher eine größere Menge aktiver Masse in die Platte eingetragen werden, wodurch sich die Kapazität der Platte erhöht.

Abgesehen von der angedeuteten mangelhaften Festigkeit der Sammlerplatten waren die seinerzeitigen Mißerfolge einerseits darauf zurückzuführen, daß man dieser Betriebsart Aufgaben zuwies, der sie vorweg nicht gewachsen sein konnte: Straßenbahnbetrieb mit ungenügend gefederten Fahrzeugen; andererseits war die Anordnung der Batterien eine solche, die eine geordnete Wartung ausschloß. Seither umgeht man bei Fahrzeugen tunlichst das Zusammendrängen der Batterien in unzugängliche Räume und sorgt durch geeignete Vorrichtungen dafür, daß die einer Revision bedürftige Batterie bequem zugänglich (Abb. 624, 625) ist oder überhaupt betriebsmäßig mit einer Ersatzbatterie den Dienst wechseln kann.

Dieses System der abrollbaren oder abhebbaren Batterien birgt den weiteren Vorteil, daß das Fahrzeug während der Ladezeit nicht stillgelegt werden

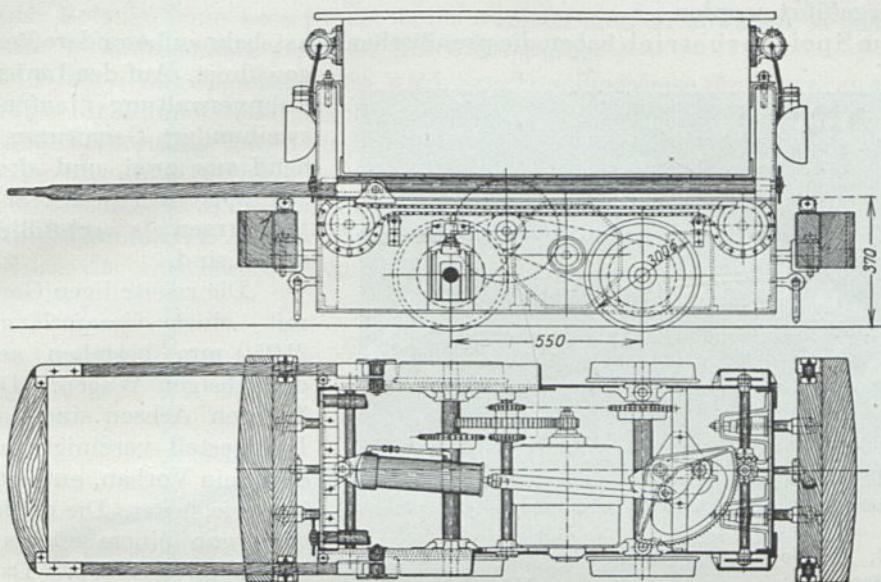


Abb. 626. Führerlose Akkumulatoren-Grubenlokomotive, Antrieb und Steuerung.

muß und daß weiter die Ladezeit auf einen vom Standpunkt der Stromerzeugung günstigen Zeitpunkt verlegt werden kann

In Steigungen von etwa 5% ist es meist wirtschaftlich, den Speicher überhaupt auf einem selbständigen Fahrzeug, einem Tender, unterzubringen.

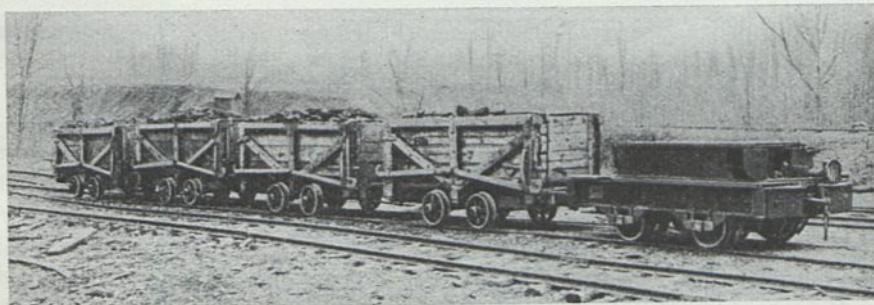


Abb. 628. Verschublok für Hütten- und Grubenbetrieb (G.E.C.).

Spurweite	60 mm	Zugkraft am Haken	450 kg
Gewicht	3,6 t	Geschwindigkeit	5,5 km/h
Batterie	42 Elemente 2,5 KWh.		

Diesbezüglich sei auf die Tatsache hingewiesen, daß in einer Steigung von 5% das angehängte Zugsgewicht etwa das 15-fache des Reibungsgewichtes beträgt; wird das Gewicht des Tenders äußerst gleichgroß dem Triebgewicht, bedeutet dies nur eine Verringerung der Anhängelast um etwa 7% .

Die elektromotorische Ausrüstung eines für Speicherbetrieb ausgerüsteten Fahrzeuges unterscheidet sich grundsätzlich in keiner Weise von einer solchen für Oberleitungsbetrieb. Trotz der erwünschten größtmöglichen Sparsamkeit in bezug auf den Stromverbrauch wird das Anfahren mit Vorschaltwiderständen bewerk-

stelligt, weil sich diese Schaltart als die einfachste erwiesen hat. Die Reihenparallelschaltung fehlt in keinem Falle. Ausführungen mit Verbundmotoren zur Nutzbremsung sind ausgeführt worden.

Dem Speicherbetrieb haben die preußischen Staatsbahnen besondere Beachtung gewidmet. Auf den Linien dieser Bahnverwaltung laufen etwa zweihundert Garnituren, bestehend aus zwei und drei kurzgekuppelten Fahrzeugen, deren Bauformen als vorbildlich anzusehen sind.

Die zweiteiligen Garnituren mit einer Gesamtlänge von 25950 mm bestehen aus zwei dreiachsigen Wagen. Die zwei äußeren Achsen sind in einem Drehgestell vereinigt, auf welchem ein Vorbau, enthaltend die Batterie, lastet. Die dritte Achse wird von einem 80 bis 90 PS-Motor angetrieben. Das Leergewicht dieser etwa 100 Personen fassenden Garnitur beträgt 68 t, wovon 25,5 t, d. s. 146 kg/KWh, auf die Batterie entfallen. Der Zug ist für 60 km/h Höchstgeschwindigkeit und 180 km Reichweite gebaut. Der mechanische Teil wiegt 33,5 t, d. h. 335 kg je Fahrgast und 745 kg für 1 qm nutzbare Bodenfläche, insgesamt 1500 kg/qm Bodenfläche.

Abb. 627. Plattformwagen für Speicherbetrieb (B.B.C.).

Spurweite	600 mm
Eigengewicht	1,85 t
Ladegewicht	3,5 t
Elektrische Ausrüstung 1 Motor 1,5 PS-Leistung	
Batterie	40 Elemente, 2,4 KWh.

fallen. Der Zug ist für 60 km/h Höchstgeschwindigkeit und 180 km Reichweite gebaut. Der mechanische Teil wiegt 33,5 t, d. h. 335 kg je Fahrgast und 745 kg für 1 qm nutzbare Bodenfläche, insgesamt 1500 kg/qm Bodenfläche.

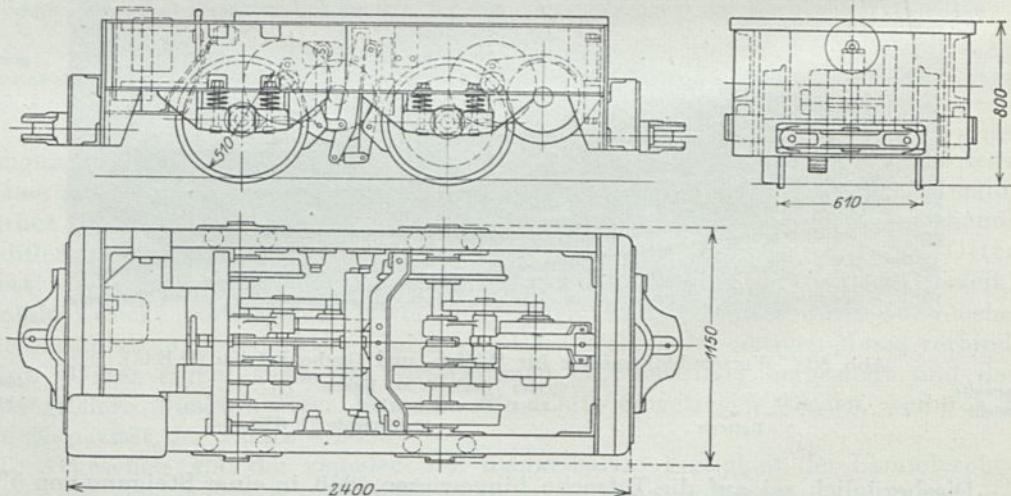


Abb. 629. Speicher-Grubenlokomotive mit geringer Bauhöhe (G.E.C.).

Spurweite	610 mm	Gewicht	3,6 t
Zugkraft am Haken	450 kg	Geschwindigkeit	5,5 km/h
Batterie	42 Elemente, 2,5 KWh.		

Die dreiteiligen Züge (Abb. 624) sind den zweiteiligen ähnlich, nur ist zwischen beide dreiachsigen Außenwagen ein dritter zweiachsiger Wagen geschaltet. Diese Garnitur ist 38950 mm lang bei einem Leergewicht von 85 t. Der Fassungs-

raum beträgt 118 Personen und ein Post- und Gepäckabteil. Die nutzbare Bodenfläche ca. 82 qm, somit das Totgewicht 1030 kg/qm. Die Ausnutzung ist nicht nur in diesem Belange eine bessere als beim zweiachsigen Triebwagen, sondern auch wegen des verhältnismäßig geringen Luftwiderstandes.

Der Betrieb mit Speicherwagen wird zweckmäßigerweise für Untersuchungsfahrzeuge für Tunnels oder Hochspannungsoberleitungen vorgesehen.

Große Verbreitung haben in Fabriks-, Hütten und Grubenbetrieben jeder Art Plattformwagen mit Speicher gefunden, weil sie überall dort hinfahren können, wo die Fahrleitung z. B. wegen des Kranbetriebes nicht angebracht werden kann und Dampflokomotiven wegen Feuersgefahr, Beschmutzung der Räume, ungenügende Höhe der Durchfahrt nicht zugelassen werden können (Abb. 627, 628, 629).

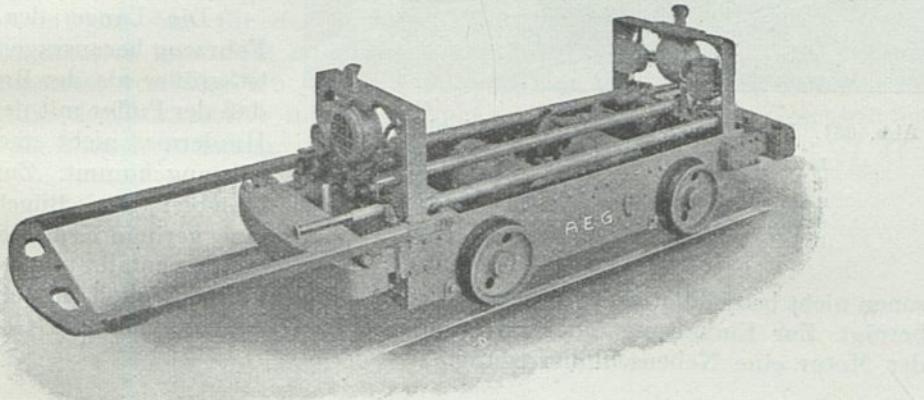


Abb. 630. Speicher-Lokomotive der Abb. 631 Akkumulatoren abgehoben, vorgestreckter Führer sichtbar.

Plattformwagen werden bis zu Spurweiten von 450 mm, Tragfähigkeit 3,5 t, Eigengewicht 1,35 t, Batteriekapazität 2,5 KWh gebaut. Setzt man leere Rückfahrten im Betrieb voraus und einen Stromverbrauch von 25 Wh/tkm, so können mit diesem Fahrzeug 14 Tonnenkilometer Nutzlast befördert werden. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 5 bis 7 km/h. Im Fahrzeug ist ein 1,5 PS Motor eingebaut.

Die Typen bis zu zweimal 10 PS, 4,5 bis 10 km/h, 15 t Tragkraft werden noch mit 75 Volt Betriebsspannung ausgeführt. Für die nächste Reihe sind 150 Volt Betriebsspannung vorgesehen.

Diese Plattformwagen eignen sich dank ihrem großen Gewicht nicht nur zum Aufladen von Lasten, sondern auch zum Schieben von anderen Fahrzeugen.

Eine bemerkenswerte Anwendung der elektrischen Zugkraft stellen die führerlosen Lokomotiven dar (Abb. 626, 630, 631).

Der Führer ist bei diesen durch einen selbsttätigen Steuerapparat ersetzt, der die Lokomotive in Bewegung setzt und wieder anhält, sobald sich irgendein Hindernis auf dem Geleise befindet oder die Strecke absichtlich gesperrt ist. Da der Zug keinen Mitfahrer braucht, sind verhältnismäßig kleine Zugseinheiten, wie sie z. B. bei Pferdeförderung gebräuchlich waren, noch wirtschaftlich. Es können die früher in Gebrauch gewesenen Hunte beibehalten werden.

Die Maße der führerlosen Lokomotive können so niedrig gehalten werden, als es die gebräuchlichen kleinsten Stollenquerschnitte verlangen.

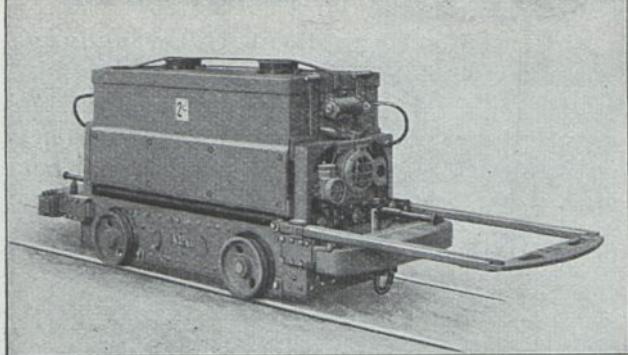
Die Lokomotive besitzt ein zweiachsiges ungefedertes Rahmengestell. Die beiden Achsen treibt ein Motor mittelst doppelter Übersetzung an. Die Steuerung des Motors erfolgt durch einen Bügel aus Holz, der auf der Lokomotive schlittenartig

geführt ist und sich beim Auftreffen auf irgendein Hindernis bis zur Puffervorderkante hineinschieben kann. Bei diesem Vorgang wird vermittelst eines Ketten- oder Zahnrädergetriebes diese Bewegung auf die Walze des Fahrschalters übertragen, die den Motor abschaltet und bremst. Der Zug eines durch Glyzerin gebremsten Federapparates sorgt dafür, daß der Bügel immer wieder von selbst herausgeschoben und der Motor eingeschaltet wird, sobald die Strecke frei ist.

Die Länge des über das Fahrzeug herausragenden Bügels ist größer als der Bremsweg, so daß der Puffer mit dem etwaigen Hindernis nicht mehr in Berührung kommt. Zum Hineinschieben des Bügels ist nur eine geringe Kraft nötig, so daß gegebenenfalls angefahrenen Personen nicht beschädigt werden können, zumal die Geschwindigkeit nur etwa 1 m/sec beträgt. Zur Einhaltung einer unveränderlichen Geschwindigkeit im Gefälle erhält der Motor eine Nebenschlußerregung.

Abb. 631. Führerlose Akkumulatoren-Grubenlokomotive.

Leistung	4,0 PS/h
Spannung	60 V
Geschwindigkeit	4,6 km/h
Gewicht	2,5 t
Batterie	74 A/h



Der Steuerbügel läßt sich über die Batterie hinwegklappen und nach der anderen Seite hinauslegen. Dabei wird der Motor auf die andere Fahrtrichtung geschaltet. Die Lokomotive ist mit Scheinwerfer beleuchtet, so daß sie jederzeit gesehen werden kann.

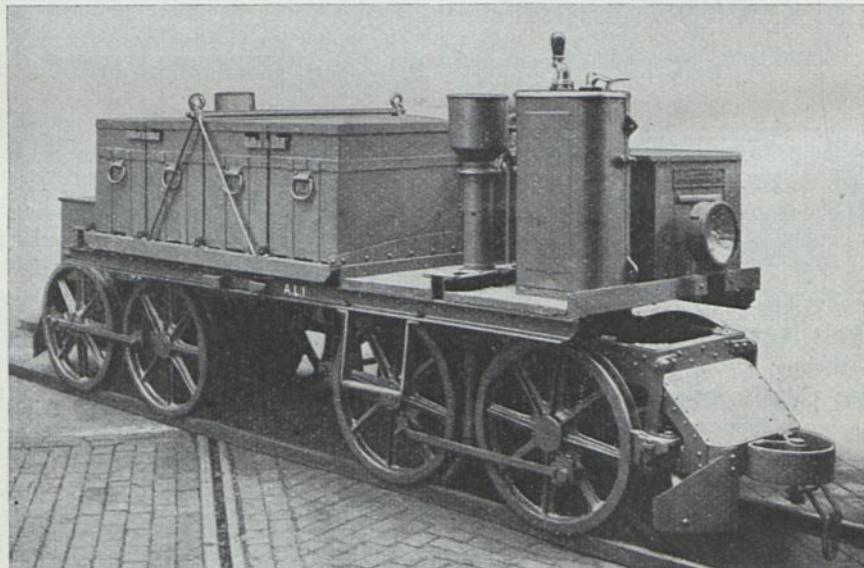


Abb. 632. B + B zweimotorige Feldbahnlokomotive (O.S.S.W.).

Regelleistung	2×8 PS	Batterie	35 KWh
Gewicht	4 t	Gewicht	1,75 t.

Der Steuerbügel läßt sich über die Batterie hinwegklappen und nach der anderen Seite hinauslegen. Dabei wird der Motor auf die andere Fahrtrichtung geschaltet.

Die Lokomotive ist mit Scheinwerfer beleuchtet, so daß sie jederzeit gesehen werden kann.

Durch geeignete Anschläge kann dafür gesorgt werden, daß sich die Lokomotive die Wettertüren selbst öffnet und die gewünschten Weichen umstellt.

Die Leistung der Lokomotive beträgt 80 bis 100 tkm in einer achtstündigen Schicht. Die Batterie besteht aus 30 Elementen von 108 Ah bei dreistündiger Entladung. Das Gewicht der Lokomotive beträgt 2,5 t.

Bei Schichtwechsel wird die Batterie abgerollt und durch eine andere inzwischen aufgeladene Batterie ersetzt.

Zur Durchführung der Rangierbewegung wird der Bügel hochgelegt und die Steuerung von Hand betätigt.

Die vollständige Geräuschlosigkeit des Speicherbetriebes, der mit keinerlei Rauchentwicklung oder Lichterscheinung verbunden ist boten Gelegenheit, dieses Zugförderungsmittel im Kriege in unmittelbarer Nähe der Front zu verwenden.

In Abb. 631 ist eine für das flüchtige Feldbahngleis mit nur 1 t Achsdruck gebauten Lokomotive mit leicht auswechselbarer Batterie dargestellt. Die Batterie hat eine Kapazität von 35 KWh (46 kg/KWh). Es sind zwei Motoren von je 8 PS vorhanden, die der Lokomotive mit einer Anhängelast von 10 t eine Geschwindigkeit von 6 bis 8 km/h verleihen. Alle Achsen sind angetrieben.

Sechster Teil.

Wirtschaftliche Fragen.

I. Finanzielle Grundlagen.

Literatur:

- Adolph. Mindest- und Kilometerfahrpreise bei verschiedenen Verkehrsunternehmungen.
Bussebaum. Allgemeine technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte für die Bildung von Straßenbahntarifen. E.K.B. 1916. H. 3.
Haas. Die Rückstellungen bei Elektrizitätswerken und Straßenbahnen. Verl. Julius Springer, Berlin 1916.
Stahl. Tariffragen. E.K.B. 1916. H. 22.
Trautvetter. Elektrische Straßenbahnen und straßenbahnähnliche Vorort- und Überlandbahnen.
Verl. Julius Springer, Berlin 1913.
Trautvetter. Linienführung elektrischer Bahnen. Verl. Julius Springer, Berlin 1920.

Die Eisenbahnen im allgemeinen, demnach auch die elektrischen Bahnen, haben Aufgaben volkswirtschaftlicher Natur zu erfüllen. Unabhängig von dieser mit keiner direkten Handelsbilanz erfaßbaren Aufgabe muß verlangt oder zumindest angestrebt werden, daß jedes Eisenbahnunternehmen für sich ein finanzielles Gleichgewicht zwischen Einnahmen und Ausgaben erzielt.

Als besondere Forderung für den elektrischen Betrieb ist die Bedingung aufzustellen, daß dieser sich im Endergebnis nicht ungünstiger stelle als die früher in Verwendung gestandene Betriebsart.

In der überwiegenden Anzahl der Fälle stehen sich Dampfbetrieb und elektrische Zugförderung gegenüber.

Je nachdem die Aufgabe gestellt ist, eine neue Bahnanlage zu bauen oder nur die Betriebskraft einer bereits bestehenden und in Betrieb befindlichen Eisenbahn zu ändern, wird die Frage der Rentabilität überhaupt zu beantworten oder die wirtschaftliche Überlegenheit des elektrischen Betriebes nachzuweisen sein.

Zur Prüfung des voraussichtlichen finanziellen Ergebnisses einer Bahnanlage sind die voraussichtlichen Einnahmen und die zu erwartenden Ausgaben auszuwerten und einander gegenüber zu stellen.

Für beide dienen die Ergebnisse der gerade im Eisenbahnwesen mit Sorgfalt gepflegten Statistik als Kontrolle der für den jeweils vorliegenden Sonderfall durchgeführten Rechnung. Diesbezüglich steht so reichhaltiges Material zur Verfügung, daß man die Vorberechnungen mit großer Sicherheit durchführen kann.

Die in Verbindung mit dem Weltkrieg eingetretene Zerrüttung des Geldmarktes hat zur Folge, daß Ziffern über Preise und Kosten, die auch nur einigermaßen Anspruch auf Zuverlässigkeit erheben könnten, nicht gegeben werden können.

Die Rentabilitätsrechnung wird in bezug auf die Geldwerte zur reinen Spekulation. Einer genügend genauen Bewertung entzieht sich nur das gewissen Gesetzen unterworfenen Verkehrsbedürfnis nicht. Die diesen entsprechenden voraussichtlichen Einnahmen müssen dann auf Grund der örtlichen Verhältnisse erhoben werden.

Ebenso können zur Auswertung der Betriebsausgaben nur die für bestimmte Verkehrsleistung erforderlichen sachlichen Aufwendungen und die mit bestimmten Einrichtungen erzielbaren Verkehrsleistungen herangezogen werden, nicht die hierfür aufgewendeten Kosten.

In den nachstehenden Betrachtungen werden in erster Reihe die bei Straßenbahnen vorliegenden Verhältnisse ins Auge gefaßt. Grundsätzlich der gleiche Gedankengang gilt auch für Bahnen anderer Art.

Die Frequenz einer Straßenbahn steht in einem gewissen Zusammenhang in erster Reihe mit der Größe bzw. der Bevölkerungszahl des Stadtgebietes, welches als Anzugsgebiet in Betracht kommt. Neben der Bevölkerungszahl ist die Dichte der Besiedelung, besondere örtliche Verhältnisse, Art der Beschäftigung der Bevölkerung von Einfluß auf die Verkehrsziffer.

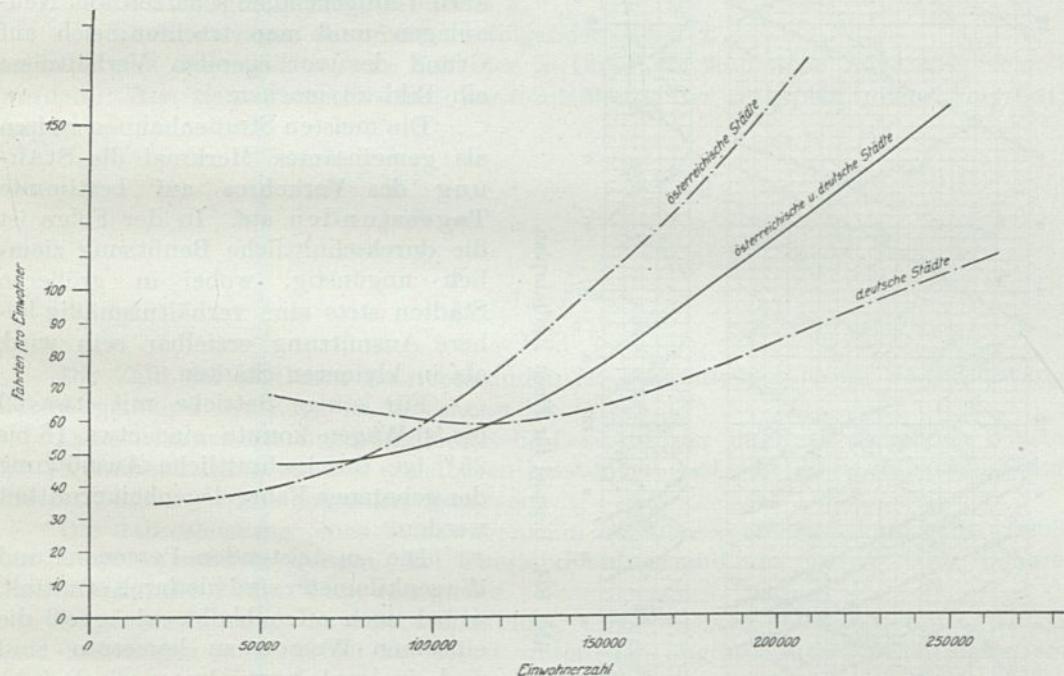
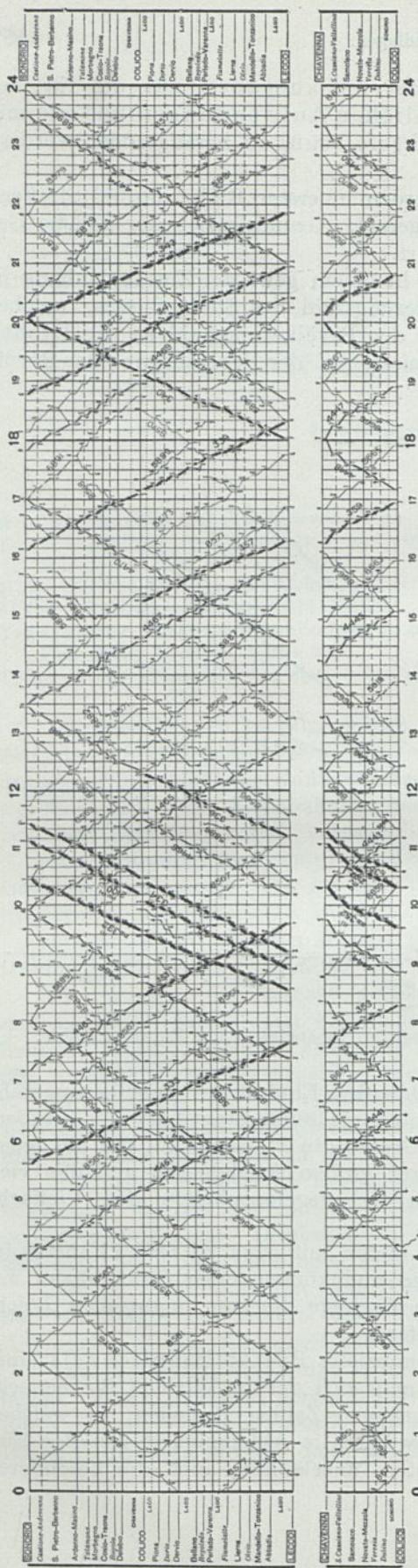


Abb. 633. Jährliche Anzahl der Straßenbahnfahrten in Abhängigkeit der Einwohnerzahl.

Diese Umstände verschleiern einigermaßen den Einfluß der Bevölkerungszahl. Soviel steht jedenfalls fest, daß Städte von weniger als 30 000 Einwohner eine Straßenbahn kaum mehr erhalten können und daß Großstädte in bezug auf die auf jeden Einwohner entfallende Fahrtenzahl dank ihrer großen Ausdehnung und den vielfachen Handelsbeziehungen und zerstreuten Arbeitsgelegenheiten das Vielfache kleinerer Städte aufweisen.

Kleinstädte mit etwa 30 000 Einwohner bilden mit etwa 25 bis 30 Fahrten im Jahr für jeden Einwohner die untere Grenze und können einer Straßenbahn mit etwa 4 bis 6 km Länge und 5 bis 10 Minuten Zugfolge die zum finanziellen Gleichgewicht erforderliche Zahl der Reisenden liefern.

Um die erste Voraussetzung für die finanzielle Bestandmöglichkeit einer Straßenbahn angenähert klarzustellen, kann man sich der in Abb. 633 für deutsche und österreichische mittelgroße Städte angegebenen Zahlen bedienen, in welchen die Erfahrungszahlen der Fahrten eines Einwohners in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl dargestellt sind. Daneben bleibt es unerlässlich, auch die besonderen



Wirtschaftliche Fragen.

Umstände, die die Frequenz in günstigem oder ungünstigem Sinne beeinflussen können, auf ihre Tragweite zu prüfen.

Wenn solcherart die Einnahmequelle festgestellt ist, kann auf Grund der den örtlichen Verhältnissen angepaßten Fahrpreise der Betrag der Einnahmen errechnet werden.

In bestehenden Betrieben mit ge-
staffelten Tarifen läßt sich diese Frage
aus der Anzahl der verkauften Fahr-
karten einigermaßen schätzen. Bei Neu-
anlagen muß man trachten, sich auf
Grund der vorliegenden Verhältnisse
ein Bild zu machen.

Die meisten Straßenbahnen weisen als gemeinsames Merkmal die Stauung des Verkehrs auf bestimmte Tagesstunden auf. In der Folge ist die durchschnittliche Benützung ziemlich ungünstig, wobei in größeren Städten stets eine verhältnismäßig höhere Ausnützung erzielbar sein wird, als in kleineren Städten.

Für einige Betriebe mit etwa 30 bis 50 Wagen konnte eine etwa 16 bis 25%ige durchschnittliche Ausnützung der gebotenen Fahrgelegenheit ermittelt werden.

Die zu leistenden Personen- und Wagenkilometer sind hiedurch ermittelt, wobei noch offen bleibt, wie groß die einzelnen Wagen zu bemessen sind und in welchem Ausmaß Triebwagen und Anhänger an der Verkehrsleistung teilnehmen.

Die Größe des Triebwagens wird richtig bemessen sein, wenn derselbe allein den mittleren Verkehr bewältigen kann, wobei die Zugfolge so zu bemessen ist, daß dem Reisenden im allgemeinen selbst dann noch ein Zeitgewinn aus der Trambenützung erwächst, wenn er eben erst einen Zug versäumt hat. Nach der anderen Richtung begrenzt die Wagengröße die Leistungsfähigkeit des Schaffners im Fahrscheinverkauf. In diesem Belange kann ein einfaches Tarifsystem die Leistung des Schaffners ganz bedeutend steigern.

Die Beschaffung von Anhängewagen hat zum Ziele, den Spitzenverkehr zu bewältigen.

Die Motorleistung des einzelnen Triebwagens wird bei dieser Betriebsweise reichlicher zu bemessen sein, als wenn ausschließlich oder überwiegend allein fahrende Triebwagen verwendet werden. Der Wirkungsgrad der im Mittel weniger beanspruchten Motoren wird sich nur unwesentlich verschlechtern, dafür werden die Motoren im Mittel weniger angestrengt auch zu geringeren Reparaturkosten Anlaß geben.

Aus der regelmäßig gedachten Zugfolge, Streckenlänge und Reisegeschwindigkeit bestimmt sich die Zahl der gleichzeitig in Dienst zu stellenden Züge.

Ist die Zugfolge t min,

- die Betriebslänge der Strecke L km,
- die gesamte Fahrzeit über die Strecke T min,
- die Reisegeschwindigkeit v km/h,

die Entfernung der einander folgenden Züge L' ,

so kann aus diesen Größen die Zahl der in Dienst zu stellenden Züge n berechnet werden. Aus dem geometrischen Zusammenhang der Fahrplanlinien (Abb. 634) folgt, daß

$$\begin{aligned} \frac{t}{T} &= \frac{L'}{L}; & T &= \frac{nt}{2}; \\ L^m &= \frac{v^{\text{km/h}} T'}{60} & L' &= \frac{20t}{60n} = \frac{vt}{n} \\ n &= \frac{120 L^{\text{km}}}{v^{\text{km/h}} t}. \end{aligned}$$

Die Zahl der täglichen Betriebsstunden ist bekannt, woraus die Jahresleistung der Wagen und der Züge zu berechnen ist.

Die solcherart errechnete kilometrische Leistung der in Dienst stehenden Wagen in Gegenüberstellung zu den erzielbaren Leistungen gestattet einen Rückschluß auf die tatsächlich zu beschaffenden Reserven.

Die Jahresleistung eines Triebwagens im Straßenbahnbetrieb kann mit 40 000 bis 50 000 km beziffert werden. Bei Überlandbahnen sind um 50 bis 100 % höhere Jahresleistungen nichts Ungewöhnliches.

Die Jahresleistung von Vollbahnlokomotiven ist vielfach nicht ausgenützt, jedoch sind Leistungen von 100 000 km selbst unter den ungünstigsten Verhältnissen erzielt worden.

Zur Orientierung mögen einige Angaben aus den Betriebsergebnissen einiger Straßenbahnen genannt sein:

	Verkehrsleistung	Wien	Graz	Brünn
Wagenkilometer für das Streckenkilometer	363 000	142 000	138 500	
" " " Gleisekilometer	170 000	102 000	71 500	
Anhängewagenkilometer in % der Triebwagenkm.	101,3	38,2	34,7	
Personalstand/Streckenkilometer	30	—	18	
Geleistete Wagenkilometer je Mann	5650	—	—	
Von einem Wagenführer geleistete Wagenkilometer	15 250	—	—	
Wagenzahl/Streckenkilometer	12,1	4,7	4,75	
Triebwagenzahl/Streckenkilometer	6	2,9	2,5	
Jahresleistung km eines Triebwagens	30 500	44 000	42 500	
Beförderte Personen je Wagenkilometer	3,6	3,1	4,9	
Kosten der Bahnerhaltung				
% von den reinen Betriebsausgaben	8%	6%	7,5%	
Erhaltungskosten der Fahrzeuge %	10%	12,5%	15%	
Stromkosten %	10%	14%	25%	
Stromverbrauch/Rechnungskilometer Wh.	690	770	832	

(Die Angaben beziehen sich auf die Zeit vor dem Kriege.)

Für Stadtbahnen sind ähnliche Erwägungen durchzuführen, wobei im Hinblick auf die hohen Anlagekosten die größte Sorgfalt in jeder Richtung geboten erscheint. Besonders bei Stadtbahnen wird zu prüfen sein, mit welcher Reisendenzahl mit aller Wahrscheinlichkeit zu rechnen ist. In diesem Belange werden außer Vergleichszahlen anderer Bahnen und den besonderen örtlichen Verhältnissen zu prüfen sein, ob nicht etwa eine Sättigung des Verkehrsbedürfnisses durch andere konkurrenzfähige Verkehrseinrichtungen bereits vorliegt. Es werden demnach nicht nur die Verkehrszzahlen von Stadtbahnen, sondern die Verkehrsstatistik in ihrer Gesamtheit zum Vergleich heranzuziehen sein, ebenso das Wachstum des Verkehrsgebietes und die Besiedlungsmöglichkeiten der Umgebung.

Millionenstädte — nur für solche ist mit dem Bau von Stadtbahnen zu rechnen — weisen 250 bis 500 Fahrten alles in allem (Autobus, Straßenbahn, Stadtbahn) für den Einwohner im Jahresmittel auf. Die Frequenz der Stadtbahnen — gemeint sind unter diesem Namen elektrische Stadtschnellbahnen — erreicht 2,5 bis 6,0 Millionen Reisende für das Betriebskilometer. (Ergebnisse 1913 Paris-Metro 5,0, Berlin 3,2, New-York 4,8 und 6,0 Millionen; der Krieg dürfte diese Zahlen wesentlich gesteigert haben.)

II. Lebensdauer der der Abnutzung unterworfenen Bestandteile.

Mattersdorf. Normung und Wartung. V.T. 1921. Nr 24.

Stahl. Abnutzung und Lebensdauer der wesentlichsten Teile des rollenden Materials bei der Straßenbahn. J.T.K.V. 1908.

Pirch. Winke zur Erzielung von Strom- und Betriebsmaterialersparnissen in Straßenbahnbetrieben. V.T. 1921. Nr. 230.

In Ermangelung von allgemein gültigen Zahlenwerten über die Betriebskosten muß man in jedem einzelnen Falle versuchen, diese für das betreffende Wirtschaftsgebiet an Hand der Lebensdauer, der Erhaltungskosten und des Verbrauchs an Betriebsstoffen zu ermitteln.

Für den Oberbau hat man auf Grund der unzutreffenden Voraussetzung, daß der elektrische Betrieb infolge Fehlens der hin- und hergehenden Massen den Oberbau weniger in Anspruch nimmt als Dampflokomotiven mit verhältnismäßig längerer Lebensdauer gerechnet und sich zur Anwendung verhältnismäßig leichter Oberbau-systeme verleiten lassen. Hiebei blieb meist die ungeahnte Verdichtung des Verkehrs gegenüber dem Pferde- und Dampfbetrieb ebenso unbeachtet, wie der Umstand, daß überall dort, wo Untergestellmotoren verwendet werden, die Achsen mit einem viel größeren ungefederten Gewicht belastet sind, als dies bei Dampflokomotiven der Fall ist.

Es hat sich die Erkenntnis durchgerungen, daß für Straßenbahnen der schwerste Oberbau gerade noch gut genug ist; trotzdem man keine höheren Achsdrücke (in Europa) als 6 bis 8 t findet, werden Schienen bis 60 kg l. m. Gewicht eingebaut. Der höhere Kapitalaufwand macht sich durch niedrige Betriebskosten, geringen Stromverbrauch, Schonung der Fahrzeuge reichlich bezahlt.

Für Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird man gut tun, die Lebensdauer des Oberbaues in scharfen Krümmungen, Weichen und Kreuzungen nicht über 8 bis 12 Jahre anzusetzen, wogegen für das gerade Gleise mit einer Lebensdauer von 15 bis 25 Jahren zu rechnen ist.

Für die Fahrleitungsmaste aus Eisen kann man, von Zufallsschäden abgesehen, eine unbegrenzte Lebensdauer annehmen. Jedenfalls wird bei guter Instandhaltung diese Lebensdauer mit mehr als 25 bis 30 Jahren anzunehmen sein, wogegen für Holzmaste kaum mehr als 10 bis 12 Jahre angenommen werden können.

Das Spannwerk unterliegt der Verrostung und wird innerhalb 15 bis 20 Jahren zu erneuern sein. Ebenso die Hartgummiisolation. Nach vorliegenden Erfahrungen ist die Lebensdauer der Porzellanisolatoren unbegrenzt; jedenfalls bei den meistens bestehenden Anlagen ein Ersatz für absehbare Zeit nicht zu erwarten.

Einer von der Fahrleistung abhängigen Abnützung unterliegt der Fahrdräht. Die Abnützung darf nicht so weit getrieben werden, daß die mechanische Festigkeit gefährdet wird.

Bei einer mit hochgespanntem Gleichstrom betriebenen Anlage wurde ermittelt, daß ein 100 mm²-Fahrdräht in einem Betriebsjahr durch 18250 Stromabnahmen eine Abnützung von 0,14 mm, im Durchmesser gemessen, erfahren hat. Für diesen Fahrdrähtquerschnitt wird eine Verringerung des Durchmessers um etwa 3,0 bis 3,5 mm als zulässig erachtet, so daß sich hieraus eine Lebensdauer von etwa 22 Jahren errechnet. Bei Straßenbahnen kann man in einem Jahre mit bis 350 000 Stromabnahmen rechnen, so daß sich die Lebensdauer entsprechend auf 8 bis 10 Jahre herabdrückt.

Bezüglich der Abnützung der Rückleitung können bei der Vielartigkeit der Systeme einigermaßen zuverlässige Angaben nicht gemacht werden. Der Zustand und die Widerstandsfähigkeit des Oberbaues ist diesbezüglich ein entscheidender Faktor, wenn ein an sich gutes Verbinderystem angewendet wurde. Im letzteren Fall liegt kein Grund vor, für die Schienenverbinder mit einer anderen Lebensdauer zu rechnen als für die Schienen.

Für die Fahrzeuge als Ganzes betrachtet kann man mit einer 25 bis 30 jährigen Lebensdauer rechnen, indem selbst die primitiven Fahrzeuge aus der Erstlingszeit der elektrischen Zugförderung trotz ihrer Unvollkommenheit noch nach 15 bis 20 Jahren in Benutzung standen und stehen.

Unabhängig von dieser das ganze Fahrzeug betreffenden Lebensdauer sind die einzelnen Bestandteile einer mehr oder weniger starken Abnützung unterworfen.

Die Lebensdauer der Radreifen kann mit 70 bis 80 000 Wagenkilometer angesetzt werden. Griffträder (Hartgußräder) weisen etwa die halbe Laufzeit auf.

Nach technisch einwandfreien Grundsätzen gebaute Achsen haben eine unbegrenzte Lebensdauer. Wenn Brüche vorkommen, so sind sie auf Material- oder Erzeugungsfehler zurückzuführen.

Für Bahnmotoren ist mit einer Lebensdauer von 25 bis 30 Jahren zu rechnen, wobei deren einzelne Bestandteile mehrfach Auswechslungen erfahren.

Achslager halten 30 000 bis 40 000 und Traglagerschalen 50 000 bis 60 000 Wagenkilometer aus, sorgfältige Instandhaltung und gute Schmierung vorausgesetzt. Bei der Instandhaltung ist insbesondere durch Spaltkeile stets zu prüfen, ob die Lager nicht etwa schon über das erlaubte Maß ausgelaufen sind. Für Straßenbahnmotoren gelten als Höchstmaß 0,5 mm. Der Zustand der Lager ist bestimmd für die Lebensdauer der Zahnräder. Der Zahneingriff ist nur dann einwandfrei und findet eine Berührung der Zähne in voller Breite nur dann statt, wenn Ankerwelle und Tragachse parallel liegen.

Die Lager von Bahnmotoren, insbesondere der schmalspurigen Type sind verhältnismäßig hoch beansprucht, es darf daher nur hochwertiges Lagermetall (80 bis 90 % Cu, 17 bis 9 % Sn, 0,76 P) verwendet werden.

Bei Motoren mit Leistungen bis etwa 60 bis 70 PS scheinen sich zweckmäßig gebaute Kugellager zu bewähren. Berichte über Lebensdauer liegen noch nicht vor.

Der Ölverbrauch beträgt bei regelspurigen Triebwagen für das Kilometer $\sim 0,75$ g, bei meterspurigen Wagen etwa 1,79; dieselben Zahlen für Anhängewagen sind 0,63 bzw. 0,96 g/km.

Die großen Zahnräder, für welche eine Ölschmierung vorzusehen ist, da nur bei dieser eine Erneuerung des Schmierstoffes an den Zähnen nach jeder Abwälzung

erfolgt, laufen etwa 300000 km, Stahlguß als Baustoff vorausgesetzt. Auswechselbare Zahnkränze aus hochwertigen Stahlsorten oder auch Bronze laufen noch länger; zuverlässige Zahlenwerte liegen hierüber nicht vor.

Die Ritzel aus Siemens-Martinstahl laufen unter den gleichen Voraussetzungen 50 bis 60000 km. Der Zahndruck beträgt etwa 18 kg/cm Zahnbreite. Härtung der Ritzel, sorgfältige Herstellung der Verzahnung steigert wesentlich die Lebensdauer des Vorgeleges. Die Steigerung der Lebensdauer ist nicht so sehr vom Standpunkt der Kosten der zu ersetzenen Bestandteile von Wichtigkeit, sondern wegen der für den Ein- und Ausbau aufzuwendenden Löhne und dem Verdienstentgang durch Abstellen der Wagen.

Außer diesen Bestandteilen unterliegen am Motor noch der Kollektor und die Bürsten einer regelmäßigen mechanischen Abnützung. Für beide ist es von Wichtigkeit, daß der Bürstendruck 0,4 bis 0,5 kg/cm² nicht übersteigt.

Die für Straßenbahnmotoren gebräuchlichen, nicht zu harten Kohlenbürsten nützen sich nach einem Lauf von 1000 Wagenkilometern um etwa 1,2 mm ab. Dabei soll auch die Umfangsgeschwindigkeit der Kollektoren im Betrieb 30,0 bis 35,0 m/sec nicht übersteigen. Ein Straßenbahnmotor hat meist 4 Bürsten.

Glimmer und Kupfer haben nicht die gleiche Wärmeausdehnung, es ist für den einwandfreien zylindrischen Zustand der Oberfläche des Kollektors zweckmäßig den Glimmer zwischen den Lamellen etwa 1,5 mm tief auszukratzen. Geschieht dies nicht, dürfen die Kollektoren nur in kaltem Zustand geschmiegelt werden, weil sonst nach dem Abkühlen der Glimmer herausragt.

Straßenbahnkollektoren nützen sich etwa 0,5 mm auf 1000 km ab. Die gebräuchlichen Motoren lassen eine Abnützung um 18 bis 25 mm im Radius zu, woraus sich die Lebensdauer eines Kollektors berechnen läßt.

Durch den ununterbrochenen Wechsel der Erwärmungen und Abkühlungen leidet die Isolation der Wicklungen, und zwar meist mehr diejenige des Ankers als des Feldes. Letztere sind mehr durch Eindringen von Feuchtigkeit und Öl gefährdet. Demzufolge kann man wenigstens für Straßenbahnmotoren mit einer Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren für die Wicklungen rechnen; der Altwert der Wicklungen ist mit mindestens 30 bis 40 % der Ersatzkosten zu bewerten.

Den Fährnissen des Betriebes sind insbesondere die Widerstände ausgesetzt, so daß das aktive Material derselben meist nach etwa zehn Jahren ersetzt sein wird.

Die Fahrschalter erfüllen noch nach 20 Jahren gut ihren Zweck, wenn auch ihre einzelnen Bestandteile, dem Werte nach etwa das Drittel ihres Anschaffungspreises, in dieser Zeit etwa zweimal ausgewechselt sein werden.

Einer regelmäßigen Abnützung unterliegen die Einrichtungen der Stromabnehmer. Ihr Gestänge ist den Zufallsstörungen durch die Leitungslage ausgesetzt, die insbesondere bei neuen Bahnanlagen zahlreich zu sein pflegen; man wird daher gut tun, für die Stromabnehmer mit einer Lebensdauer von nicht über zehn Jahren zu rechnen.

Schleifstücke aus Aluminium laufen auf Fahrleitungen aus Kupfer im Straßenbahnbetrieb, somit bei mäßigen Strombeanspruchungen etwa 20000 km, die Rollen im allgemeinen 8 bis 10000 km. Im Betrieb von Überland- bzw. Vollbahnen (Hochspannung) sind mit dem Schleifbügel Leistungen bis 40000 erzielt worden, wogegen für Rollen vereinzelt Angaben von bis 35000 km zu finden sind.

Die dreieckigen Bügelrohre aus Messing der Simplonlokomotiven laufen 6000 km. Die bei amerikanischen Gleichstrombahnen gebräuchlichen Walzenstromabnehmer laufen etwa 20000 km.

Die vorstehenden Angaben beziehen sich überwiegend auf Straßenbahnbetriebe, können nicht ohne weiteres für anders geartete Bahnbetriebe verwendet werden; mit ihrer Nennung wird nur der Zweck verfolgt, über die Quellen der Betriebsausgaben einigermaßen Anhaltspunkte zu geben.

Anhang.

Kurzer Abriß der angewandten Nomographie in geometrischer Behandlung.

Literatur:

Theorie:

Luckey. Einführung in die Nomographie. I. u. II. Teil. Math. phys. Bibl. Verl. Teubner. Berlin. 1918.
d'Ocagne. Nomographie, les calculs effectués au moyen des abaques. Gauthier-Villars, Paris. 1899. Calcul graphique et nomographie. Paris. 1908.

Mandl. Graphische Darstellung von mathematischen Formeln. Verl. J. Seidl & Sohn. Wien. 1902.
Ohrlich. Einfache geometrische Darstellung des harmonischen Mittels. A.f.E. 1919. Bd. VIII.
Pirani. Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik. Sammlung Göschen. Berlin. 1914.
Schilling. Über die Nomographie von M. d'Ocagne. Verl. Teubner. Berlin. 1917.
Soreau. Contribution à la théorie et aux applications de la nomographie. Paris 1901. — Nouveaux types d'abaques. Paris 1906. — L'Anamorphose et l'ordre nomographique. 1914. — Abaques pour l'étude des distributions de vapeur. 1918 u. 1917. Soc. des Ing. Civ. de France.
Soreau. Nomographie au Traité des Abaques. Verl. Cluron. Paris. 1921.

Anwendungen:

Brodetsky. A first course on Nomography. Bell & Sons Ltd. London. 1920.
Cook. Simple chart for illumination calculations. E.W. 1921. Bd. 78. Nr. 18.
Courou. Linientafel zur graphischen Bestimmung von Strompreisen. R.G.E. 1920. S. 801. Ref. E.T.Z. 1920. H. 49.
Dobbelner. Anwendungsmöglichkeiten von graphischen Rechentafeln. Betr. 1920. H. 5.
Eaton. The construction of Abaci. The Electrician. 16. Aug. 1918.
Eipel. Die Herstellung von Fluchtlinientafeln für die Kalkulation. Betr. 1920. H. 5.
Gabriel. Fluchtlinientafeln zur Berechnung von Laufzeiten der Werkzeugmaschinen. Betr. 1920. H. 5.
Gut. Ein neues graphisches Verfahren zur Vorausbestimmung der Erwärmung elektrischer Maschinen. S.E.V.B. 1918. H. 2.
Hak. Zur Berechnung von Drosselpulen. E.T.Z. 1920. H. 48.
Hak. Beitrag zur Analyse von Wechselstromkurven. E.T.Z. 1921. H. 19.
Hedges. Solenoid and electromagnet windings. Proc. 1916.
Hütte. XX Aufl. Bd. III. S. 245.
Jakob. Thomsons Dampf-Nomogramm. Z.V.D.I. Bd. 64. Nr. 50.
Joilel. Einfaches Verfahren zur Trennung der Hysterese- und Wirbelstromverluste in Eisen. E.W. 1920. Bd. 76. S. 1220. R.G.E. 1920. Bd. 7. S. 148. Ref. E.T.Z. 1921. H. 15.
Leistikow. Fluchtlinientafeln für Laufzeiten. Betr. 1920. H. 5.
Loebe. Zur Berechnung elektrischer Wicklungen E.T.Z. 1915. H. 34.
Meyer. Rechentafel zur Leitungsberechnung. E.T.Z. 1921. H. 43.
Ott. Fluchtlinientafeln. Betr. 1920. H. 5.
Ott. Rechentafel zur Berechnung von Holzmasten für elektrische Freileitungen. E.u.M. 1921. H. 43.
Palme. Wirkungsgrade von Transformatoren bei Teilbelastungen. E. u. M. 1914. Nr. 7.
Pern. Graphische Berechnung der Wassermenge und -Leistung. Ö.W.Ö.B. 1912. H. 49.
Peter. Die Drahtseilbahn Treib—Seelisberg. Sch.B.Z. Bd. 69. Nr. 11.
Pospischil. Eine nomographische Darstellung einer Formel zur Berechnung von Rohrleitungen. Zeitschr. d. Ver. d. Gas u. Wasserfachm. in Österreich u. in Ungarn. 1919. H. 13 bis 14.
Seco de la Garza. Les Nomogrammes de l'Ingenieur. Gauthier Villars. Paris. 1912.
Seefehlner. Kollineare Rechentafel zur Ermittlung von Spannung und Durchhang einer Freileitung. E. u. M. 1919. H. 52. E.K.B. 1920. H. 3.
Seefehlner. Zeichnerische Rechenbehelfe. E.T.Z. 1921. H. 9.

- Siegerist und La Combe. Urteile über die Fluchtlinentafeln. Betr. 1920. H. 5.
 Singer. Rechentafel zur Bestimmung des Durchhanges von Freileitungen. E.u.M. 1920. H. 45.
 Vieser. Anwendung der Nomographie auf hydraulische Formeln. Z.O.I.A.V. 1910. H. 14 u. 42.
 Warner. Induction motor-nomogramm. J.A.I.E.E. 1921. Bd. 60. Nr. 10.
 Weel. Über einige bemerkenswerte Fluchtlinentafeln zur Berechnung elektrischer Leitungen. E.A. 1920. Nr. 81.

1. Allgemeines. Die von M. d'Ocagne vor etwa 25 Jahren erfundene Nomographie ist in mathematisch wissenschaftlicher Beziehung in der deutschen Fachliteratur mehrfach eingehend erörtert und gewürdigt worden. Nichtsdestoweniger ist dieses zeichnerische Rechenverfahren dem praktischen Ingenieur so gut wie fremd geblieben.

Bei der verblüffenden Leichtigkeit, mit welcher dieses Rechenverfahren schwierige Fragen löst und eine kaum zu übertreffende Übersichtlichkeit der Zusammenhänge gewährt, kann für diese Rückständigkeit unseres Ingenieurwesens nur die eine Erklärung gefunden werden, daß die die Nomographie behandelnden Schriften den Gegenstand vielfach mit abstrakter Mathematik behandeln und diese Rechenverfahren — wenn auch durch Anwendungsbeispiele erläutert — doch mehr als Selbstzweck und nicht als Mittel zum Zweck behandeln. Es fehlt der letzte Schritt: die Umsetzung der Darstellung in die ingenieurmäßige Denkungsart, die geometrische Ableitung an Stelle der abstrakt mathematischen, mit Berücksichtigung der Bedürfnisse der Ingenieurpraxis.

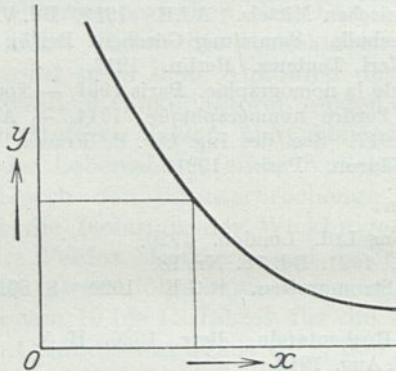


Abb. 635. Darstellung einer Funktion mit zwei Veränderlichen im rechtwinkeligen Bezugssystem.

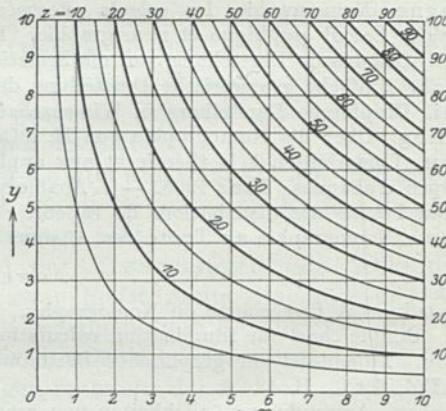


Abb. 636. Produkt-(Netz)-Rechentafel mit rechtwinkeligem Bezugssystem für die Funktion

$$x \cdot y = z.$$

Bei der unendlichen Fülle der Anwendungsmöglichkeiten und der großen Zahl bekannter Rechentafelarten ist es ausgeschlossen diesen Gegenstand hier oder überhaupt erschöpfend zu behandeln. Die Behandlung des Gegenstandes muß sich daher, mit tunlichem Ausschluß des abstrakten mathematischen Apparates, auf die Erläuterung der Anwendung dieses zeichnerischen Rechenverfahrens zur Lösung praktischer Aufgaben des in diesem Werke behandelten Sondergebietes der angewandten Elektrotechnik beschränken.

Die theoretischen Grundlagen und die zur praktischen Durchführung notwendigen Kunstgriffe sollen hierbei mit einer solchen Gründlichkeit behandelt werden, daß sich die Nutzanwendung auf jedes andere Gebiet von selbst ergibt.

Die Anwendung des Verfahrens auf eine große Zahl der Praxis entnommenen Aufgaben soll den Ingenieur im Berechnungs- und Projektionsbüro zur Weiterentwicklung dieses Verfahrens anregen. Es sei hervorgehoben, daß insbesondere die Wickeltechnik von Gleichstromankern und von Feldwicklungen, die Lösung von Erwärmungsproblemen ein dankbares Anwendungsbereich darstellen. Dieses Rechenverfahren ist überall dort, wo Rechnungen mit einer großen Zahl aneinander gebundenen Veränderlichen durchzuführen sind, am Platze. Es ist zweifellos ein durch seine Anschaulichkeit unübertreffbarer Behelf.

2. Das rechtwinklige Bezugssystem (Kartesische Koordination). Der Techniker ist gewohnt, sich die durch die Gesetzmäßigkeit einer Funktion

$$\beta = f(\alpha)$$

gegebenen Zusammenhänge durch eine zeichnerische Darstellung zu versinnbildlichen (Abb. 635).

Die Größen α , die unabhängige Veränderliche und β , die abhängige Veränderliche, werden durch Längen x und y gemessen.

Zur bequemen zeichnerischen Darstellung und zur Erzielung der gewünschten Genauigkeit der Ablesung innerhalb der Grenzen der Gebrauchswerte der Veränderlichen α und β sind zunächst die Moduln a , b , die Längemaße der Einheit der Veränderlichen α und β zu wählen.

Die Technik bedient sich zur Darstellung der Funktion

$$\beta = f(\alpha) \quad \text{bzw.} \quad \frac{y}{b} = f\left(\frac{x}{a}\right)$$

in der weitaus überwiegenden Zahl der Fälle eines rechtwinkligen — sog. Cartesischen — Bezugssystems, in welchem die durch zusammengehörige Ordinaten — Längen gemessen mit den gewählten Moduln — bestimmten Punkte durch eine Kurve verbunden werden.

Diese Darstellungsweise befriedigt in jeder Hinsicht, insoweit es sich um den Zusammenhang von nur zwei aneinander gebundenen Veränderlichen handelt. Sie hat vor allem den Vorteil für sich, daß durch Ermittlung der Koordination einer verhältnismäßig geringen Punktzahl eine stetige Darstellung des in Frage stehenden Gesetzes gewonnen wird.

Für drei Veränderliche kann dieses Verfahren noch benutzt werden. Es ist dann eine Kurvenschar zu zeichnen. In jeder Kurve werden zwei Veränderliche α und β als solche behandelt, die dritte Veränderliche γ erhält innerhalb jeder Kurve einen festen Wert und wird für die verschiedenen Kurven zweckmäßigerweise in arithmetischer Progression geändert (Abb. 636).

Das Diagramm enthält somit außer einer Kurvenschar auch noch eine Bezifferung der einzelnen Kurven mit Angabe des Wertes für $\gamma(z)$.

3. Die Nomographie (Rechentafeln). Wenn schon die für den praktischen Bedarf unzureichende Zahl der in zusammenhängender Darstellung gebrachten Veränderlichen den Wert dieser zeichnerischen Methode stark einschränkt, so ist dies in bezug auf die quantitative Auswertung der dargestellten Gesetze in noch höherem Maße der Fall.

Die Kurvendarstellung im rechtwinkeligen Bezugssystem gibt stets nur eine Sonderlösung der in Frage kommenden Gleichung; die Zeichnung muß für jeden anderen Fall, wenn die Festwerte in den Gleichungen andere Werte haben, von neuem wiederholt werden.

Die Nomographie liefert demgegenüber zeichnerische Rechenverfahren, die eine allgemeine Lösung der jeweils vorliegenden Aufgabe geben. Sie unterscheidet sich, so weit die hier gesteckten praktischen Ziele in Betracht kommen, auch insofern von der Kurvendarstellung mit Cartesischen-Koordinaten, als sie sich zur Lösung der in Frage stehenden Gleichungen nur gerader Linien zu bedienen braucht. Schließlich besteht theoretisch eine Einschränkung bezüglich der Anzahl der gleichzeitig zu erfassenden Veränderlichen überhaupt nicht. Auch praktisch kann von einer Begrenzung in dieser Beziehung kaum gesprochen werden.

Es sei hier die treffende Umschreibung Prof. Schillings angeführt:

„Eine einzelne nomographische Rechentafel, die einer bestimmten durch eine oder mehrere Gleichungen bestimmten Abhängigkeit zwischen veränderlichen Größen entspricht, gestattet, nachdem sie einmal gezeichnet vorliegt, unmittelbar die Werte der abhängigen Veränderlichen aus ihr zu entnehmen, wenn die Unabhängigen irgendwelche Sonderwerte erhalten. Die Nomographie will also Ersatz bieten für die Aufstellung von Tabellen, die besonders dann recht umständlich sind, wenn es sich um Gleichungen zwischen mehr als zwei Veränderlichen handelt.“

4. Die Behelfe der Nomographie. Die nomographische Behandlung der Funktion setzt zunächst den Übergang von der Darstellung zweier Veränderlichen in der Fläche in eine eindimensionale Darstellung, d. h. im vorliegenden Falle eine Darstellung der Funktion

$$\beta = f(\alpha)$$

auf der geraden Linie voraus (Abb. 637).

Eine derartig beschaffene doppelte Punktskala, Funktionsleiter — doppelt, weil zwei Skalen auf einem Träger vereinigt sind — erhält man, wenn man die durch die Längen

$$x = a\alpha; \quad y = b\beta$$

gemessenen Werte auf einer Geraden aufträgt und mit den entsprechend der Gleichung

$$\beta = f(\alpha)$$

einander zugeordneten Werten beziffert.

Das Thermometer mit den Reaumur- und Celsius-Skalen ist ein Beispiel für eine derartige, im alltäglichen Gebrauch stehende Doppelskala.

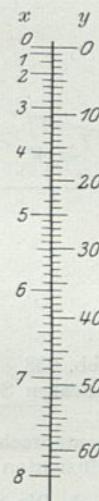


Abb. 637.
Funktions-
leiter mit
Doppelskala
für die Be-
ziehung;
 $y = x^2$.

Man kann um einen Schritt weitergehen und nur eine Skala auftragen, d. h. man beziffert die der abhängigen Veränderlichen β entsprechenden Längen mit den zugeordneten Werten der unabhängigen Veränderlichen α .

Die Skalen des Rechenschiebers sind Beispiele für derartige Skalen: aufgetragen sind die logarithmischen Längen, die mit zugehörigen Zahlen beschrieben sind.

Der Ingenieur wird für einen derartigen Funktionsleiter (Punktskala) im allgemeinen wenig Interesse aufbringen, weil sie außer der kaum ins Gewicht fallenden geringeren räumlichen Ausdehnung keine Vorteile gegenüber der stetigen, bildmäßigen Darstellung durch Kurven im rechtwinkeligen Bezugssystem bietet.

Die der Punktskala eigentümlichen Mängel treten zurück, wenn mit ihrer Hilfe umständliche Beziehungen mehrerer Veränderlichen einer bequemen und genügend genauen Lösung zugeführt werden können.

Der Nomographie liegt der Gedanke zugrunde, daß Punktreihen, Punktskalen, und zwar in der Grundform stets drei Skalen — somit drei Veränderliche — in einem Liniensystem in derartigen Zusammenhang gebracht werden, daß durch Ziehen einer vierten Geraden — Index, Suchlinie genannt — in den Schnittpunkten dieser mit den drei Skalenträgern die Lösung des durch die Gleichung der drei Veränderlichen gegebenen Zusammenhangs auch dann gefunden wird, wenn die Veränderlichen durch unbestimmte Funktionen aneinander gebunden sind.

Für den praktischen Gebrauch kommen zum zeichnerischen Rechnen folgende Grundformen der Nomogramme — Rechentafeln — in Betracht:

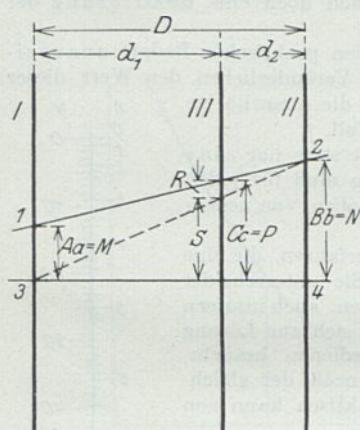


Abb. 638. Geometrie der kollinearen Summenrechentafel.

1. Die kollineare Rechentafel mit gleichmäßig geteilter Skala zum Addieren, unter einem mit logarithmischer Skala zum Multiplizieren.
2. Die Fluchtlinientafel mit einer krummlinigen Skala.
3. Die Z-Tafel als eigentliche Produktentafel zum Multiplizieren von zwei Größen.
4. Die projektive Rechentafel zur Umwandlung von Skalen.
5. Die Verhältnistafel für vier Veränderliche.
6. Die Strahlentafel für die Addition von Brüchen mit der Einheit als Zähler.

Je nach der vorliegenden Aufgabe können diese Rechentafeln miteinander verbunden, aneinander angegliedert werden.

Durch Angliederung mehrerer Einzelnomogramme kann die Zahl der gleichzeitig beherrschten Veränderlichen erhöht werden.

Diese Eigenschaft ist insbesondere deshalb von Wert, weil es auf diese Weise möglich wird die Koeffizienten der Veränderlichen in den Gleichungen auch als Veränderliche zu behandeln, dementsprechend die durch ein Funktionsgesetz gegebenen Veränderungen unter anderen, durch die Koeffizienten gekennzeichneten Umständen, mit einem einmal erstellten Rechenbehelf zu erfassen.

5. Die Summen-Rechentafel (Abb. 638). Diese, auch kollineare Rechentafel oder Parallelkoordinatensystem genannt, besteht aus drei zueinander parallelen Linien (Achsen). Jede dieser Achsen sei Träger einer Funktionsskala. Die Nullpunkte der drei Skalen sind als Schnittpunkte mit einer vierten Geraden anzunehmen.

Die Entfernung zwischen der Skala I (A) und II (B) sei D mm,
diejenige zwischen den Skalen I (A) und III (C) sei d_1 und
diejenige zwischen den Skalen III (C) und II (B) sei d_2 , so daß

$$d_1 + d_2 = D.$$

Trägt man auf den drei Skalen die entsprechend ihren für die Einheit angesetzten Moduln a , b und c durch die Längen

$$M = A \cdot a; \quad N = B \cdot b; \quad P = C \cdot c \quad \dots \quad (I)$$

gemessenen Größen (Funktionen)

$$A, B, C$$

auf, so gilt

$$A + B = C \quad \dots \quad (I)$$

vorausgesetzt, daß die Moduln a , b und c und die Entfernungen d_1 und d_2 gewisse Bedingungen erfüllen.

Der Beweis für das obige, für die Summentafel maßgebende Gesetz ist unschwer zu erbringen. Man zieht die Diagonale 2 bis 3 im Viereck 1, 2, 3, 4 und zerlegt letzteres hierdurch in zwei Dreiecke: 1, 2, 3 und 2, 3, 4.

Aus den bekannten trigonometrischen Gesetzen folgt

$$\frac{M}{R} = \frac{d}{d_2} \quad \text{und} \quad \frac{N}{S} = \frac{d}{d_1},$$

daher

$$R = M \frac{d_2}{d}, \quad S = N \frac{d_1}{d}, \quad \text{wo} \quad P = R + S.$$

Die Substitutionen durchgeführt, wird

$$P = M \frac{d_2}{d} + N \frac{d_1}{d},$$

und da

$$M = Aa, \quad N = Bb, \quad P = Cc$$

übergeht die Gl. (I) in die Form

$$Cc = Aa \frac{d_2}{d} + Bb \frac{d_1}{d}. \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (1a)$$

Wählt man die Entfernungen mit Bezug auf die zwei Modulen a und b entsprechend den Gleichungen

$$d_1 = \frac{a}{a+b} D, \quad d_2 = \frac{b}{a+b} D$$

und substituiert diese Werte in Gleichung (1a), so wird

$$Cc = A \frac{ab}{a+b} + B \frac{ab}{a+b},$$

und man findet, daß das Grundgesetz

$$\boxed{A + B = C} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (1)$$

erfüllt ist, wenn der dritte Modul c

$$c = \frac{ab}{a+b} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2)$$

wird, d. h.

$$\boxed{\frac{1}{c} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2a)$$

Im Sonderfall $a = b$ wird

$$c = \frac{a}{2} \quad \text{und} \quad d_1 = d_2 = \frac{D}{2}.$$

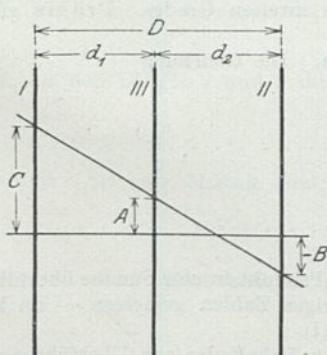


Abb. 639. Schema der Summentafel für
 $C - B = A$

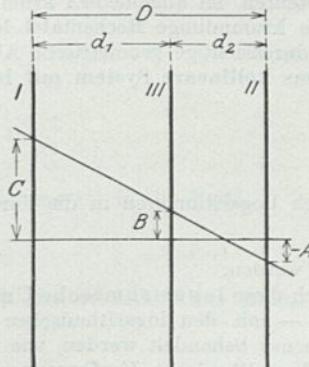


Abb. 640. Schema der Summentafel für
 $C - A = B$.

Zeichentechnisch ist es gegebenenfalls, insbesondere, wenn das kollineare System einer anderen Rechentafel anzugliedern ist, erwünscht, die Lage der Skalen zu vertauschen.

Die Umstellung der Grundgleichung (I) weist einen bequemen Weg, um diesen Zweck zu erreichen.

Die Grundgleichung (I) kann auch wie folgt geschrieben werden:

$$A = C - B \quad \text{oder} \quad B = C - A \dots \dots \dots \quad (\text{Ia u. Ib})$$

Da die auf der rechten Seite dieser Gleichungen stehenden zwei Glieder stets auf den äußeren Achsen des Parallelkoordinatensystems aufzutragen sind, ist das Gewünschte bereits erreicht. (Abb. 639 und 640).

Die Funktionen A , B und C sind mit gleichmäßig geteilten Skalen aufzutragen. Im allgemeinen werden nicht die Funktionen A , B und C interessieren, vielmehr die zugehörigen Werte der Veränderlichen. Schreibt man diese an, wird die Skala im allgemeinen nicht mehr gleichmäßig, sondern durch das Gesetz der jeweiligen Funktionen

$$A = f(a) \quad B = f(\beta) \quad C = f(\gamma) \dots \dots \dots \quad (3)$$

bestimmt sein.

6. Fluchlinientafel mit einer krummlinigen Skala. Funktionen der Form

$$f(\gamma) = F(\alpha) + \Phi_1(\alpha) \cdot \Phi_2(\beta) \dots \dots \dots \quad (\text{II})$$

können durch eine Fluchlinientafel, bestehend aus zwei Parallelenen in bezug auf die Funktionen f , Φ_2 und F , gleichmäßig geteilten und einem krummlinigen Skalenträger dargestellt werden. Die Entstehung dieser Rechentafelform lässt sich unschwer auf die aus drei parallelen Achsen bestehende Summentafel zurückführen.

Bezeichnet man

$$f(\gamma) = C, \quad F(\alpha) = A \quad \text{und} \quad \Phi_1(\alpha) \cdot \Phi_2(\beta) = B$$

und nimmt man für das Argument α vorläufig einen beliebigen Festwert an, so ist die Darstellung der Summe $C = A + B$ durch das Dreiachsen-Nomogramm ohne weiteres gegeben.

Will man die Teilung der B -Skala für einen anderen Wert des Argumentes α beibehalten, d. h. mit denselben Maßlängen andere Zahlenwerte der B -Funktion für dieselben Werte des Argumentes β messen, so entspricht diesem Vorgang die Änderung des Moduls b in einen anderen Zahlenwert b' . Dementsprechend ist auch die Entfernung d_2 der Skala C zu ändern, denn nach dem für die Summentafel abgeleiteten Gesetz ist

$$d_1 = \frac{a}{a+b} D \quad \text{und} \quad d_2 = \frac{b}{a+b} D$$

somit

$$d'_2 = \frac{b'}{a+b'} D$$

und der neue Modul

$$c' = \frac{ab'}{a+b'}.$$

Für den Fall einer stetigen Änderung des Argumentes α erhält man auf diese Weise einen nach α geteilten, im allgemeinen krummlinigen Skalenträger.

Diese krummlinige Rechentafel löst auch Gleichungen zweiten Grades. Pröhls gibt hierfür l. c. eine durchsichtige geometrische Ableitung.

7. Das kollineare System mit logarithmischer Skala. Die Gleichung

$$f(\alpha) \cdot f(\beta) = f(\gamma).$$

$$\boxed{A \cdot B = C} \dots \dots \dots \quad (\text{III})$$

kann durch Logarithmieren in die Form

$$\lg A + \lg B = \lg C \dots \dots \dots \quad (4)$$

überführt werden.

Durch diese logarithmische Umgestaltung ist das Produkt in eine Summe überführt worden und kann — mit den logarithmischen Längen der zugehörigen Zahlen gemessen — im kollinearen System ebenso behandelt werden, wie die Grundgleichung (I).

Die logarithmische Umformung stellt einen wertvollen Behelf dar zur Überführung von Produkten in Summen zwecks einer nomographischen Darstellung. Besonders wertvoll wird dieser Kunstgriff zur Lösung von Gleichungen der Form

$$y = a \cdot b^x,$$

die durch logarithmische Anamorphose in die Gleichung

$$\lg y = \lg a + x \lg b$$

übergehen. Durch entsprechende Substitution kann diese Gleichung in der Form

$$u = m + nv$$

geschrieben werden, die in einem halb-logarithmisch geteilten (Ordinaten logarithmisch, Abszissen regulär) System eine gerade Linie darstellt, d. h. der Logarithmus von y hängt linear von x ab.

Gleichungen der Form

$$y = ax^m$$

können logarithmiert

$$\lg y = \lg a + m \lg x$$

in einem logarithmischen Bezugssystem (Ordinaten und Abszissen logarithmisch mit einer Geraden: $v = n + mu$ geteilt) dargestellt werden, d. h. der $\log y$ ist die lineare Funktion von $\log x$.

Im halblogarithmischen und logarithmischen System übergehen die diese Gleichungen darstellenden Kurven in gerade Linien, gestatten daher eine bequeme Beurteilung aller sonst nicht übersichtlichen Zusammenhänge.

8. Die Z-Tafel (Abb. 641). Von einem vollwertigen Rechenbehelf mit praktischer Bestimmung muß verlangt werden, daß sich denselben jedermann ohne Umstände selbst herstellen kann. Von diesem Standpunkt ist das kollineare System für die Multiplikation mit logarithmischen Skalen insofern im Nachteil, als die Herstellung der Skalen umständlich ist. Das hierzu geeignete logarithmisch geteilte Papier steht nicht immer zur Verfügung.

Zum zeichnerischen Multiplizieren bedient man sich der nach der Gestalt des benützten Linienzuges benannten **Z-Tafel**, bei welcher die unabhängigen Veränderlichen von zweien der drei Funktionskalen gleichmäßige Teilung erhalten können.

Die in Abb. 641 dargestellten auf zwei parallelen Strecken aufgetragenen Längen d und l stehen durch die beiden, die Endpunkte kreuzweise verbindenden Strahlen in bezug auf den Zentralpunkt P in projektiver Verwandtschaft, weil die eine Länge die Zentralprojektion der anderen ist. Wenn der Kreuzungspunkt der Strahlen P den Strahl 12 in die Teilstücke m und n teilt, gilt die Beziehung

$$\frac{d}{m} = \frac{l}{n},$$

somit

$$l = d \frac{n}{m}.$$

Es sei $m+n=p$ die gegebene Länge des Strahles (12), der die Anfangspunkte der als Skalen zu betrachtenden Längen d und l verbindet, so gilt

Stellt man mit den Längen l und d die Funktionsgrößen

$$A = \frac{d}{g} \quad \text{und} \quad C = \frac{l}{c}$$

dar, wo a und c die betr. Moduln sind, so übergeht die Gleichung (5) in die Form

a, c, p sind Festwerte. Misst man mit der Länge n bzw. mit dem veränderlichen Modul

$$\frac{a}{c} \cdot \frac{n}{p-n}$$

die Größe B , kann die Rechentafel zur Durchführung des Produktes

$$A \cdot B = C \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (\text{III})$$

Verwendung finden.

Die Gleichung (6) gibt den Zusammenhang der Moduln. Aus ihr geht hervor, daß für

$$a = c$$

und

$$A = C$$

$n = \frac{p}{2}$ wird, d. h. der Mittelpunkt der Diagonalskala die Kote 1 bekommt. Hat dieser Punkt eine andere Kote, d. h. wird für $n = \frac{p}{2} B = q$ eine beliebige Zahl, so ist

$$q = \frac{a}{c}$$

das Verhältnis der beiden Modulen auf den parallelen Skalen.

Aus dieser Ableitung folgt zugleich, daß die B (Diagonal) Skala nicht berechnet werden braucht, vielmehr durch Ziehen von Strahlen von beliebig gewählten Teipunkten durch Projektion ableiten ist.

Die Z-Tafel gibt in ihrer obigen einfachen Grundform die allgemeine Lösung der Gleichung mit drei Veränderlichen:

$$AB - C = 0 \dots \dots \dots \quad (\text{III})$$

Sind vier Veränderliche in der allgemeinen Form

$$\frac{A \cdot B}{C} = D \dots \dots \dots \quad (\text{IV})$$

miteinander in Beziehung, benötigt man nach Abb. 642 zur Lösung zwei zusammengelegte Z-Tafeln, wobei durch Einführung der Hilfsgröße H die Umformung der obigen Gleichung in eine zur nomographischen Darstellung geeignete Form erzielt werden kann.

Die Hilfsgröße H wird auf die Diagonalskala mit ungleichmäßiger Teilung gelegt.

Alle vier Größen $ABCD$ können dann auf die Außenachsen der Rechentafel mit gleichmäßiger Skala aufgetragen werden.

Gleichung (IV) kann in die Form

$$\frac{A}{C} = \frac{D}{B} = H \dots \quad (\text{IVa})$$

überführt werden.

Die eine Z-Tafel stellt das Produkt $A = CH$ mit der Hilfsgröße H auf der Diagonalen dar.

Die zweite Z-Tafel mit auf die Außenachsen der erstgenannten Z-Tafel senkrechten Außenachsen und gemeinsamer Diagonalen, stellt das Produkt

$$D = BH$$

dar, wieder mit H auf der Diagonalen.

Es bedarf keines Beweises, daß die Modulen für drei Größen frei gewählt werden können; der vierte Modul errechnet sich entsprechend der Grundgleichung (IVa).

Dieses Verfahren kann auch bei nur drei Veränderlichen angewendet werden, um die Ablesung einer Veränderlichen auf der ungleichmäßig geteilten Diagonalskala zu vermeiden.

Die Gleichung (III) kann auch geschrieben werden

$$\frac{A}{C} = \frac{1}{B} = H,$$

wodurch die Gleichung in eine Form überführt wird, die sich zur Darstellung mit einer doppelten Z-Tafel mit der Hilfsgröße H auf der Diagonalen eignet (Abb. 643).

Es besteht nicht immer das Bedürfnis, die ungleichmäßig kotierte Diagonalskala zu vermeiden, um so weniger als dies im Falle von drei Veränderlichen die Verdopplung der zur Lösung führenden Manipulationen bedeutet. Diese besteht zwar nur im Ziehen eines die gegebenen Werte verbindenden Suchstrahles, des Index, doch ist es naheliegend, jede noch so unbedeutende Manipulation zu vermeiden, wenn sie überflüssig ist.

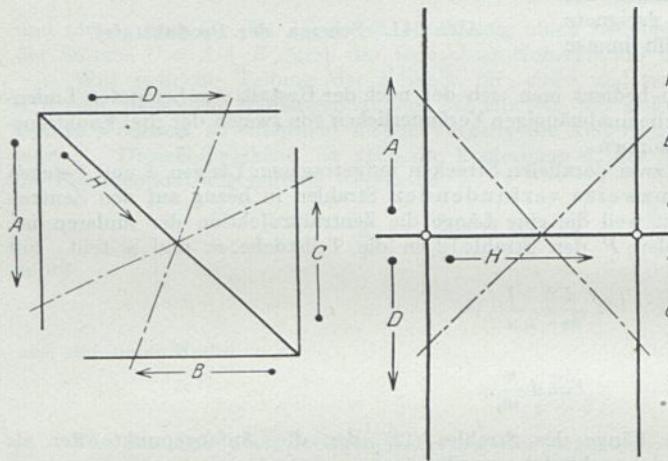


Abb. 642. Produkttafel für die Gleichung

$$\frac{A}{C} = \frac{D}{B} = H.$$

Es kommen oft Fälle vor, in welchen eine der Veränderlichen eine durch die Verhältnisse gegebene beschränkte Anzahl Werte annehmen kann. Z. B. die Gesamtleistung eines Triebfahrzeuges ist gleich dem Produkt aus der Zahl der Treibachsen und der Leistung der je eine Achse antreibenden Motoren.

$$L = m \cdot a.$$

m kann naturgemäß nur eine ganze Zahl mit dem Höchstwert 10 bis 12 sein, und bringt es keinen Nachteil, wenn man m auf die Diagonalskala aufträgt.

Ein ähnlicher Fall liegt vor, wenn der auf der Diagonalskala darzustellende Faktor die vorkommenden Festwerte der gebräuchlichen wenigen Baustoffe der Elektrotechnik, z. B. Kupfer, Eisen, Stahl, Bronze und Aluminium darstellt.

Eingangs ist es als Vorteil der Z-Tafel hervorgehoben worden, daß die Veränderlichen mit gleichmäßigen Skalen aufgetragen werden können. Andererseits wird das kollineare System vielfach der Z-Tafel vorgezogen, weil die Diagonalskala einen beschränkten Gebrauchsbereich aufweist. Wie die Benützung der Diagonalskala durch logarithmische Umformung überhaupt umgangen werden kann, wurde bereits des näheren erläutert, ebenso ein Beispiel dafür angeführt, daß auf dieser Skala nur eine beschränkte Zahl von Werten interessiert.

Weiters ist durch die Gleichung (6) für die Moduln der Weg gewiesen worden, wie es durch Wahl der Moduln erreicht werden kann, daß die interessierenden Werte in den mittleren Bereich der Diagonalskala rücken.

Nichtsdestoweniger kommen Fälle vor, wo ein kollineares System mit logarithmisch geteilter Skala eine größere Leistungsfähigkeit aufweisen wird. Zu dieser Art Aufgaben gehören Produkte z. B. quadratischer Größen. Für den Widerstand eines kreisrunden Leiters, je Längeneinheit, gilt die bekannte Beziehung

$$W = \frac{\sigma}{d^2 \pi} \cdot \frac{4}{4}$$

Die Praxis verlangt die Abmessung der Durchmesser z. B. für $d = 10$ mm bis 1 mm mit etwa $\frac{1}{1}$ bis $\frac{1}{2}$ mm, weiter von $d = 1$ bis 0,1 mm mit etwa $\frac{1}{100} - \frac{5}{1000}$ mm.

Die logarithmische Skala gestattet, diese Abstufungen auf einem Skalenträger zu erreichen, abgesehen davon, daß sie unter einem die Quadratskala einfach beherrscht. Die einfache Z-Tafel ist zur Lösung obiger oder ähnlicher Gleichungen ungeeignet, weil eine der Veränderlichen W oder d^2 auf die Diagonale aufgetragen werden muß. Die Doppelskala mit einer Hilfsgröße auf der Diagonalen bedarf zur Lösung vier Skalen und das Ziehen von zwei Indizes gegen drei Skalen und einem Index bei kollinearem System. Zeichnerisch wird die Z-Tafel in diesem Fall für die gleichen Ablesungsmöglichkeiten ($d = 0,001$) wesentlich größere Ausmaße erhalten müssen. Allerdings ist der Meßbereich durch Kotieren mit dem mehrfachen Wert als mit zwei oder drei Skalen für jede Achse auch zu steigern.

Die logarithmische Skala wird dann am Platze sein, wenn im ganzen benützten Bereich der Skala eine relativ gleichmäßige Genauigkeit der Ablesung erwünscht ist.

Eine Skala weist dann überall dieselbe verhältnismäßige Genauigkeit auf, wenn an allen Stellen je zwei Bezifferungszahlen, die zwei gleich weit voneinander entfernten Punkten zugeordnet sind, dasselbe Verhältnis haben. Ist dieses Verhältnis dasselbe, so ist auch das Verhältnis ihres Unterschiedes zu einer von ihnen stets dasselbe:

$$\left[6 : 5 = 12 : 10, \quad \frac{6-5}{5} = \frac{12-10}{10} = \frac{1}{5} \right].$$

Diese Bedingung erfüllt die gleichmäßige Teilung nicht, dagegen entspricht ihr die logarithmische Teilung.

9. Projektive Skalen. Die Z-Tafel führt zur Erkenntnis, daß Skalen durch Projektion erzeugt werden können. Die dem Gesetze

$$B = \frac{n}{p-n} \cdot \frac{a}{c}$$

gehorende Skala mit veränderlicher Teilung wird erzeugt, wenn man von einem beliebig gewählten Punkt der Skala II (C) Strahlen zu den Punkten gleichmäßiger Teilung der Skala I zieht (Abb. 644).

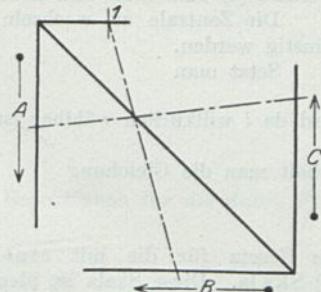


Abb. 643. Produkttafel für die Gleichung

$$\frac{A}{C} = \frac{1}{B} = H.$$

Daß das Strahlzentrum auf einer durch den Endpunkt der Diagonalskala gehenden Parallele liegen muß, folgt aus der Tatsache, daß der zu dem Wert $B = \infty$ führende Strahl parallel zur A-Skala (I) sein muß und daher identisch für alle anderen etwa gewählten Zentralen wird.

Die Zentrale zu wechseln, wird zweckmäßig, wenn die Schnitte mit der Diagonalskala ungünstig werden.

Setzt man

$$m = y, \quad d = x$$

und da l willkürlich wählbar ist,

1

erhält man die Gleichung

$$y = p \frac{x}{x+1}$$

als Gesetz für die mit einer gleichmäßig geteilten (x)-Skala projektiv verwandte (y)-Skala. Diese Skala ist identisch mit der in der Z-Tafel benützten Diagonalskala.

Zur Klarstellung der Grundbegriffe und der an sich einfachen mathematischen Beziehungen der projektiv verwandten Skalen ist im Anschluß an die Z-Rechentafel ein Sonderfall

$$y = p \frac{x}{x+1}$$

untersucht worden, ohne daß die allgemeinen Gesetze der projektiven Verwandtschaft berührt worden wären. Nachdem die projektive Herstellung von Skalen an sich ein bequemer Behelf des

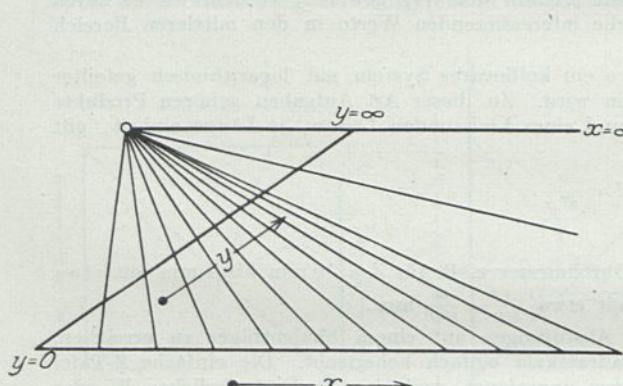


Abb. 644. Herstellung einer projektiven Skala

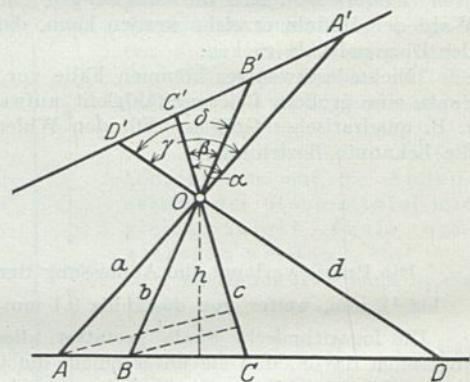


Abb. 645. Doppelverhältnis von vier Punkten

zeichnerischen Rechenverfahrens ist, welches insbesondere dann wertvoll wird, wenn es sich um die projektive Umformung weniger einfacher Beziehungen handelt, soll untersucht werden, welche Art Funktionen der projektiven Ableitung zugänglich sind. Eine allgemeine Behandlung dieses Gegenstandes ist hierzu notwendig.

Zwei Funktionen

$F(x)$ und $f(x)$

stehen in projektiver Verwandtschaft, wenn sie allgemein durch die Gleichung

aneinander gebunden sind, wobei bezüglich der Festwerte nur die Einschränkung besteht, daß

$$m\,q - n\,p > 0$$

nicht Null werden darf.

Zieht man von vier auf einer Geraden befindlichen Punkten über einen Punkt O vier (Abb. 645) Strahlen $abcd$, bis sie eine zweite beliebig gerichtete Gerade in den entsprechenden Punkten $A'B'C'D'$ schneiden, so kann bewiesen werden, daß das sog. Doppelverhältnis der vier Punkte $ABCD$ gleich dem Doppelverhältnis der vier Strahlen $abcd$ wird und daß dasselbe auch für die Punkte $A'B'C'D'$ gilt.

Unter dem Doppelverhältnis wird die Beziehung

$$\frac{AC}{BC} : \frac{AD}{BD} = \frac{\sin(ac)}{\sin(bc)} : \frac{\sin(ad)}{\sin(bd)}$$

verstanden.

Drückt man den Flächeninhalt der Dreiecke ACO , CBO , ADO und BDO auf zweierlei Art aus, gilt

$$ACO\Delta = AC \cdot h = ac \sin \alpha$$

$$BCO\Delta = BC \cdot h = bc \sin \beta$$

$$ADO\Delta = AD \cdot h = ad \sin \gamma$$

$$BDO\Delta = BD \cdot h = bd \sin \delta$$

hieraus

$$\frac{AC}{BC} : \frac{AD}{BD} = \frac{ac \sin \alpha}{bc \sin \beta} : \frac{ad \sin \gamma}{bd \sin \delta}.$$

Es ist ohne neuerlichen Beweis einleuchtend, daß das gleiche Gesetz auch für die durch Projektion entstandene Punktreihe

$$A' B' C' D'$$

gilt.

Stellen die Längen OA , OB , OC und OD Funktionen einer Veränderlichen x dar, so können die vier Punkte mit den Werten

$$f(x_1), f(x_2), f(x_3), f(x_4)$$

bezeichnet werden. In das oben abgeleitete Doppelverhältnis substituiert, übergeht dieses in die Form

$$\frac{f(x_1) - f(x_3)}{f(x_2) - f(x_3)} : \frac{f(x_1) - f(x_4)}{f(x_2) - f(x_4)}.$$

Ebenso kann man die Funktion $F(x)$ durch eine Punktreihe darstellen und für diese das Doppelverhältnis bilden:

$$\frac{F(x_1) - F(x_3)}{F(x_2) - F(x_3)} = \frac{F(x_1) - F(x_4)}{F(x_2) - F(x_4)}.$$

Bezüglich $F(x)$ wurde die Annahme gemacht, daß

$$F(x) = \frac{mf(x) + n}{pf(x) + q}.$$

Setzt man demgemäß in das Doppelverhältnis der Funktion

$$F(x)$$

die den besonderen Zahlenwerten

$$x_1, x_2, x_3, x_4$$

laut obiger Gleichung entsprechenden Werte

$$\frac{mf(x_1) + n}{pf(x_1) + q}$$

usw. ein, so findet sich das Ergebnis, daß die Doppelverhältnisse der beiden durch die allgemeine Gleichung gebundenen Funktionen übereinstimmen.

Die Punktreihen $ABCD$ bzw. $A'B'C'D'$ sind, wie aus der Abb. 645 ersichtlich, durch zentrale Projektion entstanden, woraus sich als Schlußfolgerung ergibt, daß die Skalen von Funktionen, die in einer durch Gleichung ausgedrückten mathematischen Verwandtschaft stehen, durch zentrale Projektion von einander abgeleitet werden können.

Funktionen von der Form

$$y = \frac{1}{x}, \quad y = \frac{1}{x^2}, \quad y = \frac{1}{x^3},$$

sind als Sonderfälle der Grundgleichung V in gleicher Weise der projektiven Behandlung zugänglich.

Im allgemeinen wird eine projektiv zu erzeugende Skala nicht für den ganzen Bereich der Werte von $0 - \infty$ benötigt werden.

Es sei z. B. (Abb. 645) aus der gleichmäßigen Skala $f(x) = x$ für die Werte $x = 20 - 50$ die entsprechende Skala der reziproken Zahlen

$$F(x) = \frac{1}{x}$$

abzuleiten.

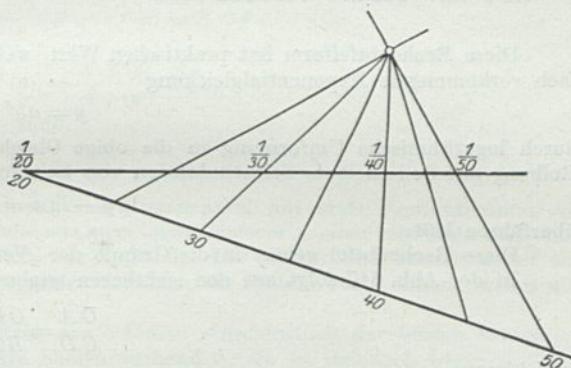


Abb. 646.
Projektive Skala mit beschränktem Zahlenbereich.

Praktischerweise wird der Maßstab so angesetzt, daß die von den beiden Skalen für denselben Bereich beanspruchten Längen etwa gleichgroß werden. Anfangs- und Endpunkt der Skalen mit den einander zugeordneten Werten sind gegeben. Berechnet man ein drittes zusammengehöriges Wertepaar von x und $\frac{1}{x}$, verbindet diese durch eine Gerade, so gibt diese in ihrem Schnittpunkt mit der die Skalenendpunkte verbindenden Geraden das zur Ableitung der übrigen Skala erforderliche projektive Zentrum.

10. Verhältnis-Tafel für vier Veränderliche (Abb. 647). Die bisher behandelten Nomogramme geben jeweils den Zusammenhang von drei Größen. Sind mehr Veränderliche vorhanden, muß ein Skalengerüst aus mehreren Rechentafeln gebildet werden. Für vier, im allgemeinen durch eine Gleichungsform

$$f(x) + f(y) = \frac{f(v)}{f(w)} \quad \dots \dots \dots \quad (VI)$$

aneinander gebundene Veränderliche kann man sich einer Fluchtlinientafel bedienen, die aus zwei parallelen Achsen und einer dritten, diese unter einem beliebigen Winkel schneidenden Achse besteht.

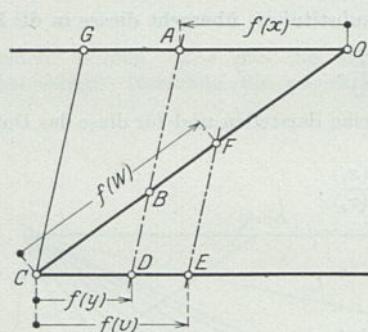


Abb. 647. Positive Verhältnistafel.

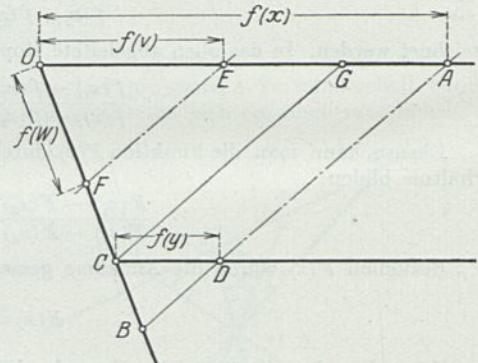


Abb. 648. Negative Verhältnistafel.

Diese Rechentafelform hat praktischen Wert, weil die in der angewandten Elektrotechnik vielfach vorkommende Exponentialgleichung

$$y = ab^x$$

durch logarithmische Umformung in die obige Gleichungsart (Erwärmungs- und Abkühlungsgesetz, Reibung auf Seilscheiben, Selbstinduktion von Leitern)

$$\lg y - \lg a = x \lg b$$

überführen läßt.

Diese Rechentafel gehört in die Gruppe der „Verhältnistafeln“ (von Pirani Z-Tafel genannt). In der Abb. 647 folgt aus den sichtbaren trigonometrischen Beziehungen:

$$\frac{OA}{CD} = \frac{OB}{BC}$$

und hieraus

$$OA = CD \frac{OB}{BC}.$$

Durch Ziehen einer Hilfslinie wird

$$AG = CD$$

gemacht, so daß in den beiden ähnlichen Dreiecken GOC und BCD gilt

$$\frac{OG}{OA + CD} = \frac{CD}{BC} \frac{(OB + BC)}{OC}.$$

Für die zweite Transversale EF gilt

$$\frac{CD}{BC} = \frac{CE}{CF}$$

und hieraus

$$OA + CD = \frac{CE}{CF} OC.$$

Man setzt

$$OA = f(x), CD = f(y), CE = f(v) \text{ und } CF = f(w).$$

Diese Substitutionen durchgeführt, erhält man die obige in Frage stehende Gleichungsform. Für die negative Verhältnistafel Abb. 648 ist die Ableitung ähnlich.

$$\begin{aligned} OA - AG &= \frac{CD}{BC}(OB - BC) \\ AG &= CD. \end{aligned}$$

Weiter ist

$$\frac{CD}{BC} = \frac{OE}{OF},$$

so daß schließlich

$$OA - CD = \frac{OE}{OF} OC.$$

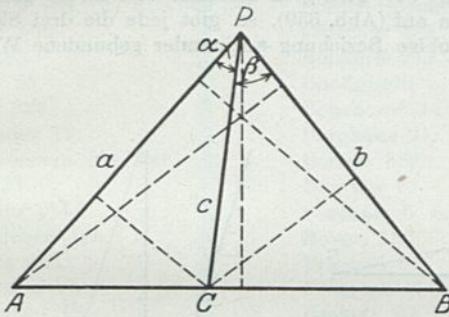


Abb. 649. Dreieck zur Ableitung des Zusammenhangs dreier Strahlenskalen.

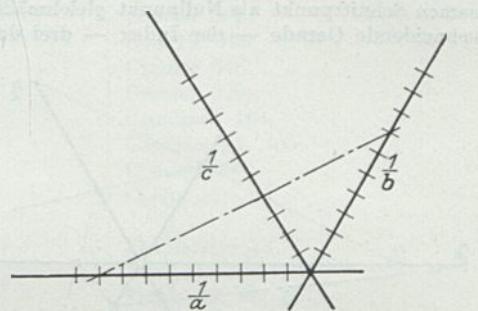


Abb. 650. Strahlenskalen für das halbe harmonische Mittel.

Voraussetzung für die zeichnerische Darstellung ist, daß die Moduln der Skalen I für $f(x)$ und II für $f(y)$ gleich groß zu nehmen sind, weil nur kommensurabile Größen addiert werden können.

Es sei

$$OA = af(x), CD = af(y), OE = cf(v) \text{ und } OF = df(w),$$

daher

$$a[f(x) + f(y)] = \frac{c}{d} \frac{f(v)}{f(w)} \cdot OC.$$

Damit OC aus dieser Gleichung verschwindet, muß

$$OC = \frac{ad}{c}$$

sein.

Zur Lösung derselben Aufgabe kann man eine Summentafel mit einer Produktentafel verbinden. Das Skalengerüst besteht in diesem Falle aus zwei logarithmischen, einer regulären und einer projektiven Skala (letztere auf der Diagonalen der Z-Tafel). Die Rechentafel besteht somit aus 5 Skalen und man braucht zwei Suchlinien, insgesamt demnach ein System aus 7 Linien, wobei nur eine einzige reguläre Skala vorhanden ist.

Die hier abgeleitete Verhältnistafel besteht aus 5 Linien einschließlich der beiden Suchlinien und sind zwei logarithmische und zwei reguläre Skalen vorhanden, sie ist demnach wesentlich einfacher. Beschränkt wird ihre Verwendbarkeit lediglich durch die Bedingung gleicher Maßstäbe auf den parallelen Skalen.

11. Die Strahlentafel (Abb. 649). Zieht man von Punkt P drei Strahlen mit den Längen a, b, c , zu den auf einer Geraden liegenden drei Punkten $A B C$, so gelten die trigonometrischen Beziehungen.

$$\text{Fläche des Dreieckes } A P C \frac{1}{2} a c \sin \alpha = A,$$

$$\text{„ „ „ } B C B \frac{1}{2} b c \sin \beta = B,$$

$$\text{„ „ „ } A B P \frac{1}{2} a b \sin(\alpha + \beta) = C.$$

$$A + B = C,$$

daher

$$a b \sin(\alpha + \beta) = a c \sin \alpha + b c \sin \beta,$$

$$\frac{\sin(\alpha + \beta)}{c} = \frac{\sin \alpha}{b} + \frac{\sin \beta}{a}.$$

Für den Sonderfall, daß der Winkel
 $\alpha = \beta$
wird

$$\frac{2 \cos \alpha}{c} = \frac{1}{b} + \frac{1}{a}$$

für

$$\alpha = 60^\circ, \quad \cos \alpha = \frac{1}{2},$$

dann gilt

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}.$$

Trägt man demnach auf drei gegeneinander mit 60° geneigten Strahlen von ihrem gemeinsamen Schnittpunkt als Nullpunkt gleichmäßige Skalen auf (Abb. 650), so gibt jede die drei Skalen schneidende Gerade — der Index — drei durch die obige Beziehung aneinander gebundene Werte.

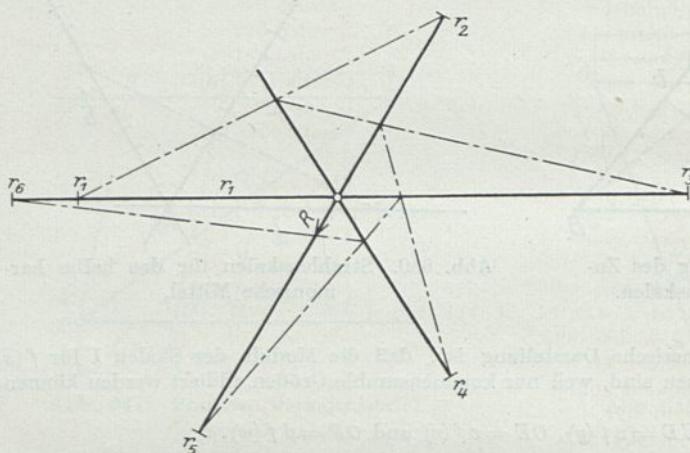


Abb. 651. Polygon-Strahlensystem zur Addition der Brüche.

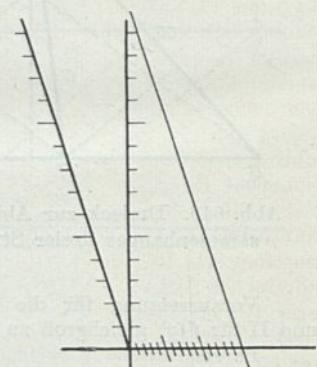


Abb. 652. Strahlenskalen mit verschiedenen Maßstäben.

Diese Gleichungsform wird in der elektrischen Praxis sehr oft benötigt, z. B. zur Ausrechnung des Mittelwertes parallel geschalteter Widerstände oder in Reihe geschalteter Kapazitäten usw.

Diese Rechentafelform ist dann von Wert, wenn es sich nicht nur um die Ausrechnung des harmonischen Mittels zweier, sondern mehrerer Werte handelt.

Abb. 651 erläutert für sich die Anwendungsart mit sechs Strahlen.

Praktisch liegt die Sache meistens so, daß nicht für alle Größen die gleichen Modulen genommen werden können. Das ist z. B. der Fall, wenn zu einem verhältnismäßig großen Widerstand ein wesentlich kleinerer zugeschaltet werden soll. Man muß dann die Winkel zweckmäßig ändern, womit auch eine entsprechende Änderung der Modulen im Sinne der allgemeinen Gleichung einhergeht. Wählt man einen der Zentriwinkel, z. B. $\beta = 90^\circ$ (Abb. 652), wird

$$\frac{\cos \alpha}{c} = \frac{1}{a} + \frac{\sin \alpha}{b}.$$

Namenverzeichnis (Verfasser).

- | | | |
|---|---------------------------------|-------------------------------|
| A bt 180. 451. 459. 461. 485. 518. | Böhm-Raffay 125. | Coors 180. |
| Adler 129. 164. 197. 219. 349. 546. | Boesch-Ouzelet 6. 16. | Corsepius 5. |
| Adolph 556. | Böttcher 485. | Courou 563. |
| Afee 382. | Bolstorff 219. | Cox 12. 103. |
| D'Aste 23. | Bonfiglietti 5. 19. | Cramer 348. |
| Albert 329. | Boucherot 44. | Cremer 329. |
| Alexander 12. | Borghaus 21. | Cronbach 164. |
| Alexanderson 164. 546. | Borries 382. | Cserháti 14. 405. |
| Allen 33. | Bourlier 6. | Cuenod 282. |
| Altmann 114. | Bosshart 5. 6. | Czeija 11. |
| Alvensleben 125. | Boveri 180. | |
| Amberg 103. | Braarud 9. | D ahlander 13. |
| Ambrosius 55. | Bragstad 282. | Daubner 16. |
| Armknecht 18. | Brakett 60. | Davis 33. 36. 397. |
| Amsler 546. | Braun 9. 88. 180. | Dawson 13. 103. |
| Armbruster 16. 18. | Brauns 55. | Dean 164. |
| Armstrong 11. 197. 397. | Brecht 9. 11. 12. 14. 114. 146. | De la Court 20. 21. |
| Andrews 20. 529. | 219. 385. 397. | Delmez 349. |
| Anger 12. 21. 401. | Breitfeld 44. | Demany 129. |
| Arnold 20. 164. | Bremond 16. | Derrer 5. |
| Arns 88. | Bright 371. | Dick, Kerr 282. |
| Aspinall 9. 11. | Brodetsky 563. | Diesel 20. 536. |
| Axtell 281. | Broomall 197. | Dietl 5. 9. 10. 361. 397. |
| B abcock 11. | Brousoux 129. | Dittes 7. 13. 23. 26. 407. |
| Bacqueyrisse 219. | Brückmann 17. | Dobbeler 563. |
| Baecker 10. | Brünner 16. | Doppelstein 371. |
| Bäseler 18. | Brugsch 8. 11. 129. | Dodd 20. 219. 397. |
| Bahse 17. | Brunner 486. | Ďory 164. 219. 401. |
| Bandow 10. | Buchwald 129. | Dolezalek 451. 486. |
| Baum 129. | Buchli 219. 405. | Donath 60. 98. |
| Batchelder 219. 233. 382. 397. | Buhle 19. | Dreger 22. |
| Bearce 6. 9. 12. 23. | Burkard 16. | Dreisbach 60. 77. |
| Beers 281. | Bürke 114. 129. | Duffing 231. |
| Beeuwkes 12. | Bussebaum 88. 556. | Dumas 10. 17. |
| Behn-Eschenburg 44. 55. 164. | Bütow 371. | Dummermuth 55. |
| 180. 195. 281. 407. 409. | Büttner 21. | |
| Bell 50. | C alzolari 14. | E aton 219. 371. 563. |
| Benischke 114. 164. 180. | Carlier 23. | Easton 44. 563. |
| Bergmann 11. | Case 282. 329. | Eberhard 17. |
| Bernadet 17. | Cattani 16. 18. | Edler 60. 98. |
| Besser 60. | Cauer 9. | Egg 60. |
| Bethge 129. 139. 197. | Cauwenbergh 181. 195. 403. | Ehnhart 401. |
| Bieloy 20. | Clarke 282. | Eichberg 11. 164. |
| Birk 18. | Cristiansen 129. | Eichel 12. |
| Bisacre 44. | Clarafeld 32. | Eigenheer 7. |
| Bissinger 459. | Coding 60. | Eiselen 9. |
| Blakmore 7. | Collischon 4. | Eipel 563. |
| Blondel 180. | Collum 11. 125. | Ellenbogen 23. |
| Blum 9. 10. | Couwenhoven 219. 546. | Engel 13. 164. 197. 282. 409. |
| Bode 21. | Cook 563. | England 19. |
| Boedecker 129. | Cooper 197. 219. | Epstein 13. |

- | | | |
|-------------------------|---|--|
| Ertel 19. 88. | Guggenheim 90. | Jordan 15. 18. |
| Espitalier 19. | Guillary 22. | Juliusburger 349. |
| Evans 33. | Gut 197. 563. | Jullian 7. 13. 403. |
| Ewing 129. 329. | Gyáros 6. | Jüllig 60. |
| F aber 4. | H aag 16. | K adrnozka 8. 129. |
| Fadda 451. 486. | Haas 7. 556. | Kahler 11. |
| Favarger 349. | Hak 563. | Kalbfuß 19. |
| Ferstel 23. | Hals 60. | Kallir 98. |
| Fetter 60. | Hammel 165. | Kando 14. 260. 405. |
| Feuer 60. 98. | Hare 12. | Kapp 14. |
| Findeis 20. | Hartmann 349. | Kasten 4. |
| Fischer 6. | Hausmann 14. 129. | Kayser 6. |
| Fischer-Hinnen 197. | Heberling 129. | Keller 21. |
| Fleischmann 164. | Hedges 563. | Kemmann 9. |
| Fliegner 486. | Heilfron 180. 282. | Kennelly 44. 55. 529. |
| Fodor 7. 15. | Heilmann 534. | Kiefer 485. |
| Fontanellaz 382. | Heinemeyer 60. | Kielland 5. |
| Fräkel 23. | Heller 19. 20. | Kilchenmann 14. 129. |
| Frank 19. | Hellmund 180. 399. | Kinberg 98. |
| Frankl 180. | Hermanns 4. | Kindler 20. 180. 349. |
| Franklin 164. | Hermsdorf 114. | Kirsten 60. |
| Frese 20. | Hering 125. | Klausner 22. |
| Freund 8. 103. | Hershey 11. 399. | Kleinow 7. 13. 219. 263. 282.
382. 401. 403. |
| Frischmuth 11. | Herzog 6. 11. 14. 16. 407. | Klien-Lindner 277. |
| Freyer 7. | Heubach 165. | Kliment 23. |
| Fühles 17. 19. | Heumann 22. | Klingelhoefer 4. |
| Funke 180. | Hewett 6. 11. | Klingenberg 23. |
| Fynn 165. | Hewlett 116. | Klose 459. |
| G abriel 563. | Heyden 7. 11. 13. 103. 219.
401. 405. 407. | Knorr 129. 197. |
| Gall 44. | Heyland 165. | Koch 44. |
| Gallego 10. | Heymann 165. | Kock 114. |
| Ganz 276. | Heys 546. | Kohler 60. |
| Gasteluovo 114. | Hildebrand 4. | Kohlfürst 10. |
| Gayer 22. | Hixson 88. 329. | Koller 6. |
| Gaze 17. | Hobart 11. | König 50. |
| Gerlach 9. 361. | Hochenegg 129. | Königshagen 20. 409. |
| Gerstmeyer 114. 165. | Hoepner 407. | Körner 7. 10. |
| Gesing 60. | Hohage 55. | Kraemer 282. |
| Gibbs 10. 12. | L'Hoest 219. | Kratochwill 13. |
| Giesler 22. | Holmgren 6. 11. | Kreißig 129. |
| Girousse 55. | Holzer 219. | Krizik 6. 229. |
| Gleichmann 11. 12. 13. | Hoppe 44. | Krüger 14. |
| Glinski 10. 60. 129. | Hort 129. | Krzyzanowski 60. |
| Godferneaux 10. | Hotopf 16. | Kübler 10. 98. |
| Goldberg 7. | Hruschka 8. 12. 13. 23. 129. 382. | Kummer 6. 11. 13. 14. 23. 25.
26. 27. 44. 48. 55. 56. 130.
146. 165. 180. 219. 266. 348.
405. 409. 546. |
| Goldschmidt 127. | Hubendick 20. | Kuntze 13. 16. 55. 103. |
| Golwig 15. | Huber-Stockar 13. 14. 23. 25. | Kurz 20. |
| Gordon 8. | Huebler 14. | Kurzel 529. |
| Goupillière, de la 486. | Huldschiner 7. 10. 14. 44. 47. 405. | Kyser 5. 98. |
| Görge 165. | Hutchinson 397. | L afontaine 180. |
| Goetze 486. | Hütte 563. | Lang 103. |
| Gradenwitz 18. | I delberger 13. | Lanino 14. |
| Grempe 20. 22. | Iranyi 282. | Largiader 349. |
| Greulich 16. | J ahn 129. | Lasche 15. |
| Grimshaw 10. 12. | Jackson 529. | Laternser 12. 23. 382. |
| Grivet 18. | Jakob 563. | Latour 165. |
| Grothe 60. | Jobin 60. | Laying 197. |
| Grünhut 23. | Johnson 33. | Lebenbaum 103. |
| Grünig 486. | Joilel 563. | |
| Grünninger 451. | Jones 33. 120. | |
| Gubler 405. | | |
| Guerry 6. | | |

- Leboucher 13. 219.
 Lefebre 17.
 Leistikow 563.
 Leitzmann 382. •
 Leuthele 55.
 Levy-Lambert 451. 486. 518.
 Leyvraz 16.
 L'Hoest 219.
 Lichtenstein 44. 47. 55.
 Lichtfield 349.
 Liechty 16. 277. 382.
 Linebaugh 180.
 Linke 7.
 List 404.
 Lloyd-Köhler 532.
 Locher 459. 463.
 Loewe 563.
 Loebner 98.
 Lombard-Gerin 7. 19.
 Loewentraut 401. 403.
 Löwit 6.
 Luckey 563.
 Luder 6.
 Ludorf 9.
 Luithlen 180.
 Lydall 11.
- M**acen 10.
 Macholl 9.
 Mahir 9.
 Mandl 180. 563.
 Manke 8.
 Manswelt 6.
 Marchand 32.
 Marchena 11.
 Marcuse 56.
 Mardis 282.
 Markt 6. 130.
 Marguerre 7. 56. 165. 405.
 Marquis 130.
 Marsh 459.
 Marshall 130.
 Mattersdorf 9. 165. 361. 560.
 Mauduit 11. 56.
 Mauder 44.
 Mauermann 197.
 Maurer 19.
 Mehrtens 19.
 Meißner 219. 486.
 Mester 180.
 Metzelin 130.
 Meyer 9. 12. 361. 563.
 Milch 6.
 Mikuli 348.
 Mirabelli 56.
 Möller 16.
 Moellendorf 90. 329.
 Monath 181.
 Moser 165.
 Morgenthaler 16. 17.
 Müller 5. 16. 17. 60. 165. 180.
 197. 219. 266. 401. 546.
 Münster 28.
 Murray 12. 103. 394.
- Musil 8. 9. 130.
 Mutzner 130.
- Nash 33.
 Naumann 181.
 Neidt 197.
 Neubert 60.
 Neumann 98.
 New 12.
 Nier 20. 530.
 Nieß 98.
 Nikolaus 60.
 Niethammer 6. 11. 14. 32. 44.
 165. 181. 195. 282. 397.
 Nipkow 16.
 Nordmann 7. 12. 130. 344. 349.
- O**bach 32.
 O'Brien 382.
 d'Ocagne 563.
 Oefverholm 13.
 Oesterreicher 4.
 Oetling 529.
 Ohl 4. 372.
 Ohnesorge 517.
 Ohrlich 563.
 Oppizi 11.
 Osnos 165. 195.
 Ossana 146. 165.
 Ostertag 20.
 Ott 60. 563.
 Otto 60. 98.
- P**ahin 13. 14. 397. 534.
 Palme 563.
 Pannel 165. 229.
 Parodi 14.
 Passauer 4.
 Paul 112.
 Paz 7.
 Pender 60.
 Perkins 18.
 Pernt 563.
 Perret 181.
 Peter 6. 18. 462. 525. 563.
 Petersen 9. 114.
 Petit 10.
 Pfleiderer 219.
 Pflug 130.
 Pforr 6. 9. 11. 23. 50. 130. 139. 403.
 Philippi 4. 23.
 Pichelmayer 11. 165.
 Pietrkowski 19.
 Pirani 28. 563.
 Pirch 560.
 Platzmann 9. 361.
 Popp 405.
 Porney 56.
 Potin 60.
 Pontecorvo 14. 405.
 Poschenrieder 13. 60. 81. 88.
 Pospischil 563.
 Priest 165. 219.
 Przygode 9. 19. 20.
- Q**uinat 10.
- R**asch 50. 166.
 Rathenau 39.
 Rau 219.
 Reckenschuß 486. 494.
 Reichel 9. 11. 14. 166. 219. 399.
 401.
 Reichers 50.
 Reinhart 4. 6. 10. 12.
 Reishaus 103.
 Reyval 11. 18.
 Renaud 9.
 Renshaw 12.
 Reutener 181.
 Rice 11.
 Richey 5. 81.
 Richter 4. 166. 403.
 Rigganbach 459.
 Righi 11. 14.
 Riep 4. 22.
 Risch 130.
 Roedder 12.
 Röll 16.
 Rohr 56.
 Roland 7. 20.
 Rosa 125. 409.
 Rosenberger 344.
 Roß 14.
 Rossi 22.
 Rothpelz 22.
 Rüdiger 4.
 Rudolph 361.
 Ruprecht 524.
 Ruegger 130.
 Rusch 181.
 Ryncki 16.
 Rziha 88.
- S**achs 14. 397. 407. 409. 416.
 546.
 Santoro 14.
 Sanzin 130. 145.
 Sármezey 21.
 Sauveur 181.
 Schäfer 32.
 Schauer 60.
 Scheichl 13.
 Scheinig 127.
 Schendell 114.
 Schenkel 60. 166. 181.
 Scherbius 181.
 Schermerholm 197.
 Schiemann 19. 20. 529. 531.
 Schilling 563.
 Schimanek 21.
 Schimpff 8. 9. 10. 14.
 Schmedes 17.
 Schmidlin 33.
 Schmidt 18. 130. 166.
 Schmidt-Grubers 114.
 Schneider 20.
 Schnetzler 166. 409.
 Schoop 127.

Namenverzeichnis.

- Schörling 130. 349.
 Schreiber 197.
 Schröder 28. 130.
 Schrödter 4.
 Schröter 56.
 Schrottke 56.
 Schurig 529.
 Schütt 17.
 Schwarz 18.
 Schwarzkopff 12. 55. 60. 103.
 Seco de la Garza 563.
 Seefehlner 7. 12. 13. 16. 18. 60.
 88. 103. 114. 146. 181. 197.
 219. 349. 382. 397. 399. 405.
 451. 486. 563.
 Seehase 98.
 Seidener 88.
 Seidemann 60.
 Sengel 60.
 Sieber 11.
 Siedler 16.
 Siegel 181.
 Siegerist 564.
 Simeon 5.
 Simey 403.
 Singer 60. 564.
 Smith 11. 12. 26.
 Sneyder 8.
 Soberski 14.
 Soeder 4.
 Soreau 563.
 Sothmann 114.
 Soulavy 19.
 Spängler 349.
 Sproecke 19.
 Stahl 349. 556. 560.
 Stauf 23.
 Stecher 56.
 Stengel 219. 401. 403.
 Stephan 19.
 Stein 9. 56.
 Steiner 9.
 Steinmetz 23. 166.
 Stillwell 166
 Stix 409.
 Stobrawa 20.
 Stocker 329.
 Stockert 382.
 Stoll 19. 532.
 Storer 12. 382.
 Storjehann 329.
 Strauß 22.
 Strasser 22.
- Strub 16. 17. 18. 459. 461. 486.
 Studer 22. 407. 486.
 Studiengesellschaft 130.
 Sulot 56.
 Suguet 10.
 Sumec 47. 60. 166.
 Sumerhayes 34.
 Sveinson 130.
 Symanzik 219.
 Szilas 60.
- T**aylor 33.
 Tetmayer 86.
 Thieme 17. 18.
 Thirlwall 197.
 Thomann 18. 409.
 Thomson-Houston 4. 282.
 Thomson 60.
 Thormann 14. 23. 56. 130. 166.
 197. 407.
 Tischendorfer 219.
 Törpisch 6. 8. 12. 103.
 Tracy 22. 120.
 Trautwetter 13. 349. 556.
 Trautweiler 23.
 Tripet 18.
 Troske 10.
 Truxa 44. 56.
 Tschanz 276.
- U**nger 166. 197.
 Usbeck 23. 103.
 Uytbork 9. 13.
- V**alatin 7. 21.
 Valensi 56.
 Vallauri 12. 22. 166. 174.
 van Nes 6.
 Vautier 486. 494.
 Verebél 14. 23. 405. 409.
 Le Vergenier 19.
 Verole 14. 282. 405.
 Vieser 564.
 Viglia 6.
 Voit 529.
 Volkers 130. 181. 197.
- W**achsmann 8.
 Wachsmuth 282. 401. 403.
 Wagenknecht 21.
 Wahle 81.
 Wahn 98.
 Walter 6.
- Warren 56.
 Waskowsky 21.
 Walloth 18. 486.
 Watermann 14.
 Webb 282.
 Weber 130.
 Wechmann 10. 12. 13. 21. 44.
 361. 403.
 Weel 44. 564.
 Weicker 114.
 Weil 60.
 Weiß 17.
 Weißbach 28.
 Wensley 34.
 Wenzel 8.
 Wernekke 349.
 Werther 4.
 Westphal 103.
 Wettich 19.
 Weyand 21.
 Whittaker 181. 344.
 Wichert 7. 10. 130. 197. 220. 382.
 Wiesinger 5. 220.
 Wilson 44.
 Winkler 13. 22. 166. 382. 403.
 Winterhalter 88.
 Wintermayer 19.
 Wist 407.
 Wittek 166.
 Wittfeld 12.
 Wittig 9.
 Witthöft 9.
 Wlach 60.
 Wohlfahrt 17.
 Wolf 181. 282.
 Wood 7.
 Wyne 12.
 Wyßling 12. 23. 407.
- Z**allud 12.
 Zanger 56.
 Zehme 8. 9. 12. 14. 103. 166.
 348. 349. 361. 382. 405.
 Zehnder-Spörry 6. 16. 18. 19.
 Zeulmann 8. 60.
 Zeuner 21.
 Zezula 19.
 Zickler 44. 45.
 Zindel 16. 409.
 Ziffer 21.
 Zipp 12. 166. 382.
 Zolland 407.
 Zuidweg 146.

Sachverzeichnis.

Abstufige Geschwindigkeitsregelung 283.
Abgezweigte Kompensation 177.
Ablenkrollen 502.
Abhängigkeit des Bahnmotors von der Klemmenspannung 168.
Abkühlung 201.
Abzweigung 93.
Achsdruck 151.
— für Industrielokomotiven 372.
Achslager (Lebensdauer) 561.
Achsmotor 222.
A.E.G.-Kuppelung 224.
Akkumulator-Fahrzeuge 21.
Anamorphe, logarithmische 568.
Anfahr-Verlust 170.
— -Beschleunigung 132. 504.
— -Widerstand 294.
— -Zugkraft 170.
Anfangs- (Ausgangs)Temperatur 204.
Angaben über Stadtbahn-Triebwagen 370.
Ankerumfangsgeschwindigkeit 220. 233.
Anlassen 169.
Antrieb, unmittelbarer 220.
Anstoßschalter 514.
Arbeitsdraht, Querschnittsformen 90.
Arbeitsleitung 44.
Armausleger 100.
Art der Belastung der Kraftwerke 26.
Arten der Steuerung 283.
— der Triebfahrzeuge 465.
— der Zahnbahnen 469.
Aufhängung des Fahrdarates 89.
Auftrieb 453.
Ausgleichs-Verbindung 171.
— -Widerstand 172. 481.
Auslauf-Weg, — -Zeit 133.
Ausrundung von Gefällsbrüchen 495.
Ausnützungsziffer der Kraftwerke 27.
Ausrüstung, elektrische der Triebfahrzeuge 164.
Aussteigezeit 163.
Ausweiche, selbsttätige, 490.
Auszug 86.

Backenzahnseilklemme 113.
Bahnmotor 164.
Bahnwiderstände 129.
Batchelder-Motor 223.
Bauformen des Bahnmotors 219.
— der benzin-elektrischen Fahrzeuge 540.
— der Straßenbahn-Triebwagen 349.
— der Vollbahnlokomotiven 387.
Baulänge von Lokomotiven 394.
Bauregeln für Industrielokomotiven 371.
— für Triebfahrzeuge 348.
Baustoffe von Leitungen 66.
Baustoffwirtschaft 151.
B.B.C.-Antrieb 276.
Beanspruchung, mechanische, der Anker durch Fliehkraft 232.
— zulässige, von Masten 86.
— von Leitungen 66.
Beeinflussung der Schwachstrombetriebe 55.
Belastung, verschiedene, in benachbarten Spannfeldern 79.
Belastungstafel für Lokomotiven 158.
Beleuchtung der Fahrzeuge 346.
Bemessung der Widerstände 320.
Benennung der Lokomotiv-Bauarten 382.
Benzin-elektrische Fahrzeuge 21. 536.
Bergmann Antrieb 257.
Berührungsdruck 337. 342.
Beschleunigung 132. 504.
Betonmast 100.
Betriebsspannung der Stromschiene 123.
Betriebssystem (Drahtseilbahn) 489.
Bleiakkumulator 549.
Blindwelle 255.
Blitzschutz 119.
Bogenlänge einer Leitung 64.
Bremsarbeit 199.
Bremse, selbsttätige, für Zahnradiolokomotiven 470.
Bremse, pneumatische 360.
Bremgeschwindigkeit 135.
Bremskontroller 285.
Bremskuppelung 347.
Bremsschaltung 185.

Bremszahnstange (Seibahn) 489.
Bremsung, elektrodynamische 181.
— Kurzschluß 181.
— mittelbare 183.
— unmittelbare 181.
— gemischte 183.
— von Windwerken 519.
Bremsverlust 135.
Bremsverzögerung 138.
Bremsweg 135.
Bremswiderstände 183.
Brutto, Zugs- 147.
Brückenkonstruktion 98.
Brückenschaltung 286.
Bügeleisenform 375. 387.
Bürstenverschiebung, Steuerung mit 316.

Dampfelektrische Lokomotive 535.
Dampflokomotive 173.
Dauerleistung 198.
Decksitzwagen 357.
Dieselelektrische Fahrzeuge 536.
Doppelbetrieb, Drahtseilbahnen 486.
— draht 97.
— -Kelch-Isolator 108.
— -Kettenwerk 112.
— -Motor 229.
— -Verhältnis 572.
Doppelt gespeister Motor 175.
Drahtverbinder 112.
Drahtseil 507.
Drehgestell 357.
— -Lokomotiven 376.
Drehstrom-Bahnen 14.
— -Bahnen, Fahrlleitung für 101.
Drehtransformator 315.
Dreieckrahmen 260.
Dreileitersystem 28.
Dreiphasengetriebe 249. 271.
Dritte Schiene 89.
Drosselpule 345.
Durchhang 60.
— für das Tragseil einer Fahrlleitung 77.
— Messung des 77.
— verhältnismäßiger 63.

Elastisches Verhalten der Stromerzeuger 28.

- Elastizitätsmodul 66.
 Elektrodynamische Stromwirkungen 57.
 Einfachkettenwerk 107.
 Einanker-Umformer 31.
 Eingriffsduer 460.
 Einheitliche Lokomotivtriebmashine 272.
 Einphasen-Kollektormotor 173.
 Einpolige Erdung 41.
 Einstiegezeit 163.
 Einteilung der Getriebearten 280.
 Einzelantrieb 276.
 Eislast 69.
 Endtemperatur 204.
 Erddruck 88.
 Erdstromvorschriften 45.
 Erdung 41.
 Erdung, einpolige 41.
 Ermittlung der Fahrwiderstände für Straßenbahnfahrzeuge 143.
 — — mit veränderlichen Werten 144.
 Erwärmung 201.
- F**ahrdrat 90.
 Fahrgeschwindigkeiten der Zugförderung 163. 575.
 Fahrleitung 88.
 — für Drehstrombahnen 101.
 — für gleislose Bahnen 531.
 — in Gruben 102.
 — in Tunnels 102.
 — Lageplan für Bügel 81.
 — — für Rolle 82.
 — — für Walze 82.
 — mit Stromschiene 120.
 — mit Vielfachaufhangung 103.
 — selbsttragende 90.
 Fahrlinien 155.
 Fahrschalter 283. 286. 562.
 Fahrtrichtungswalze 284.
 Fahrwiderstände, Erfahrungszahlen und Formeln für die 144.
 Fahrzeit, reine 163.
 Fahrzeuge für Standseilbahnen 522.
 — für gleislose Bahnen 533.
 — Lebensdauer 561.
 Federbock 337.
 Feldschwächung 140. 169. 182. 283.
 Fernleitungen 43.
 Fernwirkungen 56.
 Festwerte der Baustoffe für Leitungen 66.
 Fischgrätenzahnstange 463.
 Flechtarten von Drahtseilen 509.
 Fluchtlinientafel s. Rechentafel.
 Flüssigkeitswiderstand 323.
 Freiluftschalter 120.
 Frequenz, natürliche 272.
- Führerlose Lokomotiven 531.
 Führerstand, Einrichtung des 377.
 Funkenspannung, statisch 174.
 Funkenlöschung 287.
 Funkenstrecke 345.
 Funktionsleiter 365.
- G**anz-Kuppelung 224.
 Gefällsausrundung 495.
 Gegengcompoundwicklung 37.
 Geometrie der Zahnräderübersetzung 226. 240.
 Geschobene Fahrzeuge (Zahnbahnen) 485.
 Geschwindigkeitsregelung 283.
 Gestell der Zahnräderlokomotive 470.
 Gestellmotor 236.
 — für Einzelantrieb 276.
 Getriebearten 280.
 Gewicht von Lokomotiven 155.
 Gewichtsangaben für Wagen 359.
 Gittermast 87. 99.
 Gitterplatte 550.
 Gleichstrom-Betrieb mit Wechselstromeinrichtungen 180.
 — -Lokalbahnen 6.
 — -Stadtbahnen 8.
 — -Straßenbahnen 5.
 Gleislose Bahnen 19. 529.
 — — Fahrleitung 531.
 — — Stromabnehmer 531.
 Gliedermaschine 146.
 Gliederwagen 466. 467.
 Griff der Umschaltwalze 285.
 Gruben-Fahrleitung 102.
 Grundriß von Stadtbahnwagen 368.
- H**akenschloß 113.
 Halblogarithmisches Bezugssystem 208.
 Haltezeiten 163.
 Hänge-Isolator 115.
 Handbremse 469.
 Hartgummi-Isolator 94. 561.
 Hauptschaltwalze 284.
 Hautwirkung 45.
 Hebungs-Widerstand 131.
 — -Arbeit 199.
 Heizung der Fahrzeuge 346.
 Hewlett-Isolator 117.
 Höchstleistung von Untergestellmotoren 229.
 Höchststromausschalter 345.
 Höhenplan, theoretischer (Seilbahn) 491.
 Hörnerblitzableiter 345.
 Hohlachse, elastische 277.
 Hohlwelle-Klien Lindner 277.
 — -Liechty 277.
 — -Westinghouse 223.
 Holzmast 86. 99.
- Hüpfer 296.
 Hyperbel für konstante Leistung 170.
- I**nduktion, elektromagnetische 46. 58.
 — gegenseitige 47.
 — statische 57.
 Industrie-Bahnen 4.
 — -Lokomotiven 371.
 Innenrahmen 393. 471.
 Isolation (Lebensdauer) 561.
 — der Stromabnehmer 344.
 Isolatoren 114.
 — Porzellani- 114.
 Isolator für die Stromschiene 122.
 — -Bolzen 94.
 — Hänge- 116.
 — -Halter 95.
 — Kelch- 116.
 — Kettenglied- 116.
- K**abel 347.
 Kalorische Fahrzeuge 20. 534.
 Kando(Dreieck)-rahmen 260.
 Kappe und Konus 94.
 Kaskadenschaltung 321.
 Kastengehäuse 234.
 Kastenplatte 550.
 Keilkopfschiene 490.
 Keilkopfzahnstange (Strub-) 462.
 Kelch-Isolator 108. 116.
 Kennlinien des Bahnmotors 166.
 — thermisch-elektromechanische 211.
 Kennwerte der Leitungsanlage 45.
 Kennzeichen, besondere, der Industrielokomotiven 371.
 Kettenfahrleitung 103.
 Kettenlinie 62. 499.
 Kettenglied-Isolator 116.
 Kettenwerk, Doppel- 112.
 — Einfach- 107.
 — System Paul 112.
 — Verbund- 110.
 Kippmoment 87.
 Klemmwerk 92.
 Klemmöse 92.
 Kletterzahnstange (Peter) 462.
 Knickung 86.
 Kohlenverbrauch für die KWh 24.
 — für das Tonnenkilometer 25.
 Kollektor (Lebensdauer) 562.
 Kontaktkopf 331.
 Kontaktleine 332.
 Kräfteplan für das Triebzahnrad 452.
 Kräftespiel im Kurbelgetriebe 245.
 Kraftbedarf, Drahtseilbahn- 512.
 Krafeck 52.
 Kreiselwirkung 385.

- Kreuzschaltung 172. 186.
 Kreuzung 98.
 Kreuzschlag 511.
 Kritische Geschwindigkeit 266. 386.
 — Spannweite 70.
 Krümmungswiderstand 132.
 Krummlinige Skala 568
 Kühlung 235. 393.
 — künstliche 235.
 Kuppelrahmen 260.
 Kupplung 347.
 Kurbel (Fahrschalter) 285.
 Kurbelgetriebe 237.
 Kurvenrollen 2.
 Kurvenzug 82.
 Kurzschlüsse 27.
- L**amellenzahnstange 462.
 — (Abt) 461.
 Längenänderung, Geometrische, einer freigespannten Leitung 64.
 — Physikalische, einer freigespannten Leitung 65.
 Längsaufhängung 103.
 Längsschnitt einer Leitung 60.
 — theoretischer (Drahtseilbahn) 491.
 Lageplan einer Leitung 81. 82.
 Lagerspiel im Kurbelgetriebe 248. 268.
 Lagerung, Federnde 270.
 Laufachse 388.
 Lebensdauer 333. 334. 511. 560.
 Leier (Lyra) 335.
 Leiterzahnstange (Riggenbach) 460.
 Leitfähigkeit der Stromschiene 124.
 Leitrollen 502.
 Leitungsbau 88.
 Leitungsmaste (Lebensdauer) 560.
 Lenkachsen 357.
 Linienführung (Drahtseilbahn) 489.
 Lötöse 92.
 Logarithmische Linie 206.
 Logarithmische Umformung (Anamorphe) 207.
 Lokalbahnen 5.
 Lokomotiventwürfe 388.
 Lokomotivgewichte (Zahnbahnen) 483.
 Luftwiderstand 131.
- M**aßbestimmungen für Lokomotiven 388.
 Massenfreies Kurbelgetriebe 270.
 Massenwirkung 456.
 Maste 86.
 Mauerhaken 98.
- Mechanische Eigenschaften der Leitung 59.
 Mehrachsenantrieb 221.
 Messung des Durchhangs 77.
 Milderung der Spitzenbelastungen 27.
 Mitteleinstieg 359.
 Motor-Aufhängung 234.
 — Gehäuse 234.
 — Leistung, Bemessung der 197.
 Motorischer Antrieb (Drahtseilbahnen) 487.
- Nachgiebigkeitsgrad 269.
 Nachspannung, selbsttätige 106.
 Nebenschlußmotor 167.
 Neigungsgrenze 451.
 Nickel-Eisen-Akkumulator 549.
 Nicken 386.
 Nockensteuerung 309.
 Nomogramm s. Rechentafel.
 Nomographie 563.
 Nußisolator 95.
 Nutzbremsung 192.
 — für Zahnbahnen 480.
- O**berbau (Lebensdauer) 560.
 Oberbausysteme (Seilbahnen) 490.
 Obergestellmotor 236.
 Oberleitung 89.
 Öse, frei bewegliche 92.
 — Löt- 92.
- P**arabel 495.
 Parallelbetrieb 171.
 Parallelkurbelgetriebe 237. 242. 255.
 Pendelbetrieb 487.
 Periodenumformer 36.
 Permeabilität von Stahlschienen 47.
 — von runden Eisenleitern 47.
 Pfeilräder 233.
 Phono-Electric-Draht 91.
 Pirani-Schaltung 28.
 Plattformwagen 532.
 Pneumatische Bremse 360.
 — Steuerung 291.
 Polumschaltung 169.
 Porzellanglocken 115.
 Porzellanisolation 96. 102.
 Projektive Skala 571.
 Produkt-Nomogramm 569.
 Pufferung 37.
 Punktskala 65.
- Q**uecksilberdampf-Gleichrichter 32.
 Queraufhängung 85. 99.
 Querfeld 175.
 Querschnitte von Leitungen 90.
 — von Stromschienen 121.
- R**adreifen (Lebensdauer) 561.
 Radreifenform 148.
 Rahmen, Lokomotiv- 393.
 Rechentafel 565.
 — für die Anhängelast 150.
 — zur Bestimmung der Ausrundung von Gefällsbrüchen 498.
 — zur Bestimmung der Auslauf- und Bremszeit 136.
 — zur Bestimmung der Motorleistung (Type) 150.
 — zur Bestimmung des Lokomotivgewichtes 154. 155.
 — zur Bestimmung der Zugs- gewichte 159. 160. 461.
 — zur Bestimmung der Stand- sicherheit von Zahnbahnlokomotiven 458.
 — für die allgemeine Zustands- gleichung einer freigespannten Leitung 66. 67. 69.
 — für Fahrlinien 157.
 — von Lokomotiven 160. 161.
 — für die Montagespannungen einer selstragenden Fahrleitung 72.
 — für eine Kettenfahrleitung 73.
 — für die Kurventeilung (Fahrleitung) 83. 84.
 — zur Bestimmung von Rollwiderständen 143.
 Regelung der Geschwindigkeit 169.
 Regelarten 283.
 Regelleistung 198.
 Regelquerschnitte für den Arbeitsdraht 90.
 — für Leitungen 72.
 Reichweite eines Speicherfahrzeugs 548.
 Reibungsarbeit 199.
 Reibungsgewicht 147.
 Reibungsgrenze 146.
 Reibungswiderstand 130.
 Reibungsziffer 518.
 Reihen-Nebeneinanderschaltung 171.
 Reihenschaltung 169.
 Reihenschlußmotor 167. 175.
 Reisegeschwindigkeit 163.
 Rentabilität 558.
 Resonanzerscheinungen bei den Stromerzeugern 29.
 Richtlinien der Eisenbahntechnik 1.
 Rohrmast 100.
 Rollenstromabnehmer 330.
 Rollwiderstand 130. 504.
 — für gleislose Fahrzeuge 530.
 Rosette 98.
 Rutschkupplung 269. 469.
 Rückleitung 45. 125. 561.

- Sandstreuer 359.
 Schalldämpfer 98.
 Schalter, Strecken- 94,
 Schaltregeln für Fahrzeuge 284.
 — der Stromerzeugung 39.
 Scheibenbremse 190.
 Scheitelgleichung der Parabel 62.
 Scherenstromabnehmer 339.
 Schienenbremse 191.
 Schienenquerschnitt 46.
 Schienenschuh, Scheinigscher 127.
 Schienenstoß 45.
 —, verschweißter 127.
 Schienenrückleitung 45, 125.
 Schleifbügel 333.
 Schleifschuh 333.
 Schlingern 384.
 Schlitzkuppelstange 251.
 Schlitzkuppelrahmen 260.
 Schmelzsicherung 345.
 Schmierung der Zahnstange 454.
 Schoop-Spritzverfahren 127.
 Schrägantrieb 257.
 Schüttelerscheinungen 266.
 Schüttelmodell 266.
 Schütz 296.
 Schutz der Stromschiene 123.
 Schutzeinrichtung der Stromerzeugung 41.
 Schutzzvorrichtung 359.
 Schwanken 384.
 Schwankung, periodische, der Zugkraft 151.
 Schwebeseilbahn 19. 525.
 Schwerpunktslage 272.
 Seil 507.
 Seilbahnen, Standseilbahnen 485.
 Seileck (Seilpolygon) 52. 61.
 Seilführung 504.
 —, sichere 495.
 Seilschloß 113.
 Seilspannung, mittlere 75.
 Seilverbinder 112.
 Seilumleitungen, Anzahl der 526.
 Seilleitungswiderstand 584.
 Selbstkühlung 234.
 Selbstinduktion 47.
 Senkrechter Antrieb 255.
 Serienmotor 167.
 Siemens-Antrieb 276.
 Signaleinrichtung 521.
 Solenoidbremse 187.
 Spaltumformer 547.
 Spannfeld, schiefes 74.
 Spannkugel 45.
 Spannungsabfall in der Fahrleitung 48.
 Spannungsausgleicher 517.
 Spannweite, kritische 70.
 —, virtuelle 74.
 Spannwerk 85.
 Speicherfahrzeuge 21. 548.
 Speiseleitungen 43.
- Speisung, freitragende 52.
 —, mehrfache 54.
 —, zweiseitige 50.
 Sperrschialtung 308.
 Spezialbahnen 16.
 Spezifisches Baugewicht je PS von Vollbahnlokomotiven 151.
 Spurweite der Stromschiene 122.
 Stadtbahnen (Gleichstrom) 8.
 — (Wechselstrom) 10.
 —, Reisegeschwindigkeit 164.
 Stahlseil, verschlossenes 509.
 Standfestigkeit 87.
 Standseilbahn 17. 485.
 Standsicherheit 454. 485.
 Stange, Stromabnehmer- 330.
 Stangenkraft im Kurbelgetriebe 246.
 Steigung, größte, für Standseilbahn 486.
 Stetigkeitsstörung der Zahnräder 277.
 Steuerung der Fahrzeuge 282.
 — von Drehstromlokomotiven 321.
 —, mittelbare 284. 295.
 —, unmittelbare 283.
 Stichmaßfehler im Kurbelgetriebe 247.
 Stoßverbindung 125.
 Störende Bewegungen 384.
 Strahlentafel 575.
 Straßenbahnen 5.
 Straßenbahn-Triebwagen 349.
 Streckenisolator 93. 119.
 Stromabnehmer 329. 562.
 — für Stromschiene 342.
 — für gleislose Fahrzeuge 531.
 — für Unterleitung 341.
 Strombeanspruchung des Schleifbügels 334.
 Stromeck 53.
 Stromerzeugung 23.
 Stromschiene 121.
 Stromspitzen 26.
 Stromsystem der Vollbahnen 15.
 — der gleislosen Bahnen 533.
 Stromunterbrechung der Stromschiene 124.
 Stromverbrauch 200. 531.
 Stromverbrauchsberechnung 198.
 Stromverdrängung 45.
 Stromverteilung 50.
 Stromwendung des W.-Str.-Kolktormotors 174.
 Stromzuführung, unterirdische 125.
 Stufenlose Steuerung 311.
 Stufentransformator 171. 283.
 Stufenzahl 319.
 Stundenleistung 198.
 Stützpunkte der Leitung 86.
 Summenrechentafel 566.
- Systeme der elektrischen Zugförderung 3.
 Technische Einheit 383.
 Technische Vereinbarungen 383.
 Teilung für die Stützpunkte einer Fahrleitung für Bügel 82.
 — für die Stützpunkte einer Fahrleitung für Rolle 81.
 —, Rollen- (Drahtseilbahn) 501.
 Temperatur, äquivalente 70.
 —, kritische 71.
 Theoretischer Höhenplan 491.
 Tonnendach 355.
 Traglager (Lebensdauer) 561.
 Tragrollen 501.
 Tragseil 106. 526.
 Tragseil-Isolator 108.
 Tragwerk 104.
 Trambahnanordnung 387.
 Treibstangen 253.
 Treibstange, schräge 257.
 Triebfahrzeuge für Zahnbahnen 465.
 Triebgewicht 147.
 —, verhältnismäßiges 148.
 Triebwagen, Stadtbahn (Untergrund) 361.
 —, Straßenbahn- 349.
 — für Zahnbahnen 477.
 Tschanz-Antrieb 276.
 Tunnelfahrleitung 102.
- Überhöhung 252. 262.
 Überlandbahnen 5.
 Umformerlokomotiven 21. 546.
 Umformung des Stromes 32.
 Umformerwerke, selbstdämmige 33.
 Umlaufende Massen 142. 456.
 — Massen, Zuschlag für 142.
 Untergestell 355.
 Untergestellmotor 220.
 — für Zahnbahnen 408.
 Unterleitung 125.
 Unterwerke, selbstdämmige 33.
- Verbinder, Draht- und Seil- 112.
 Verbundkettenwerk 110.
 Verbundmast 99.
 Verbundwicklung für Bremsen 189.
 Verdrehung der Achsen 232.
 Vereinheitlichung der Triebmaschinen 272.
 Vereisung 71.
 Verhältnismäßiges Triebgewicht 147.
 Verhältnistafel 574.
 Verkehrsbedürfnis 556.
 Verriegelungsplan 308.
 Verschublokomotive 376.
 Verspannung der Fahrleitung 81.
 Vielfachaufhängung für Fahrleitung 103.

- Vielfachsteuerung 284.
 Vierphasengetriebe 277.
 Virtuelle Länge 199.
 Vollbahnen (Allgemein) 11. 15.
 Vollbahnen-Gleichstrom 12.
 — -Drehstrom 12.
 — -Wechselstrom 12.
 Vollbahnlokomotiven 382.
 Vollbahnen mit Zahnstange 479.
 Vorausberechnung der Lokomotivleistung (Zahnbahnen) 483.
 Vorgelegemotor 224. [483.
 Vorortbahnen (Gleichstrom-) 8.
 Vorortbahnen (Wechselstrom-) 10.
Wärmekapazität (-Inhalt) 201.
 Wärmeverlust, spezifischer 203.
 Wagengröße 349.
 Walzenstromabnehmer 330.
 Walzkontakt 296.
 Wanderkontakt 318.
 Wanken 384.
 Wasserbadlastbetrieb (Drahtseilbahnen) 487.
 Wechselstrom-(Lokal-) Bahnen 7.
 Wechselstrom-Straßenbahnen 5.
 Wendepole 235. [562.
 Widerstand, Anfahr. 170. 294.
 Widerstand, effektiver 45.
 —, induktiver 46.
 — der Stoßverbindung 45.
 Widerstandsschaltung 294.
 Widerstandvermehrung 45.
 Winddruck 60.
 Windwerk 515.
 Wirkungsgrad der Stromerzeugung 24.
 Wirtschaftliche Bedeutung der Pufferung 37.
 Wogen 386.
 Würgbund 112.
Zahnbahnenarten 464.
 Zahndruck 231.
 — (Zahnbahnen) 453.
 Zahnkranz, gefederter 230.
 Zahnbahnen 16.
 Zahnradübersetzung, Änderung der 139.
 —, Geometrie der 286.
 Zahnräder mit federnden Speichen 231.
 — (Lebensdauer) 562.
 Zahnreibung 278.
 Zahnstange (Abt) 461.
 — (Locher) 463.
 — (Peter) 462.
 Zahnstange (Riggenbach) 460.
 — (Strub) 462.
 Zahnstangeneingriff 460.
 Zahnstangensysteme 459.
 Zange 470.
 Zangenbremse 470. 522.
 Zeitrückhalt 138.
 Zeitkonstante, thermische 204.
 Zellenschalter 318.
 Z-Tafel 569.
 Zucken 384.
 Zugfolge 489.
 Zugkraft am Radumfang 146.
 Zugsbrutto 147.
 Zugsteuerung 284. 309.
 Zusammensetzung, chemische, der Stromschiene 125.
 Zusatztransformator 317.
 Zuschlag für umlaufende Massen 456.
 Zustandsgleichung, allgemeine, einer freigespannten Leitung 64.
 Zweileitersystem 51.
 Zweimotorantrieb 374.
 Zweiphasengetriebe 270.
 Zweistangenantrieb 258.
 Zwittersystem 180.
 Zyklide 494.

Ortsverzeichnis.

- A**achen 6.
 Achenbach, Zeche Minister 4.
 Acquarossa 6. 310. 329.
 Aiguille du Midi 19.
 Airolo 14.
 Albtal 7. 38. 398.
 Albula 16.
 Alp-Sura 19.
 Alte-Wiese, Karlsbad 18.
 Altona 19.
 Amerika, Ver. Staaten 6. 8. 11. 12. 382.
 Anaconda 12. 396.
 Annapolis 6. 7. 8.
 Arad 6.
 Areskutan 525.
 Argentina 8.
 Arosa 6.
 Arth 16. 328.
 Augustusburg 17. 504.
 Aurora 344.

Bad Dürkheim 6.
 Baden 17. 398. 515.
 Baden, Öst. 8.
 Baker-Street 9.
 Ballston 7.
 Baltimore 7. 200. 396.
 Barmen 9. 16. 328.
 Basel 27.
 Bayern 23. 400.
 Bechyne 6. 329.
 Beirut 466.
 Belfort 7.
 Belleville 17.
 Bellinzona 6. 14. 307. 328.
 Berchtesgaden 17.
 Bergamo 7.
 Berlin 5. 9. 20. 27. 364. 369. 370.
 Bern 6. 14. 27. 406.
 Berner Oberland 6. 200. 328. 479. 480.
 Bernina 6. 290. 328. 406.
 Bethlehem 6.
 Biasca 6. 310. 329.
 Bielatal 20.
 Biel 6.
 Bignasco, 7. 327.
 Bitterfeld 13.
 Blankenese 10. 200. 306. 327. 361.
 Blonay 16.
 Bloomington 327.
 Böckingen 20.
 Bonn 303. 329.
 Bordeaux 19.
 Bodensee 27.
 Borinage 5.
 Bourboule 17.
 Boston 8. 12. 369. 370. 396.
 Bourg-Madame 7. 200. 328.
 Bozen 6. 17. 484. 515.
 Brasilien 17.
 Brembatal 7.
 Bremen 20.
 Brescia 6.
 Brighton 10. 327.
 Brigue 15.
 Brooklyn 370.
 Brunnen 16. 327. 467.
 Buda 17.
 Budapest 6. 9.
 Buenos-Aires 8. 370.
 Burgdorf 326. 406.
 Burg-Madame 297.
 Bürgenstock 17. 504. 515.
 Butte 12. 341. 396.
 Buttler 6. 7. 328.

Caldiero 7.
 California 6.
 Canada 6. 396.
 Capri 17. 490. 515.
 Cambridge 370.
 Capucin 515.
 Cascade Mountains 12. 396.
 Cassarate 17. 515.
 Castellana 7.
 Chamonix 19.
 Chaumont 18. 504.
 Champéry 16. 202. 479.
 Châtelard 16. 329. 474. 477.
 Chesapeake-Bay 7. 327.
 Chiapella 14.

- Chicago 4. 7. 12. 165. 193. 200.
202. 328. 341. 344. 396.
- Chile 4.
- Chur 6.
- Civitta-Castellana 7.
- Cleveland 34.
- Cöln 6. 329.
- Corcovado 16. 327.
- Croix-Paquet, Lyon 18.
- Croix-Rousse, Lyon 18.
- Cuba 6.
- Cure d'Aise 17.
- D**amaskus 466.
- Denver 7.
- Dessau 13. 201.
- Deutschland 8. 12.
- Dolder 515.
- Dresdner-Heide 20.
- Düsseldorf 358.
- E**isenerz 194. 466.
- Elberfeld 9.
- Engadin 14.
- Engelberg 16. 17. 475.
- England 9. 11. 13.
- Erdmannsdorf 17. 504.
- Erie 7.
- Erstfeld 14.
- Europa 6. 13. 382.
- Evian les Bains 5.
- F**idaz 19.
- Filder 16. 474.
- Filmserstein 19.
- Fourvière 48.
- Frankfurt 6. 291. 328.
- Frankreich 10. 13.
- Freundschaftshöhe Karlsbad 18.
- Fribourg 20.
- Frutigen 14.
- Fusina 328.
- G**alata 515.
- Garmisch 400.
- Gergal 8. 15. 408.
- Gerschnialp 17.
- Giovi 14. 200.
- Glion 16. 328. 471. 478. 482. 504.
- Gödöllö 408.
- Gornergrat 16.
- Gotthard 13. 25. 406.
- Granada (Spanien) 16.
- Grasse 515.
- Groenendigh 4.
- Groß-Lichterfelde 9. 27.
- Guntschnabahn 17.
- Gurten 515.
- H**aag 7. 328.
- Haardt 6. 328.
- Hall i. T. 6.
- Halle 13.
- Hamburg 9. 302. 306. 365. 369.
370.
- Hamilton 18.
- Hammetschwand 17.
- Hardt 6.
- Hartford 12.
- Harz 466.
- Haut-Rhin 327.
- Haute-Vienne 7. 327.
- Heidelberg 18. 504.
- Heilbronn 20.
- Hermannstadt 20.
- Heysam 10.
- Hirschberg 32.
- Hohenfurt 6.
- Hohensyburg 18.
- Holland 6.
- Homburg 6. 291. 328.
- Hoosac-Tunnel 12.
- Hudson 370.
- Hungerburg 18. 37. 504. 512.
515. 521.
- I**llinois 7.
- Indianapolis 6.
- Innsbruck 6. 37.
- Ins 6.
- Istrien 20.
- Italien 14. 200. 326. 404.
- J**apan 436.
- Jamestown 8.
- Johannisthal 20. 112.
- Jons 7.
- Jungfrau 16. 327. 472. 477.
- K**arlsbad 18. 463.
- Karwin 357.
- Kiruna 13. 299.
- Klosterneuburg 20.
- Kohlern 19. 526.
- Königstein 20.
- Königswinter 303.
- Königszelt 13.
- Konstantinopel 11.
- Kristiania 9.
- L**a Cure 6.
- Lake-Shore 7.
- Lana 526.
- Lancashire 6.
- Lancaster 10.
- Lauban 13.
- Lausanne 18. 27. 515.
- Leipzig 13.
- Les-Avants 18. 504.
- Liverpool 9. 200.
- Locarno 7. 327.
- Lötschberg 25. 199. 200. 300.
305. 325. 326. 406.
- Lokken 7.
- Long-Island 27. 370.
- London 9. 10. 327. 370.
- Lookout 18.
- Louisville 6.
- Lucca 6.
- Ludwigshafen 6.
- Lugano 5. 6. 292. 328.
- Lyon 7. 18. 327. 504. 515.
- M**aastricht 6.
- Madrid 10.
- Mähr. Ostrau 357.
- Magdeburg 13.
- Mahonay 18.
- Mailand 6. 27. 200. 329.
- Malè 7. 329. 356.
- Malmö 21.
- Manhattan 370.
- Mannheim 6.
- Mariazell 7. 404.
- Martigny 7. 16. 327. 329. 468.
474. 477.
- Melbourne 9.
- Mendel 18. 504. 515.
- Merkur (Baden) 17.
- Mesocco (Misox) 6. 328.
- Michigan 6. 328.
- Midi 13. 326.
- Midland 10. 327.
- Milwaukee 6. 12.
- Miribel 7.
- Mittenwald 7. 326. 404.
- Monreale 487. 490.
- Monsumano 6.
- Montana 18.
- Mont Blanc 19.
- Mont Brè 17. 504. 515.
- Mont Cenis 14. 38.
- Mont Dore 18.
- Mont Ulia 19.
- Monthey 16. 201. 202. 329. 479.
- Montreal 8.
- Montreux 6. 16. 200. 328. 471.
478. 482.
- Mont Salève 16.
- Monza 329.
- Morecamp 10.
- Morschach 16. 327. 467.
- Moselhütte 379.
- Mottarone 16.
- Mount Washington 451.
- Mülheim 21.
- Münsterschlucht 16. 329.
- Murnau 7. 325.
- N**ancy 18.
- Napoli 7.
- Neuchatel 18. 504.
- New-Haven 12. 25. 201. 325.
326. 327. 396.
- New-York 8. 12. 23. 25. 28. 198.
200. 329. 344. 363. 369. 370.
396.
- Niagara 19.
- Niesen 18. 504. 512. 513. 515.
520.
- Nordmark 404.
- Norfolk 12. 325. 398.
- Norwegen 5. 9. 13. 404.
- Nyon 6.

- O**berammergau 7. 325.
Oberweißbach 18.
Ofen (Budapest) 17.
Ohio 200.
Ohlsdorf 10. 361.
Opeina 16. 23. 328.
Oranienburg 402.
Orleans 12. 23. 27. 328. 402.
Örlikon 27.
Orsières 7. 327.
Österreich 13. 406.
Ouchy 18.
- P**adua 7. 328.
Palermo 487. 490.
Pamplona 7. 327.
Panama 476.
Paoli 10. 12.
Paris 10. 12. 27. 200. 328. 363.
 367. 370.
Parma 5. 327.
Pau 18.
Paulista 398.
Peggau 6.
Pennsylvania 398.
Peoria 327.
Pescia 6.
Philadelphia 8. 10. 12.
Piedimonte d'Alifi 7.
Piedmont-Northern 398.
Pirano 20.
Pittsburg 6. 7. 8. 328.
Planches 16.
Pleiades 16.
Pontebrolla 7. 327.
Pontresina 14.
Portoroße 20.
Posieux 20.
Preßburg (Pozsony) 7. 20. 404.
Preußen 13. 22. 200. 325. 326.
 400.
Puget-Sound 12.
Pyrenäen 13.
- R**Rathausen 27.
Rhätische Bahn 14. 25. 326. 408.
Rhein 328.
Richmond 7. 327.
Rigi 16. 328.
Riksgränsen 13. 299. 326. 406.
Rio de Janeiro 19. 528.
Ritten 16. 328. 481. 484.
Rjukanfos 7. 326. 404.
Roma 7.
Rombach 4.
Rotterdam 7. 328.
- S**Sachsen 23.
Salève 16.
- Samaden 14.
San Francisco 349.
Sao-Paulo 17.
Salo 6.
Saltjöbaden 6. 304.
Sanguesa 7. 327.
Schaffhausen 27.
Schenectady 7.
Scheveningen 7.
Schlesien 6. 13. 327. 328.
Schöllenlen 16. 328.
Schöneberg 9. 364.
Schuls 14.
Schweden 13. 20. 21. 22. 406.
Schweiz 13. 16. 18. 25.
Seashore 7.
Seattle 18.
Seebach 14. 408.
Seelisberg 18. 507. 514. 515.
Serra (Brasilien) 487.
Siders 18. 504. 515.
Siegburg 303.
Simplon 22. 27. 201. 325. 326.
 408.
Sion (Sitten) 15.
Solothurn 6. 27.
Sonloup 18. 504. 519.
South-Bend 7.
Southport 9. 200.
Spanien 10.
Spiez 14.
Spindlersfeld 112.
Spokane 7. 398.
Salvatore 486.
Stansstad 16. 475.
Stanserhorn 504. 515.
St. Antoine 17.
St. Avold 5. 327.
St. Bonifacio 7.
St. Cergue 6.
St. Clair 396.
St. Fè 8. 15. 408.
St. Moritz 14.
St. Paul 12.
St. Pölten 7.
St. Sebastian 19.
Steglitz 20.
Stockholm 6. 329.
Stockport 20.
Stubaital 7. 49. 200.
Sumatra 4.
- T**Tabor 6. 329.
Tarajka 18. 490. 504. 515.
Tarasp 14.
Tätra 6. 305. 329. 515.
Täuffelen 6.
Tempelhof 22. 550.
Territet 504.
- Tesserete 6. 292. 328.
Texas 7.
Thamshavn 7.
Thun 326. 406.
Tirol 18.
Tisolt 466.
Toledo 7.
Toge 16. 328. 404. 466. 468.
 469. 479.
Toscolano 6.
Trait 16.
Treib 18. 504. 514. 515.
Treport 515.
Trient 7. 289. 329. 356.
Triest 16. 23. 328.
Trümmelbach 18.
- Ü**überetsch 6.
Übelbach 6.
Ungarn 9.
Untra 21.
Usui 16. 328. 404. 466. 468.
 469. 479.
- V**ác 408.
Valle-Maggia 293. 294. 408.
Valtellina (Veltlin) 14. 27. 200.
Varese 27.
Vermala 18. 504. 515.
Verona 7.
Vesuv 16. 18. 486.
Vigiljoch 19. 526.
Villefranche 7. 297.
Virgl 18. 515.
Visalia 7.
Vordernberg 466.
- W**Warren 8.
Washington 7. 8.
Waterloo 9.
Weidling 20.
Wendelstein 17. 328.
Wengernalp 17. 328. 471.
Westchester 12.
Western 325.
West-Jersey 7.
Wetterhorn 19.
Wettingen 14. 408.
Wien 5. 7. 19. 328. 353. 404. 408.
Wöllersdorf 15.
- Y**Yorkshire 6.
- Z**Zaukerode 4.
Zeche Achenbach 4.
Zolyom-Brezó 466.
Zossen 15.
Zuckerhut 528.
Zürich 22. 27. 352. 354.

Zeitschriften-Verzeichnis (Abkürzungen).

A.E.G.Z.	A.E.G.Zeitung.	L.E.	La Lumière Electrique.
B.B.C.M.	B.B.C.-Mitteilungen, Baden (Schweiz)	L.R.T.J.	The Light Railway & Tramway Journal.
Rev.B.B.C.	(Franz. Auflage)	M.M.E.E.K.	Mitteil. des Ungarischen Architekten- und Ingenieur-Vereins.
B.B.C.M.M.	B.B.C.-Mitteilungen, Mannheim.	M.T.	Il Monitore Tecnico.
B.I.E.K.V.	Bulletin des Int. Eisenbahn-Kongreß-Verbandes.	Organ.	Organ für Fortschritte des Eisenbahnwesens.
B.S.E.V.	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereines.	O.W.O.B.	Oesterreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst.
B.T.S.R.	Bulletin technique de la Suisse Romande.	Proc.	Proceedings of A.I.E.I.
C.M.	Cassiers Magazine.	R.E.	The Railway Engineer.
D.B.Z.	Deutsche Bauzeitung.	Rev.El.	La Revue Electrique.
D.P.T.	Dinglers Polytechnisches Journal.	R.T.	Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane.
D.S.K.B.Z.	Deutsche Straßen- und Kleinbahnen-Zeitung.	R.T.W.	Rundschau für Technik und Wirtschaft.
E.A.	Elektrotechnischer Anzeiger.	R.G.C.F.	Revue Générale des Chemins de fer.
E.B.	Elektrische Bahnen, Berlin.	R.G.E.	Revue Générale d'Electricité.
E.B.T.Z.	Eisenbahntechnische Zeitschrift.	Ry.Eng.	The Railway Engineer.
E.K.B.	Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, Berlin.	Schw.B.Z.	Schweizer Bauzeitung.
El.	Electrician, London.	Schw.E.T.Z.	Schweizerische Elektrotechnische Zeitschrift.
En.	L'Electricien.	S.R.J.	Street Railway Journal.
Eta.	L'Elettrotecnica.	T.H.	Thomson Houston, Paris.
E u.M.	Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien.	T.M.	La Technique Moderne.
E.N.	Engineering News.	T.R.W.	Tramway & Railway Wor'd.
E.N.A.	Elektrot. Neuigkeits-Anzeiger.	T.A.I.E.E.	Transaction of Am. Institut of Electrical Engineers.
Ep.	Der Elektropraktiker.	V.T.	Verkehrstechnik.
E.R.	Electrical Review.	V.T.W.	Verkehrstechnische Woche.
E.R.J.	Elektric Railway Journal.	Z.f.E.	Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien.
E.T.R.	Elektrotechnische Rundschau.	Z.V.D.E.V.	Zeitung des Vereines Deutscher Eisenbahnverwaltungen.
E.T.Z.	Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin.	Z.D.V.I.	Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure.
E.W.	Electrical World.	Z.f.K.B.	Zeitschrift für Kleinbahnen.
F.u.F.	Fördertechnik und Frachtverkehr.	Z.O.I.A.V.	Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereines.
G.A.	Glasers Annalen.	Z.B.B.V.	Zentralblatt für Bauverwaltung.
G.C.	Le Génie Civil.		
G.E.B.	General Electric Co.-Bulletin.		
G.E.R.	General Electric Review.		
I.E.	L'Industrie Electrique.		

Verzeichnis der gekürzten Firmennamen.

A.E.G.	Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.	L.F.K.	Lokomotivfabrik Kraus u. Co., München-Linz.
A.E.G.U.	A.E.G.-Union Elektrizitäts-Gesellschaft, Wien.	L.H.W.	Linke-Hofmannwerke, Breslau.
A.F.A.G.	Akkumulatoren-Fabrik Akt.-Ges., Berlin.	M.A.G.	Maschinenfabrik der k. ung. Staatsbahnen, Budapest.
A.L.W.	American Locomotive Works.	M.F.O.	Maschinenfabrik Oerlikon.
B.B.C.	Brown, Boveri & Cie., Baden (Schweiz) und Mannheim.	M.S.W.	Maffei Schwarzkopff-Werke, Berlin.
B.E.W.	Bergmann Elektrizitätswerke, Berlin.	O.B.B.W.	Oesterreichische Brown-Boveri Werke, Wien.
B.L.W.	Baldwin Locomotive Works.	O.S.S.W.	Oesterreichische Siemens-Schuckert-Werke, Wien.
Ganz	Ganz & Co., Maschinenfabrik u. Eisen-Gießerei A.-G., Budapest.	S.L.F.W.	Schweizerische Lokomotivfabrik, Winterthur.
G.E.Co.	General Electric Co., Schenectady U.S.A.	S.S.W.	Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.
G.W.F.	Grazer Waggonfabrik, Graz.	West.	Westinghouse Electric u. Manufacturing Co., Pittsburg. U.S.A.
Hanomag.	Lokomotivfabrik Hannover.		

Druck von Oscar Brandstetter in Leipzig.



Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung. Eine Einführung für Studierende und Ingenieure. Von Professor Dr. W. Kummer in Zürich. Mit 108 Textabbildungen. 1915. Gebunden Preis M. 6,80.

Die Energieverteilung für elektrische Bahnen. Von Ing. Professor Dr. W. Kummer in Zürich. (II. Band der „Maschinenlehre“). Mit 62 Textabbildungen. 1920. Gebunden Preis M. 22,—.

Die geplante elektrische Zugförderung auf den Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. Von Reg.-Baumeister Wechmann, Dezerrent bei der Eisenbahndirektion Berlin. 1919. Preis M. —,60.

Die selbsttätige Signalanlage der Berliner Hoch- und Untergrundbahn nebst einigen Vorläufern. Von Dr.-Ing. Gustav Kemmann, Geh. Baurat. Mit 15 Tafeln und 188 Abbildungen im Text. 1921 Preis M. 150,—.

E. Schubert, Die Sicherungsarbeiten im Eisenbahnbetriebe. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für Eisenbahnbetriebsbeamte und Studierende des Eisenbahnbaufaches. Fünfte, vollständig neu bearbeitete Auflage von Oscar Roudolf, Regierungs- und Baurat, Mitglied der Eisenbahndirektion Berlin.
Erster Band; Elektrische Telegraphen, Fernsprechsanlagen, Läutewerke, Kontaktapparate, Blockeinrichtungen. Mit 404 Textabbildungen. 1921. Gebunden Preis M. 60,—.
(C. W. Kreidel's Verlag, Berlin W 9.)

Die Eisenbahn-Sicherungsanlagen. Ein Lehr- und Nachschlagebuch zum Gebrauch in der Praxis, im Büro und bei der Vorbereitung für den technischen Eisenbahndienst, sowie für den Unterricht und die Übungen an technischen Lehranstalten. Von Karl Becker, technischer Eisenbahn-Obersekretär in Darmstadt. Mit 291 Abbildungen, einer Verschlußtafel und einem Sachregister. 1920. Gebunden Preis M. 30,—.
(C. W. Kreidel's Verlag, Berlin W 9.)

Elektrische Straßenbahnen und strassenbahnähnliche Vorort- und Überlandbahnen. Vorarbeiten, Kostenanschläge und Bauausführungen von Gleis-, Leitungs-, Kraftwerks- und sonstigen Betriebsanlagen. Von Oberingenieur K. Trautvetter, Beuthen (O.-S.). Mit 334 Textfiguren. 1913. Preis M. 8,—.

Linienführung elektrischer Bahnen. Von Oberingenieur K. Trautvetter, Hilfsarbeiter im Ministerium der öffentlichen Arbeiten. 1920. Preis M. 12,—; gebunden M. 14 —.

Ertragsermittlung von Klein- und Nebenbahnen. Wirtschaftliche Studie über den Einfluß äußerer Einwirkungen auf das Ertragsergebnis von Nebenbahnen. Von Dr.-Ing. Hans Weber, Zürich. Mit 2 Abbildungen. 1920. (Sonderdruck aus der „Zeitschrift für Kleinbahnen“.) Preis M. 6,—.

Die Ertragswirtschaft der schweizerischen Nebenbahnen. Von Dr.-Ing. Hans Weber, Zürich. Mit einer Karte. 1919. Preis M. 6,—.

Die Dampflokomotiven der Gegenwart. Hand- und Lehrbuch für den Lokomotivbau und -betrieb, sowie für Studierende des Maschinenbaues. Unter Durcharbeitung umfangreicher amtlicher Versuchsergebnisse und des Schrifttums des In- und Auslandes sowie mit besonderer Berücksichtigung der Erfahrungen mit Schmidtschen Heißdampf-Lokomotiven der Preußischen Staatseisenbahnverwaltung. Von Geh. Baurat Dr.-Ing. E. h. Robert Garbe. Zweite, vollständig neubearbeitete und stark vermehrte Auflage. In einem Text- und Tafelbande. Mit 722 Textabbildungen und 54 lithographischen Tafeln mit den Bauzeichnungen neuer, erprobter bzw. lehrreicher Heißdampflokomotiven des In- und Auslandes. 1920.
Gebunden Preis M. 280,—.

Einführung in die Berechnung und Konstruktion von Dampflokomotiven. Ein Nachschlagewerk für in der Praxis stehende und angehende Ingenieure, sowie für Studierende des Maschinenbaufaches. Von Wilh. Bauer und Xaver Stürzer, Dipl.-Ingenieure. Mit 321 Abbildungen und 16 Tafeln. 1911.
Preis M. 13,60.

(C. W. Kreidels Verlag, Berlin W 9.)

Die neue Lokomotivwerkstätte Nied. Von F. Soder, Regierungs- und Baurat in Neumünster, Holstein. Mit 12 Tafeln und 46 Abbildungen im Text. 1921. (Sonderdruck aus dem „Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens“, Jahrgang 1921, Heft 1—12.)
Preis M. 24,—.

(C. W. Kreidels Verlag, Berlin W 9.)

Die Drahtseilbahnen (Schwebebahnen). Ihr Aufbau und ihre Verwendung. Von Regierungs-Baumeister Prof. Dipl.-Ing. P. Stephan. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 543 Textabbildungen und 3 Tafeln. 1921. Gebunden Preis M. 150.—.

Die Feldschwächung bei Bahnmotoren. Von Dr.-Ing. L. Adler, Oberingenieur der Großen Berliner Straßenbahn. Mit 37 Textabbildungen. 1919. Preis M. 4,20.

Die elektrische Kraftübertragung. Von Oberingenieur Dipl.-Ing. Herbert Kyser. In drei Bänden.

I. Band: **Die Motoren, Umformer und Transformatoren.** Ihre Arbeitsweise, Schaltung, Anwendung und Ausführung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 305 Textfiguren und 6 Tafeln. Unveränderter Neudruck.
Erscheint im Frühjahr 1922.

II. Band: **Die Niederspannungs- und Hochspannungs-Leitungsanlagen.** Ihre Projektierung, Berechnung, elektrische und mechanische Ausführung und Untersuchung. Zweite, umgearbeitete Auflage. Mit 319 Textfiguren und 44 Tabellen. 1921.
Gebunden Preis M. 90,—.

III. Band: **Die Leistung, Antriebsmaschinen, Generatoren, Schaltanlagen und Hilfseinrichtungen des Kraftwerkes.**
In Vorbereitung.

Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze in Theorie und Praxis.

Von Dipl.-Ing. Josef Herzog †, Budapest, und Clarence Feldmann, Professor an der Technischen Hochschule zu Delft. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 519 Textfiguren. 1921.
Gebunden Preis M. 136,—.

Die Transformatoren. Von Dr. techn. Milan Vidmar, Professor der Universität Ljubljana, Direktor der Maschinenfabriken und Gießereien A.-G. Ljubljana. Mit 297 Textabbildungen. 1921.
Preis M. 110,—; gebunden M. 120,—.

Die Berechnung der Anlaß- und Regelwiderstände. Von Ingenieur Erich Jasse. Mit 65 Textabbildungen. 1921.
Preis M. 27,—.

Die Wechselstromtechnik. Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. E. Arnold, Karlsruhe. In 5 Bänden. Unveränderter Neudruck. Unter der Presse.

I. **Theorie der Wechselströme.** Von J. L. la Cour und O. S. Bragstad. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 591 Textfiguren.

II. **Die Transformatoren.** Ihre Theorie, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von E. Arnold und J. L. la Cour. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 443 Textfiguren und 6 Tafeln.

III. **Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen.** Von E. Arnold. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 463 Textfiguren und 5 Tafeln.

IV. **Die synchronen Wechselstrommaschinen,** Generatoren, Motoren und Umformer. Ihre Theorie, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von E. Arnold und J. L. la Cour. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 530 Textfiguren und 18 Tafeln.

V. **Die asynchronen Wechselstrommaschinen.**

1. Teil: **Die Induktionsmaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von E. Arnold und J. L. la Cour, unter Mitwirkung von A. Fraenckel. Mit 307 Textfiguren und 10 Tafeln.

2. Teil: **Die Wechselstrom-Kommutatormaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von E. Arnold, J. L. la Cour und A. Fraenckel. Mit 400 Textfiguren und 8 Tafeln.

Arnold-la Cour, Die Gleichstrommaschine. Ihre Theorie, Untersuchung, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage. Herausgegeben von J. L. la Cour. In 2 Bänden.

Erster Band: **Theorie und Untersuchung.** Mit 570 Textfiguren. Unveränderter Neudruck 1921. Gebunden Preis M. 120,—.

Zweiter Band: **Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise.** In Vorbereitung.

Die Berechnung von Gleich- und Wechselstromsystemen. Neue Gesetze über ihre Leistungsaufnahme. Von Dr.-Ing. Fr. Natalis. Mit 19 Textfiguren. 1920. Preis M. 6,—.

Die Hochspannungs-Gleichstrommaschine. Eine grundlegende Theorie. Von Elektroingenieur Dr. A. Bolliger. (Zürich). Mit 53 Textfiguren. 1921. Preis M. 18,—.

Die symbolische Methode zur Lösung der Wechselstromaufgaben. Einführung in den praktischen Gebrauch. Von Hugo Ring, Ingenieur der Firma Blohm & Voß (Hamburg). Mit 33 Textfiguren. 1921. Preis M. 12,—.

Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Ein Lehrbuch. Von Prof. Rudolf Richter, Karlsruhe. Mit 377 Textabbildungen. 1920. Gebunden Preis M. 78,—.

Die asynchronen Wechselfeldmotoren. Kommutator- und Induktionsmotoren. Von Prof. Dr. Gustav Benischke. Mit 89 Abbildungen im Text. 1920. Preis M. 16,—.

Hilfsbuch für die Elektrotechnik. Unter Mitwirkung namhafter Fachgenossen bearbeitet und herausgegeben von Dr. Karl Strecker. Neunte, umgearbeitete Auflage. Mit 552 Textabbildungen. 1921. Gebunden Preis M. 70,—.

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik. Von Prof. Dr. A. Thomälen in Karlsruhe. Neunte, verbesserte Auflage. Mit 555 Textbildern. Erscheint im März 1922.

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. Von Prof. Dr. Gustav Benischke. Fünfte, vermehrte Auflage. Mit 602 Abbildungen im Text. 1920. Preis M. 66,—; gebunden M. 76,—.

Elektrische Starkstromanlagen. Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb. Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Studienrat Dipl.-Ing. Emil Kosack (Magdeburg). Fünfte, durchgesehene Auflage. Mit 294 Textfiguren. 1921. Gebunden Preis M. 32,—.

Schaltungen von Gleich- und Wechselstromanlagen. Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren, Lichtanlagen, Kraftwerke und Umformerstationen. Ein Lehr- und Hilfsbuch von Dipl.-Ing. Emil Kosack, Studienrat an den Staatl. vereinigten Maschinenbauschulen zu Magdeburg. Mit 226 Textfiguren. Erscheint im Frühjahr 1922.

Elektromotoren. Ein Leitfaden zum Gebrauch für Studierende, Betriebsleiter und Elektromontiere. Von Dr.-Ing. Johann Grabscheid, Wien. Mit 72 Textabbildungen. 1921. Preis M. 15,—.

Die Elektrotechnik und die elektromotorischen Antriebe. Ein elementares Lehrbuch für technische Mittelschulen und zum Selbstunterricht. Von Dipl.-Ing. Wilhelm Lehmann. Mit 520 Textabbildungen. Erscheint im Frühjahr 1922.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern.

Erster Band: Erstes Heft (abgeschlossen am 1. März 1920). Mit 115 Textfiguren und 2 Bildnistafeln. Unter Mitwirkung von bewährten Fachleuten herausgegeben von Professor Dr. Carl Dietrich Harries, Geheimer Regierungsrat. 1920. Preis M. 250,— (nach dem Auslande ohne Valuta-Zuschlag).

Erster Band: Zweites Heft abgeschlossen am 1. März 1921. Mit 86 Textfiguren, 1 Bildnis und 1 Tafel. 1921. Preis M. 200,— (nach dem Auslande ohne Valuta-Zuschlag).

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



354126 L/1