

ELEKTRISCHE ZUGFÖRDERUNG

HANDBUCH FÜR THEORIE UND ANWENDUNG DER
ELEKTRISCHEN ZUGKRAFT AUF EISENBAHNEN

VON

DR.-ING. E. E. SEEFEHLNER

WIEN

MIT EINEM KAPITEL ÜBER ZAHNBAHNEN
UND DRAHTSEILBAHNEN

VON

ING. H. H. PETER

ZÜRICH

ZWEITE
VERMEHRTE UND VERBESSERTE AUFLAGE

MIT 751 ABBILDUNGEN IM TEXT
UND AUF EINER TAFEL



SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG GMBH

ISBN 978-3-642-50633-8 ISBN 978-3-642-50943-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-50943-8

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG
IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN.

COPYRIGHT 1922 BY SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG
URSPRÜNGLICH ERSCHIENEN BEI JULIUS SPRINGER IN BERLIN 1922
SOFTCOVER REPRINT OF THE HARDCOVER 2ND EDITION 1922

Vorwort zur ersten Auflage.

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 Berührungspunkte 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. Die Sachlage lag z. B. bei den Straßenbahnen mit früher animalischer Zugkraft vor. Helfend stand der Elektrotechnik im Kampf um dieses Gebiet der Umstand zur Seite, daß wegen Minderwertigkeit des Pferdebetriebes und der damaligen Rückständigkeit des Städtewesens überhaupt die Straßenbahnnetze 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 Lokalbahn-technik 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 Elektrobahnengineering 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 Zugsbewegung im Zuge selbst erzeugt und verbraucht wird.

Vom Selbstfahrerbetrieb abgesehen, wird beim elektrischen Betrieb die Zugkraft in ortsfesten Anlagen erzeugt, mittels geeigneter 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 näher 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 Handbuches 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 benützt.

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 mühevollere 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 Überlassung 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 Zieles unterstützt hat, sei auch hier der aufrichtige Dank ausgesprochen.

Wien, im Dezember 1921.

Dr.-Ing. Seefehlner.

Vorwort zur zweiten Auflage.

In erfreulich kurzer Zeit nach dem Erscheinen der ersten Auflage des „Handbuches“ erweist sich die Notwendigkeit einer zweiten Auflage. Aus dieser Tatsache und aus den Besprechungen, die über das Werk in der Fachliteratur erschienen sind, glaubt der Verfasser schließen zu dürfen, daß die Art und das System der Behandlung des Gegenstandes, sowie die Gliederung des Stoffes in Fachkreisen Beifall gefunden haben.

In diesem Belange erscheint daher die zweite Auflage in grundsätzlich unveränderter Form.

Der Verfasser beschränkte sich darauf, die seither erzielten belangreichen Fortschritte und Leistungen der Technik und Wissenschaft auf diesem Gebiete zu berücksichtigen, die mit Unterstützung wohlwollender Fachkollegen festgestellten Lücken und Mängel zu beheben und die Behandlung des Stoffes, wo dies als nötig empfunden wurde, zu vertiefen.

Die Abfassung der Abschnitte: Zahnbahnen, Stand- und Schwebeseilbahnen hat für die zweite Auflage Ing. H. H. Peter allein besorgt.

Besonderer Dank gebührt Herrn Ing. Rudolf Pfeffer für die äußerst gewissenhafte Korrektur der zweiten Auflage.

Wien, im Juli 1924.

Dr.-Ing. Seefehlner.

Die Neuabfassung der Abschnitte über Zahn- und Seilbahnen nimmt, soweit es der Handbuchcharakter des Werkes gestattet, auf die Bedürfnisse der Praxis möglichst Bedacht. Ich habe deshalb nicht nur jüngere Bahnausführungen tunlichst berücksichtigt, sondern auch einige Ableitungen, wie Längenprofil und Gefällsausrundungen bei Seilbahnen, entsprechend meiner Vorlesung über Spezialbahnen an der E.T.H. in kürzerer und brauchbarer Form dargestellt.

Zürich, 1. August 1924.

Dipl.-Ing. H. H. Peter.

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil.

Allgemeines.

	Seite
I. Richtlinien der Eisenbahntechnik	1
II. Systeme der elektrischen Zugförderung	2
III. Vor- und Nachteile der elektrischen Zugförderung	3
IV. Ausdehnung des elektrischen Vollbahnbetriebes	5
V. Allgemeine Kennzeichnung der verschiedenen Bahnarten.	

A. Reibungsbahnen.

1. Industriebahnen	6
2. Straßenbahnen	7
3. Lokalbahnen	8
4. Stadtbahnen	11
5. Vollbahnen	14
6. Gleislose Bahnen	20

B. Fahrzeuge mit eigener Kraftquelle.

7. Benzin- (Benzol-, Rohöl-) elektrische Fahrzeuge	21
8. Speicherfahrzeuge	22
9. Umformerlokomotiven	23

C. Spezialbahnen.

10. Zahnbahnen	24
11. Drahtseilbahnen	25
12. Schwebeseilbahnen	26

Zweiter Teil.

Stromerzeugung.

1. Technisch-wirtschaftliche Grundlagen	28
2. Art der Belastung	31
3. Milderung der Spitzen	32
4. Kurzschlüsse	32
5. Mittel für ein elastisches Verhalten	33
6. Quecksilberdampf-Gleichrichter	37
7. Selbsttätige Umformerwerke	38
8. Periodenumformer	41
9. Wirtschaftliche Bedeutung des Ausgleiches der Belastung. Pufferung	42
10. Resonanzerscheinungen	44
11. Schaltungsregeln	44
12. Schutzeinrichtungen	45
13. Einpolige Erdung	45
14. Strombezug aus bahnfremden Werken	46

Dritter Teil.

Die Leitungsanlage.

Fern- und Speiseleitungen	48
-------------------------------------	----

Die Arbeitsleitung (Fahrleitung).

A. Theorie und Berechnung.

I. Elektrische Eigenschaften, Festwerte, Berechnung der Leitungsanlage.	
1. Gang der Rechnung	49
2. Elektrische Kennwerte der Leitungsanlage	50

II. Die Stromverteilung.	Seite
1. Allgemeines	56
2. Berechnung der Stromverteilung	57
III. Fernwirkungen der Stromzuführung für die Zugförderung.	
1. Fernwirkungen	62
2. Statische Induktion	63
3. Elektrodynamische Wirkungen	64
4. Elektromagnetische Induktion	68
IV. Mechanische Eigenschaften.	
1. Allgemeines. Systeme	70
2. Der Längsschnitt (Durchhangberechnung)	70
Grundgleichungen	71
Die Belastung der Leitung	75
Die allgemeine Zustandsgleichung	76
Zeichnerisches Rechenverfahren zur Lösung der allgemeinen Zustandsgleichung	79
Änderung des Leitungsgewichtes	81
Zahlenbeispiele	84
Schiefe Spannfelder	87
Messung des Durchhanges	89
Wahl des Durchhanges für das Tragseil	90
Verschiedene Belastungen in benachbarten Spannfeldern	92
3. Lageplan der Fahrleitung für Rollenstromabnehmer	94
4. Lageplan der Fahrleitung für Bügelstromabnehmer	95
5. Das Spannwerk	97
6. Berechnung der Stützpunkte	98
Mauerhaken, Rosetten	98
Armausleger	99
Maste	99

B. Leitungsbau.

V. Der Leitungsbau.	
1. Zweck der Fahrleitung	100
a) Die Oberleitung	101
b) Die Stromschiene	102
c) Die Unterleitung	102
2. Die selbsttragende Fahrleitung	102
Der Arbeitsdraht	102
Querschnittsformen	103
Das Klemmwerk	104
Isolatoren und Isolatorhalter	105
Tragwerk und Stützpunkte	110
Doppelpolige (Drehstrom-) Fahrleitungen	114
Fahrleitungen in Stollen und Tunnels	114
3. Fahrleitungen mit Vielfachaufhängung	115
Das Einfachkettenwerk	120
Das Verbundkettenwerk	122
Das Doppelkettenwerk	122
Kettenwerk System Paul	123
Draht- und Seilverbinder	123
Die Isolatoren	126
Streckentrennung, Schaltung, Blitzschutz	131
4. Fahrleitung mit Stromschiene	133
5. Die Unterleitung	137
6. Die Rückleitung	138

Vierter Teil.

Die Fahrzeuge.

Bewegungsgesetze der Züge.

I. Bahnwiderstände.	
1. Der Reibungswiderstand	142
2. Der Luftwiderstand	143

	Seite
3. Der Hebungswiderstand	143
4. Der Krümmungswiderstand	144
5. Die Beschleunigung	144
6. Analyse der Bewegungsbilder. Wirkung der umlaufenden Massen	149
7. Ermittlung des Fahrwiderstandes für Straßenbahnfahrzeuge	155
8. Ermittlung des Fahrwiderstandes mit veränderlichen Werten	156
9. Erfahrungszahlen und -formeln für die Fahrwiderstände	157
10. Schlußfolgerungen für den Lokomotivbau	161
II. Die Zugkraft am Radumfang. Die Fahrgeschwindigkeit.	
1. Physikalische Grundlagen. Der Reibungsschluß	161
2. Die Reibungsgrenze	164
3. Das angehängte Zugsgewicht	165
4. Die Form des Radreifens	167
5. Der Achsdruck	168
6. Das spezifische Baugewicht und die Reibungsgeschwindigkeit von Triebfahrzeugen	169
7. Rechentafeln für das Triebfahrzeug	171
8. Das Gewicht ausgeführter Lokomotiven	173
9. Die Fahrlinien. Belastungstafeln	174
10. Haltezeiten der Züge	182
11. Fahrgeschwindigkeiten der Zugförderung	182
Die elektrische Ausrüstung der Fahrzeuge.	
III. Der Bahnmotor.	
1. Kennlinien des Bahnmotors	185
2. Die Abhängigkeit von der Klemmenspannung	187
3. Die Regelung der Geschwindigkeit	188
4. Das Anlassen	189
5. Parallelbetrieb	190
6. Vergleich mit der Dampflokomotive	192
7. Arten des Einphasenkollektormotors	192
8. Die Stromwendung	193
9. Der doppeltgespeiste Reihenschlußmotor	194
10. Der Reihenschlußmotor mit abgezwigter Kompensation	197
11. Gegenüberstellung des Wechselstrom- und Gleichstrommotors	199
12. Gleichstrombetrieb mit Wechselstromeinrichtungen	199
IV. Die elektrodynamische Bremsung.	
1. Arten der elektrodynamischen Bremsung	200
2. Die unmittelbare Kurzschlußbremsung	201
3. Die gemischte Bremsung	202
4. Die mittelbare elektromagnetische Bremsung	203
5. Die Berechnung der Bremswiderstände	203
6. Bremsschaltungen	205
7. Die elektromagnetische Solenoidbremse	206
8. Berechnung der Solenoidbremse	207
9. Schaltung der Solenoidbremse	209
10. Die Scheibenbremsen	209
11. Die Schienenbremsen	210
12. Die Nutzbremung	211
13. Die Nutzbremung mit Gleichstrommotoren	212
14. Die Nutzbremung mit Drehstrominduktionsmotoren	214
15. Die Nutzbremung mit Wechselstromkollektormotoren	214
16. Vergleich der Wirkungsweise der Nutzbremung bei Gleich- und Wechselstrom	216
V. Die Bemessung der Motorleistung.	
1. Grundsätze für die Bemessung der Motoren	217
2. Berechnung des Stromverbrauches	218
3. Die Erwärmung und die Abkühlung; ihre Gesetze und Berechnung	221
a) Grundgesetze der Erwärmung	221
b) Eigenschaften der Temperaturkurven	224
c) Zeichnerische Rechenbehelfe	226
d) Vereinigung der thermischen und mechanischen Charakteristik	231
e) Wärmetechnische Eigenschaften der Maschinen	234
f) Beispiele	236

VI. Die Bauformen des Bahnmotors. Das Getriebe.		Seite
1. Die Bauformen der Triebmaschine		240
2. Verwendungsgebiete		241
3. Der Achsmotor		242
4. Der Vorlegemotor		245
Der Doppelmotor		250
Gefederte Zahnräder		251
Mechanische Ankerbeanspruchung		254
Die Motor-Aufhängung		255
Die Kühlung		255
5. Der Gestellmotor		258
6. Das Parallelkurbelgetriebe		263
a) Das elementare Kurbelgetriebe		266
b) Die Schlitzkuppelstange		273
c) Das Parallelkurbelgetriebe mit Blindwelle		277
d) Der Zweistangenantrieb mit Blindwelle		281
e) Der Schlitzkuppelrahmen		283
7. Die Schüttelschwingungen des massenreichen Parallelkurbelgetriebes		288
8. Das doppelte Schubkurbelgetriebe		293
9. Das Lentz-Getriebe		299
10. Vereinheitlichung der Triebmaschinen		301
11. Der Gestellmotor für Einzelantrieb		302
12. Stetigkeitsstörungen beim Zahnradgetriebe		303
13. Grundsätzliche Einteilung und Übersicht der Getriebearten		306
VII. Die Steuerung der Fahrzeuge.		
1. Grundgleichung		308
2. Regelarten		309
3. Arten der Steuerung		310
4. Grundsätze der Schaltregeln		310
5. Fahrschalter für unmittelbare Steuerung		314
6. Schaltung der Widerstände		320
7. Mittelbare Steuerungen		321
8. Elektromagnetische Schalter für indirekte Steuerungen		322
9. Die P.C-Steuerung der General Electric Co.		336
10. Stufenlose Steuerung für Gleichstrom		337
11. Stufenlose Steuerung für Wechselstrom		342
12. Steuerung mit Bürstenverschiebung		343
13. Steuerung mit Zusatztransformator		345
14. Unmittelbare Schaltung		346
15. Die Zahl der Stufen		346
16. Die Bemessung der Widerstände		349
17. Steuerung von Drehstromlokomotiven		349
18. Angaben über ausgeführte Steuerungen		351
VIII. Stromabnehmer.		
1. Allgemeines		358
2. Stromabnehmerarten		359
3. Der Rollenstromabnehmer		359
4. Der (Schleif-) Bügelstromabnehmer		362
5. Der Walzenstromabnehmer		369
6. Stromabnehmer für Unterleitung		370
7. Stromabnehmer für Stromschiene		371
8. Isolation der Stromabnehmer		372
IX. Nebeneinrichtungen.		
1. Die Drosselspule		373
2. Schmelzsicherungen, Höchststromausschalter		374
3. Die Beleuchtung		374
4. Die Heizung		375
5. Kupplungen		375
6. Kabel		376

Bauregeln für Triebfahrzeuge mit Reibungsbetrieb.	
X. Straßenbahntriebwagen.	Seite
1. Bemessung der Wagengröße	379
2. Bauformen	380
3. Untergestelle	384
4. Wagen mit Mitteleinstieg	387
5. Gewichtangaben	387
6. Die Schutzvorrichtungen	388
7. Die Bremse	389
XI. Triebwagen für Stadt- (Untergrund-) Bahnen.	
1. Grundlagen für den Entwurf	390
2. Grundriß der Wagen	397
3. Stromzuführung; elektrische Ausrüstung	399
XII. Industrielokomotiven.	
1. Besondere Kennzeichen	400
2. Zweimotorige Ausrüstung	404
3. Motoren außerhalb der Achsen	404
4. Hintereinander-Anordnung der Motoren	404
5. Innenliegende Motoranordnung	404
6. Drehgestell-Lokomotiven	405
7. Verschieblokomotiven	406
8. Einrichtung des Führerstandes	406
XIII. Vollbahnlokomotiven.	
1. Benennung der Bauarten auf Grund der Achsfolge	411
2. Maßbestimmungen	412
3. Anordnung der elektrischen Ausrüstung	412
4. Die Mechanik	413
5. Bauformen	418
6. Lokomotiventwürfe	419
7. Der Rahmen	425
8. Die Kühlung	425
9. Anordnung der Bremse	425
10. Baulängen ausgeführter Lokomotiven	426
11. Angaben über ausgeführte Lokomotiven	427
XIV. Gleislose Bahnen.	
1. Allgemeines	511
2. Die Fahrleitung; die Stromabnehmer	513
3. Stromsystem: Betriebsspannung	515
4. Fahrzeuge	515
XV. Kalorische Fahrzeuge mit elektrischer Kraftübertragung.	
1. Allgemeines	516
2. Grundsätze. Dampfelektrische Lokomotive	516
3. Diesel- und benzinelektrische Fahrzeuge	518
4. Bauregeln für die fahrbare Triebmaschine	522
5. Bauformen der Triebfahrzeuge	523
6. Die elektrische Ausrüstung	525
XVI. Umformerfahrzeuge (Lokomotiven)	527
XVII. Speicherfahrzeuge	529

Fünfter Teil.

Spezialbahnen.

I. Zahnbahnen.	
1. Allgemeines	536
2. Die Zugkraft	537
3. Der Zahndruck	538
4. Der Auftrieb	538
5. Standsicherheit	539
6. Zahnstangensysteme	545
7. Die Leiterzahnstange (Riggenbach)	546
8. Zahnstange Abt	547
9. Zahnstange Strub	547
10. Einfache Lamellen-Zahnstange	548

	Seite
11. Zahnstange Locher	548
12. Zahnstange Peter	549
13. Arten der Zahnbahnen	549
14. Arten der Triebfahrzeuge	551
15. Antriebsmotoren und Getriebe	553
16. Die Rutschkupplung	554
17. Die Handbremse	554
18. Die Zange	555
19. Die selbsttätige Bremse	556
20. Das Gestell	556
21. Lokomotiven für reine Zahnbahnen	556
22. Motorwagen für reine Zahnbahnen	558
23. Triebfahrzeuge für gemischte Bahnen	561
24. Lokomotiven für gemischten Betrieb	562
25. Vollbahnverkehr	566
26. Elektrische Ausrüstung	567
27. Elektrische Nebeneinrichtungen	568
28. Vorausberechnung der Lokomotivleistung	569
29. Geschobene Fahrzeuge	571
II. Standseilbahnen.	
1. Allgemeines	572
2. Betriebsarten	573
3. Wasserlast- und motorischer Antrieb	574
4. Linienführung und Betriebssysteme	574
5. Oberbausysteme	576
6. Das Längenprofil (Höhenplan)	576
7. Das theoretische Längenprofil für unveränderliche Zugkraft	577
8. Die Gefällsausrundung	581
9. Die Kettenlinienausrundung	581
10. Die Parabelausrundung	582
11. Die Tragrollen	584
12. Die Kurvenrollen	585
13. Bauformen der Seilrollen	586
14. Das Seil	587
15. Der Kraftbedarf	591
16. Der Betriebsmotor	592
17. Das Windwerk	595
18. Signal- und Telephoneinrichtungen	600
19. Fahrzeuge	601
III. Schwebeseilbahnen	604

Sechster Teil.

Wirtschaftliche Fragen.

I. Finanzielle Grundlagen	610
II. Wirtschaftlichkeit der elektrischen Zugförderung auf Vollbahnen	614
III. Lebensdauer der der Abnutzung unterworfenen Bestandteile	622

Anhang.

Kurzer Abriß der angewandten Nomographie.

1. Allgemeines	628	7. Fluchtlinientafel mit einer krummlinigen	
2. Das rechtwinklige Bezugssystem	628	Skala	632
3. Die Nomographie	629	8. Die Z-Tafel	633
4. Behelfe der Nomographie	629	9. Projektive Skalen	635
5. Die Summen-Rechentafel	630	10. Verhältnistafel	637
6. Das kollineare System mit logarithmischer		11. Die Strahlentafel	639
Skala	632		
Zeitschriftenverzeichnis (Abkürzungen)	641		
Verzeichnis der gekürzten Firmennamen	641		
Namenverzeichnis (Verfasser)	642		
Ortsverzeichnis	647		
Sachverzeichnis	650		

Erster Teil.

I. 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 erkennen, die im Gegensatz zu anderen Zweigen des Maschinenwesens und der Elektrotechnik 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 zwangläufige“ Verbindung grundsätzlich vermieden wird.

Diesen Grundsatz — sorgfältige Vermeidung starrer, streng zwangläufiger kinematischer Ketten — sieht man auch sonst verwirklicht, indem es üblich ist, den Schienen eine nachgiebige elastige 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 einzelne Fahrzeuge, die für diesen Zweck dienende Zug- und Stoßvorrichtung ist stets mit einer reichlichen Federung versehen. Man ist sich eben vorweg klar darüber, daß eine so genaue Herstellung der Einrichtungen der Eisenbahnen, 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 der im Eisenbahnwesen angewandten Elektrotechnik dem Umstand zuzuschreiben sind, daß dieser Grundsatz unbeachtet blieb.

II. Systeme der elektrischen Zugförderung.

Literatur betreffend das gesamte elektrische Eisenbahnwesen:

- Burch: Electric traction for railway trains. New York: Mc. Graw-Hill Book Co. 1911.
 Carter: Railway electric traction. London: Arnold 1922.
 Dawson: Electric traction on railways. London: Nostrand.
 Dover: Electric traction. London: S. J. Pitman & Sons 1922.
 Marie: Traction électrique. Paris: Gauthiers Villars et Cie. 1922.
 Martin: Traction électrique. Paris: Librairie de l'enseignement technique 1920.
 Oppizzi: Trazione elettrica. Mailand: Hoepli 1920.
 Richey: Electric railway handbook. New York: Mc. Graw-Hill Book Co.
 Winkler: Zur Geschichte der elektrischen Eisenbahnen. SZ 1922, H. 10.

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 möglicher Vermischung insofern auf Schwierigkeiten, als es sich zeigt, daß die elektrischen Systeme kein kennzeichnendes Merkmal für bestimmte Bahnarten 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- od. Dampfkraftwerk)
Mittelspannungs-Betriebe (500—1000 V)	indirekte Speisung	Drehstrom Wechselstrom	Wechselstrom $\left\{ \begin{array}{l} 15 \\ 25 \sim \\ 50 \end{array} \right.$	selbstbewegl. Anlage (Benzelektro- und Akkum.-Fahrzeuge, Umformerlokos)
Hochspannungs-Betriebe (2500—16 000 V)			Drehstrom $\left\{ \begin{array}{l} 15 \\ 25 \sim \\ 50 \end{array} \right.$	

Ohne mit dieser Aufzählung alle möglichen Arten erschöpft zu haben, so geht aus ihr doch hervor, wie groß die Zahl der verschiedenen Gesichtspunkte und der möglichen Kombinationen ist.

Bei den rein praktischen Zielen, die diesem Werke, das nicht das Eisenbahnwesen 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.

Geleislose Bahnen.

Bahnen mit selbstbeweglicher Krafterzeugung:

Benzinelektrische Fahrzeuge.

Akkumulatorenfahrzeuge.

Umformerlokomotiven.

Spezialbahnen:

Zahnbahnen.

Standseilbahnen.

Schwebbahnen.

Die Merkmale der hier genannten Gruppen sind jedoch nicht so scharf ausgeprägt, daß immer eine klar erkennbare Abgrenzung ersichtlich wäre; vielmehr sind diejenigen Fälle zahlreich, bei denen eine Anlage eisenbahntechnisch ausgesprochen in eine bestimmte Gruppe gehört und dennoch alle Eigentümlichkeiten einer anderen Gruppe aufweist.

III. Die Vor- und Nachteile der elektrischen Zugförderung.

Die bekannte Tatsache, daß die Elektrizität im Straßenbahnwesen praktisch jede andere Betriebskraft verdrängt hat und auch bei allen übrigen Bahnarten fortschreitende Anwendung findet, läßt es wünschenswert erscheinen, sich über die Eigenschaften dieser Betriebsart für die Zugförderung kurz Rechenschaft zu geben.

Die elektrische Zugförderung bzw. die Anwendung der elektrischen Betriebskraft kann anderen bislang gebräuchlichen Betriebsarten technisch und wirtschaftlich überlegen sein, beides auch in dem Sinne, daß die erzielbare Leistungsfähigkeit durch den elektrischen Betrieb gesteigert werden kann.

Ganz allgemein ist die elektrische Kraftübertragung jedem anderen System dadurch überlegen, daß die Krafterzeugung überhaupt an wenige, selbstverständlich günstig gelegene Stellen vereinigt, die Arbeit mit wirtschaftlichen Mitteln den Verbrauchsstellen zugeführt und an diesen in mechanische Form umgewandelt werden kann.

Dies ist zum Unterschied vom animalischen Betrieb und dem Dampfbetrieb technisch und wirtschaftlich durchführbar ohne Verunreinigung der Fahrbahn, ohne störende Geräusche und ohne daß der Größe der Leistungsfähigkeit nach oben oder unten Grenzen gesetzt sind, die der Entwicklung, wenigstens vom Standpunkt der elektrischen Einrichtung, hindernd wären.

Diese hier allgemein und kurz zusammengefaßten Vorteile der elektrischen Betriebskraft kommen insbesondere im Vollbahnbetriebe zur Geltung.

1. Die Zusammenlegung der Krafterzeugung in wenige große mit allen Errungenschaften der Technik ausgerüstete Erzeugungsstätten steigert insbesondere die Wirtschaftlichkeit im Verbrauch der Heizstoffe und ermöglicht die Verwertung von

minderwertigen Kohlsorten, die zur Heizung von Lokomotiven ungeeignet sind, unmittelbar am Gewinnungsort, ebenso die Heranziehung der Wasserkräfte zur Zugförderung. In großen Vollbahnbetrieben wurden bei kalorischer Stromerzeugung auf diese Art Ersparnisse von bis 66% erzielt.

2. Keine Rauchplage in den Tunnels und Abstellbahnhöfen.

3. Die bestehenden Anlageverhältnisse der Bahnen bilden keine Einschränkung für die Zugkraft und Geschwindigkeit der elektrischen Lokomotive, da selbst die größten Maschinen die physische Leistungsfähigkeit des Fahrers nicht beanspruchen.

4. Dies gilt insbesondere für Gebirgsstrecken. Umgekehrt braucht man bei Neuanlage von Eisenbahnen die Anwendung beträchtlicher Steigungen nicht zu scheuen, wodurch an den Anlagekosten wesentlich gespart werden kann.

5. Die Nutzbremmung ist auf Rampen anwendbar, wodurch ein vollständig gleichmäßig wirkender, vom Wetter und Zustand der Radreifen unabhängiger Bremsbehelf gewonnen wird. Die Betriebssicherheit erscheint auf diese Art gesteigert.

6. Die Erhaltungskosten der Elektrolokomotive sind, auf gleiche Verkehrsleistung bezogen, wesentlich geringer als diejenigen der Dampflokomotive. Auf der Chicago-, Milwaukee- und St. Paul-Bahn wurden sie mit $\frac{1}{5}$ derjenigen von Dampflokomotiven, bezogen auf dieselbe Verkehrsleistung, festgestellt. Die North-Eastern-Bahn, die auf ihren Linien, ebenso wie die vorgenannte Bahngesellschaft, beide Betriebsarten aufrechterhält, gibt an, daß die Erhaltungskosten der Elektromotiven nur $\frac{1}{4}$ derjenigen der Dampflokomotiven erreichen.

7. Der Betrieb wird gänzlich unabhängig von den klimatischen Verhältnissen, daher regelmäßiger und zuverlässiger, weil die Krafterzeugung eben nicht in der Lokomotive durch das Fahrpersonal erfolgt. Die Einholung von Verspätungen ist durch die vorübergehende Überlastbarkeit der Elektrolokomotive ohne weiteres möglich.

8. Da die Zugsgewichte und Fahrgeschwindigkeiten bis zu den von den Anlageverhältnissen der Strecke gezogenen Grenzen gesteigert werden können, läßt sich ohne Erweiterungsbauten eine Steigerung der Verkehrsleistung auf einer mit Dampfbetrieb schon überlasteten Strecke erzielen, wodurch sich zugleich die Personalkosten verringern.

9. Geringeres Totgewicht der Elektrolokomotive, gleiches Treibgewicht und gleiche Leistung vorausgesetzt, da sie zumindest um einen wesentlichen Teil des Tenders leichter gebaut werden kann. Bei gleicher Zugkraft genügt zufolge deren Stetigkeit ein um 10—20% geringeres Reibungsgewicht.

10. Herabsetzung der Oberbau-Erhaltungskosten wegen geringerer Beanspruchung durch die Elektrolokomotive, die mit keinerlei unausgeglichenen Maßen behaftet ist und die Kraft am Radumfang gleichmäßig abgibt.

11. Die Verunreinigung der Fahrzeuge, Gebäude (Tunnels), Signalleitungen und deren Isolatoren durch Rauch und Ruß entfällt, wodurch sich auch in diesem Belange Ersparnisse erzielen lassen.

12. Die Reinigungs- und Vorbereitungsarbeiten zur Indienststellung der Elektrolokomotive betragen nur einen geringen Bruchteil der bei der Dampflokomotive für Anheizen, Rostreinigen, Aschenablage, Kohlen- und Wassernehmen und Kesselreinigen erforderlichen Zeiten, so daß eine Elektrolokomotive durchschnittlich bis 20 Std. von 24 Std. in Dienst gehalten werden kann. Smith gibt auf Grund der Erfahrungen die kilometrische Jahresleistung der Elektrolokomotive doppelt so hoch an als diejenige der Dampflokomotive. Auf der North-Eastern-Bahn leisten 5 Elektrolokomotiven dasselbe wie 13 Dampflokomotiven. Auf dem Gotthard, wo die Kraft am Zughacken gegenüber dem Dampfbetrieb nicht gesteigert wurde, leisten nach dem Bericht der S. B. B. 85 Elektrolokomotiven

dasselbe wie früher 100 Dampflokomotiven. Amerikanische Eisenbahntechniker setzen durchschnittlich die Verkehrsleistung einer Elektrolokomotive gleich derjenigen zweier Dampflokomotiven.

Die New York—New Haven—Hartfordbahn stellt zeitweilig 95⁰/₀ ihres Fahrparkes in Dienst. Die mittlere Jahresleistung einer Lokomotive beträgt 111000 km bei Tagesleistungen von 450 km. Mit Dampflokomotiven waren bei dieser Bahn nie mehr als 195 km zu erzielen. Im Rangierdienst dieser Bahn waren von 16 Lokomotiven 70⁰/₀ während 7 Jahren täglich 24 Stunden im Dienst. Man konnte auf diese Weise 65⁰/₀ von dem für den gleichen Verschubdienst im Dampfbetrieb verbrauchten Brennstoff ersparen. Auf dieser Strecke stehen die Lokomotiven jeweils 20 Tage ununterbrochen im Dienst, worauf eine Revision erfolgt. Im Schnellzugdienst Luzern—Chiasso der Gotthardbahn sind Tagesleistungen bis 764 km die Regel; im Güterzugdienst 485 bis 363 km. Auf der Chicago-Milw.-St. Paulbahn werden mit elektrischen Lokomotiven Tagesleistungen bis 710 km, Monatsleistungen bis 19500 km erzielt. Eine Revision der Lokomotiven erfolgt nach Läufen von 5000 bis 8000 km.

Auf der Norfolk- und Western-Bahn ersetzen 16 Elektrolokomotiven von je 245 t Gewicht 24 Dampflokomotiven, die samt Tender bei gleichem Triebgewicht etwa 320 t schwer sind.

Auf den chilenischen Staatsbahnen leisten 39 Elektrolokomotiven denselben Dienst, wie früher 100 Dampflokomotiven.

13. Die Elektrolokomotive ist vorübergehend beträchtlich überlastbar; sie arbeitet in weiten Grenzen der Zugkraft und Geschwindigkeit wirtschaftlich, woraus wesentliche Vorteile für die Regelmäßigkeit des Verkehrs erwachsen. Ferner werden keine Betriebsstoffe während des Stillstandes verbraucht.

14. Die mit der Elektrolokomotive erzielbare höhere Beschleunigung, der Entfall des Umwendens für den Wechsel der Fahrtrichtung, schließlich die Anwendbarkeit der Zugsteuerung steigern bedeutend die Leistung vorhandener Bahnhofsanlagen. Am Endbahnhof Philadelphia der Pennsylvaniabahn können mit elektrischem Betrieb täglich 600 Züge abgefertigt werden, gegen höchstens 160 Züge beim früheren Dampfbetrieb.

Als Hauptnachteil steht diesen Vorteilen die Tatsache der hohen Anlagekosten gegenüber und daß die Fernleitungen, und hauptsächlich die am Bahnkörper befindliche Leitungsanlage, die Zahl derjenigen Einrichtungen vermehrt, die erhalten und bedient werden müssen. In diesem Zusammenhange darf die Störung der eigenen und fremden Schwachstromleitungen durch die Fernwirkungen des Bahnstromes nicht unerwähnt bleiben.

Die Abhängigkeit der vom Fahrdraht mit Kraft versorgten elektrischen Lokomotive von der Betriebsfähigkeit der Leitungsanlage, der Unterwerke und des Kraftwerkes vermehren theoretisch auch die Störungsquellen.

IV. Ausdehnung des elektrischen Vollbahnbetriebes.

Bis zum Kriegsausbruch waren zuverlässige statistische Angaben über die Ausdehnung des elektrischen Bahnbetriebes allgemein zugänglich. Dies ist derzeit noch nicht wieder der Fall. Um einen Begriff über den Umfang des elektrischen Bahnbetriebes und damit über die wirtschaftliche Bedeutung dieser Betriebsart zu geben, seien hier einige Angaben angeführt.

In Abb. 1 ist die Zunahme des elektrischen Bahnbetriebes auf der Erde und in Deutschland dargestellt.

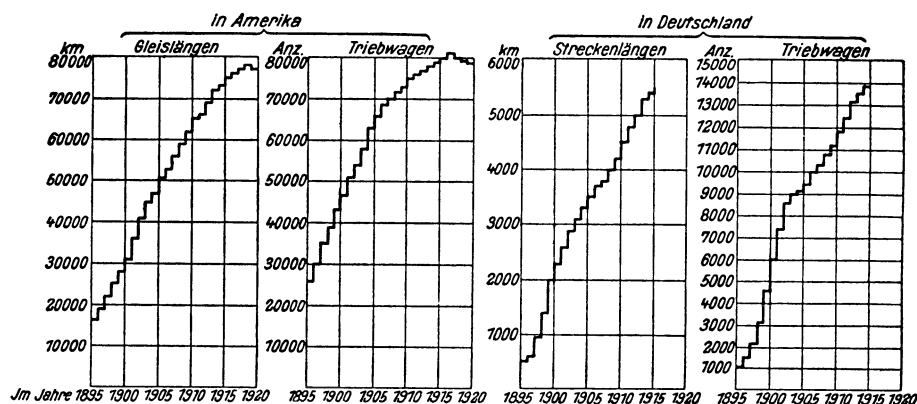


Abb. 1. Verkehrstechnische Statistik der elektrischen Bahnen (VT).

Umfang des elektrischen Betriebes auf den Vollbahnen der Erde.
Stand Ende 1923.

L a n d	Streckenlänge km (im Bau oder in Betrieb)				Anzahl der Lokomotiven
	Stromsystem				
	G.	D.	W.	Insges.	
Nord- u. Süd-Amerika	1317	75	1420	2744	411
Deutschland	—	—	1285	1285	288
England	30	—	—	30	13
Frankreich	691	—	114	805	152
Italien	130	620	—	750	150
Österreich	—	—	460	460	88
Schweden	—	—	438	438	47
Schweiz	33	132	1002	1167	179
Südafrika	275	—	—	275	78
Summe	2476	827	4719	7954	1406

G. = Gleichstrom, D. = Drehstrom, W. = Wechselstrom.

V. Allgemeine Kennzeichnung der verschiedenen Bahnarten.

A. Reibungsbahnen.

1. Industriebahnen.

- AEG Eine elektrisch betriebene Kohlenbahn auf Sumatra. AEGZ 1913, Nr. 7. — DSKBZ 1913.
 Chicago freight railway. ERJ Bd. 60, Nr. 14. 1912.
 Collischon: Elektrische Lokomotive für 500 mm Spur. EBTZ 1905, Nr. 18.
 Elektrische Lokomotiven. EKB 1909, H. 19.
 Erb: Neue Industriebahn-Lokomotiven. Dinger 1908, H. 46.
 Faber: Ein Fall rentabler Güterbeförderung. EKB 1905, H. 35.
 Gunderlach: Elektrische Grubenlokomotivförderung im Ruhrbezirk. Glückauf. 1922, H. 21.
 Hermanns: Einiges über elektrische Grubenlokomotiven. GA 1919, Nr. 998.
 Hildebrand: Die elektrisch betriebene Streckenförderung der Zeche Minister Achenbach. Glückauf 1906.
 Ref. ETZ 1907.
 Kasten: Elektrischer Betrieb auf Postbahnhöfen. ETZ 1915, H. 7.

- Klingelhoef: Lokomotivförderung im Kohlenbergbau unter besonderer Berücksichtigung der elektrischen Lokomotiven. ETZ 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. ETZ 1920, H. 37.
- Passauer: Winke für die Einrichtung untertägiger Streckenförderungen. Verlag SSW.
- Philippi: Die elektr. Anlagen des Kgl. Steinkohlenwerkes Zauckerode b. Dresden. ETZ 1917, H. 1.
- Philippi: Elektrische Grubenlokomotiven in Amerika. EKB 1910, H. 9.
- Reinhart: Elektrische Förderbahnen. ZÖIAV 1911, Nr. 2.
- Riep: Oberleitungslokomotiven für Werkbahnen. ETZ 1913, H. 17.
- Richter: Die elektrische Ausrüstung der Wechselstrom-Grubenlokomotiven der Maffei-Schwarzkopff-Werke. ETZ 1910, H. 51. — Eu.M 1911, H. 14.
- Rüdiger: Der elektrische Abraumbetrieb auf Braunkohlenwerken. Die Braunkohle 1919, Nr. 35.
- Schroedter: Elektrische Eisenerztransportbahnen der Rombacher Hüttenwerke. EKB 1912, H. 35.
- Schroedter: Elektrischer Bahnbetrieb von 2000 V Spannung (Rombacher Hütte). EKB 1907, H. 29. Ref. ZVDI 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. TH 1909, Nr. 163.
- Vogel: Gefahren in elektrischen Lokomotivförderstrecken unter Tags und ihre Verhütung. Glückauf 1922, H. 8. — Ref. Eu.M 1922, H. 24.
- Werther: Die elektrische Schmalspurbahn der Zuckerfabrik Groenendigh in Holland. ETZ 1898, H. 15.
- Le chemin de fer électrique à écartement de 0,6 m, RGE 1919, Nr. 4.
- Die Vorzüge von Grubenlokomotiven. EW 1922, Bd. 80.

Industriebahnen sind meistens Anlagen beschränkten Umfanges 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 weiter 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 vereinzelt 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 sie bei
- b) Untertag-Betrieben aus Gründen der persönlichen Sicherheit auf 110 bis 120 V herabgesetzt werden muß. Für Wechselstrom werden behördlicherseits die Spannungen niedriger angesetzt als für Gleichstrom.
- c) Eine weitere Einschränkung der Betriebsspannung erfolgt insbesondere dann, wenn Oberleitungsbetrieb nicht in Betracht kommt, daher Akkumulatorenfahrzeuge zur Anwendung gelangen und diejenige Spannung gewählt werden kann, die bei gegebener Gewichtsgrenze die größte Kapazität unterzubringen gestattet.

2. Straßenbahnen.

- Adler: Gegenwart und Zukunft der Berliner Straßenbahn. EKB 1912, Heft 12. — GA 1922, Nr. 1080
- Bonfiglietti: Elektrische Bahn mit Dreiphasenstrom in Evian les Bains. ETZ 1898, H. 41.
- Bosshart: Straßenbahnen. Berlin:Götschen 1920.
- Corsepius: Die elektrischen Bahnen. Stuttgart: Enke 1910.
- Derrer: Die Einphasenwechselstrom-Straßenbahnen der Provinz Parma. EKB 1911, H. 3.
- Dietl: Das Kleinbahnnetz in der Borinage. EKB 1905, H. 16.
- Kielland: Die elektrischen Straßenbahnen und Vollbahnen in Norwegen. VT 1921, Mai/Juni.
- Kyser: Die elektrischen Bahnen und ihre Betriebsmittel. Braunschweig: Vieweg 1907.
- Müller: Die 50 Perioden-Einphasenwechselstrom-Straßenbahn in St. Avold (Lothr.). ETZ 1911, H. 1

- Richey: Electric Railway Handbook. New York: Graw-Hill Book Co. 1915.
 Simeon: Güterbeförderung auf elektrischen Straßenbahnen. EKB 1918, S. 527 und 1919, S. 29. Ref. ETZ 1920, H. 51.
 Sztrokay: Die Budapester elektrischen Bahnen und der Ring. EKB 1922, H. 9.
 Wiesinger: Kleinbahnen für 50 Perioden-Wechselstrombetrieb. EKB 1911, H. 28.
 Die Große Berliner Straßenbahn und ihre Nebenbahnen. Berlin: Springer 1911.
 Lugano: Die elektrische Bahn in Lugano mit Drehstrombetrieb. ETZ 1896, H. 13.
 Die elektrische Bahn St. Pölten—Harland. Eu.M 1921, Nr. 22. — Mitt.d.ÖSSW 1921.
 Die städtischen Elektrizitätswerke und Straßenbahnen in Wien. Wien: Gerlach 1904.
 Städtische Straßenbahnen Wien. Wien: Gerlach 1913.
 25 Jahre elektrischer Betrieb in Wien. EKB 1922, H. 7.
 Zeulmann: Die elektrische Kleinbahn Hausdorf—Wüstewaltersdorf. AEGM 1922, Nr. 7.

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

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

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

Mit Einführung der Wendepolmotoren ließ sich die früher insbesondere von den Amerikanern festgehaltene Spannungsgrenze von 600 V ohne Einbuße an Betriebssicherheit auf 750 bis 800 V steigern. 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 V bei geerdetem Mittelpunkt nicht hinausgegangen.

3. Lokalbahnen (Überlandbahnen).

Gleichstrombahnen.

- Bearce: Amerika und Canada. Summary of high-voltage D. C. Railways. GER 1920, Nr. 4.
 Törpisch: Die elektrischen Bahnen der Vereinigten Staaten Amerikas. GA 1907, Nr. 725.
 Annapolis Short Line. EKB 1915, H. 23.
 Milch: Die Elektrisierung der Arad-Hegyalja-Bahn. EKB 1914, H. 20.
 Herzog: 1500 Volt-Gleichstrombahn im Misoxertal Bellinzona-Mesocco. Eu.M 1907, H. 49. — MFOM 1923, Nr. 19.
 Boesch: Die elektrische Bahn Bellinzona-Mesocco. EKB 1909, H. 1.
 Niethammer: Die Berninabahn. Eu.M 1910, H. 36.
 Koller: Die Berninabahn. EKB 1911, H. 4 bis 6.
 Boßhard: Die Berninabahn. SBZ 1912, Bd. 59, Nr. 6.
 Kummer: Die elektrische Bahn Biasca-Aquarossa. SBZ 1911. Bd. 58, Nr. 17. — ETZ 1912, H. 22.
 Bourlier: Bethlehem Chile iron mines electrification. GER 1919.
 Walter: Die elektrische Schmalspurbahn Biel-Täuffelen-Ins. SBZ Bd. 71, Nr. 23. 1918.
 Gyáros: Die Elektrisierung der Überetscherbahn bei Bozen in Südtirol mit 1200 V Gleichstrom. EKB 1914, H. 11.
 Electrical features of the Brescia-Salo-Toscolano 1200 V direct current railway. EW März 1911.
 Fischer: Die Elektrifizierung der Linien der Budapester Lokalbahnen. EKB 1912, H. 18. — ERJ 1912. Bd. 39, Nr. 22. — L.E. Bd. 22, Nr. 43. 1912.
 Neue Motorwagen der Burgdorf—Thunbahn. MFOM 1921, Nr. 5. — Ref. Eu.M 1922, H. 14.
 Guery: Etude sur la traction électrique par courant continu alimentation des réseaux de tramways et de métropolitains. Paris: Extrait de la RGE 1920.

- Entwicklung der elektrischen Bahnen in den Vereinigten Staaten im Jahre 1914. ER Bd. 66, S. 8. — Ref. ETZ 1912, H. 25.
- California 1200 Volt D. C. Railway. ERJ 1909. Bd. 33, Nr. 16. — 1909. Bd. 34, Nr. 14.
- Chur-Arosa-Bahn. BBCM 1916, H. 5.
- Kayser: Die Vorortbahnen in der Umgebung Cölns. SSW. — ETZ 1906, H. 13.
- Peter: Electrification of the Hershey Cuban Railway. GER 1920, Nr. 4.
- Europäische Gleichstrombahnen mit höheren Spannungen. SBZ März 1913. — ZÖIAV 1913, H. 42.
- Frankfort-Homburg electric Ry. LRTJ Juni 1910.
- Die Frauenfeld-Wil-Bahn. MFOM 1923, Nr. 19.
- Die Hohenfurter Lokalbahn. Eu.M 1914, H. 14.
- Hewett: The Indianapolis & Louisville 1200 V. D. C. Line. GEB 1908.
- Reinhart: The Innsbruck-Hall Ry. LRTJ Aug. 1910.
- New Suburban Electrification in England, Lancashire & Yorkshire Ry. ERJ 1916, Bd. 47, Nr. 10. 1200 V. D. C. Line in Holland. ERJ 1913, Bd. 41, Nr. 10.
- Viglia: Die elektrische Bahn Lucca-Pescia-Monsumano. E. August 1908.
- Die elektrische Bahn Lugano-Tesserete. SBZ 1911, Bd. 56, S. 317. — EKB 1911, H. 7.
- Pforr: Der elektrische Betrieb auf den Mailänder Vorortbahnen der Mittelmeer E.B.G. GA 1902, Nr. 594. — TH Sept. 1901.
- Elektr. Überlandbahn Maastricht-Aachen. BIEKV 1913.
- Operating with 5000 V. D. C. Ry. (Michigan.) ERJ 1915, Bd. 46, Nr. 14. — ETZ 1916, H. 2.
- New 2400 V. Lines of Michigan Ry. ET Bd. 11, Nr. 6. 1915. — ERJ 1915 u. 1914.
- The 1200 V. D. C. Interurban Lines of the Milwaukee El Ry & Lt. Co. GEB 1910, Nr. 11.
- Zehnder Spörry: Elektrische Bahn Montreux-Berner Oberland. El.Ges.Allioth.
- Eine 2000 V. Gleichstrombahn Nyon St. Cergue La Cure. BBCM 1918, Nr. 8. — SETZ 1919, H. 3.
- van Nes: Die elektrische Lokalbahn Peggau—Übelbach. Eu.M 1920, H. 20. — Mansvelt. BBCM 1920, Nr. 11.
- Die elektrische Nebenbahn Pinerolo—Perosa—Argentina. ETZ 1922, H. 12. — BBCM 1921, Nr. 10.
- High Voltage D. C. Equipment of the Pittsburgh and Buttler Street Ry. GEB Juni 1914, Juni 1909 ERJ 1914, Bd. 43, Nr. 4.
- Löwit: Die Rhein-Haardtahn, Mannheim—Ludwigshafen—Bad Dürkheim. EKB 1914, H. 21. — MFOM 1923, Nr. 19.
- Brodbeck: Die elektrische Bahn Rom—Ostia. BBCM 1922, H. 5.
- Brodbeck: Die Elektrifizierung der Sangritanabahn, Italien. BBCM 1922, H. 12.
- Markt: Die schlesischen Landesbahnen. Eu.M 1912, H. 27.
- Luder: Die elektrische Solothurn-Bern-Bahn. SBZ 1918, Bd. 72, H. 17. — Ref. Eu.M 1919, H. 8.
- Holmgren: Die Elektrisierung der Vorortebahn Stockholm-Saltsjöbaden. ETZ 1914, H. 9. — RGE 1921.
- Kriziks elektrische Lokalbahn Tabor—Bechyne. Prag: Krizik 1904.
- Die Tátrabahn. EKB 1914, H. 35.
- Haas: Gleichstrommotoren mit 1650 V Klemmenspannung der Tátrabahn. EKB 1914, H. 36. 151 Mile 1200 Volt Line in Texas. ERJ Bd. 44, Nr. 1. 1914.
- Dittes: Die elektrische Lokalbahn Trient-Malé. ZÖIAV 1909. — LRTJ Juni 1910.
- Die Elektrisierung der Bahn Turin—Ceres. BIEKV 1922, Nr. 8. — ER 1922, Nr. 2342. — Ref. Eu.M 1922, H. 46. — ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 10.
- Verona—Caldiero-S. Bonifacio: Eine 1600 V Gleichstrombahn in Italien. EKB 1914, H. 3. u. 1914, H. 9.
- Jullian: La ligne électrique de Villefranche à Bourg-Madame de la Cie du Midi. RE 1912, Nr. 207. — GC 1912, N. 1. — RGCF Bd. 35, 1. sem.
- Washington, Baltimore & Annapolis 1200 Volt D.C.Ry. GER 1910.
- The electrification of the West-Jersey & Seashore Railway. GER 1908 u. 1907.
- Wood: Electrical Operation of the West-Jersey & Seashore Ry. ERJ 1911. Bd. 38, Nr. 1.
- Zeulmann: Die elektrische Bahn Wohlen—Meisterschwanden (Schweiz). VT 1922, H. 18.
- Mit hochgespanntem Gleichstrom betriebene Bahnen. BIEKV 1913.

Wechselstrombahnen.

- Roland: Albtalbahn. VTW 1910.
- Linke: Die Wechselstrom-Pufferanlage der Albtalbahn. EKB 1915, H. 16.
- Erie R. R. LRTJ — 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. VTW 1908.
- Körner: Die elektrische Eisenbahn Bergamo—Brembothal. Ep. 1908.
- Brodbeck: Einphasen-Lokomotiven der Valle—Brembana-Bahn. BBCM 1920, Nr. 3.

- Reyval: Applications de la traction électrique par courant monophasé sur le réseau de la Co. des Chem. de Fer de la Camargue. RGE 1922. Bd. 11, Nr. 10.
- Chicago, Lake Shore & South Bend Railway. ERJ April 1909, April 1910. — Betriebserfahrungen. EKB Mai 1916. — ERJ Nov. 1915.
- The Roma Civitta—Castellana single phase railway. ERJ Juni 1908.
- The Denver & Interurban 11000 V railway. ERJ Okt. 1909.
- Kleinow: Dreiteiliger Wechselstrom-Triebwagenzug für die elektrische Zugförderung auf den schlesischen Gebirgsbahnen. EKB 1915, H. 5.
- Automotrices des chemins de fer du Sud de la France. GC Mai 1911.
- Jones: A single phase veteran (Glen Cove—Sea Cliff). ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 21.
- Wichert: Die Triebwagenausrüstungen der Chemin de fer départementaux de la Haute Vienne. EKB 1913, H. 23.
- Einphasen-Wechselstrombahnen in Illionis. ETZ 1908, H. 5. — SRJ 1907. — ERJ 1909.
- Lombard-Gerin: Les tramways à courant monophasée haute tension de Lyon à Jons et à Miribel. GC Dez. 1910. — EKB 1909, H. 30.
- The Locarno, Pontebrolla-Bignasco single-phase railway. LRTJ Juni 1908. — S. Herzog: SETZ 1907, H. 50.
- OSSW Die Einphasen-Wechselstrombahnen St. Pölten—Mariazell. DSKBZ 1912. H. 1. — EKB 1912, H. 15. — Eu.M 1908, H. 50.
- Huldschiner: Elektrische Bahn Martigny-Orsières. SBZ 1911.
- Seefehlner: Die Mittenwaldbahn. EKB 1913, H. 6. — ETZ 1912, H. 39.
- Westphal: Die Fahrleitungsanlage der Mittenwaldbahn. EKB 1922, H. 4.
- Nebenbahn Murnau—Oberammergau der Lokalb.-A.-G. München. EKB 1909, H. 28 u. Ehnhart: EB 1905, H. 20.
- Ferrovia elettr. à corrente monophasé ad alta tensione Napoli—Piedimonte d'Alifi. AEG-Thomson-Houston.
- Wist: Die Elektrisierung der schwedischen Nordmark Klarälfvens-Eisenbahn. VT 1922, H. 44. — Eu.M 1922, H. 3.
- The Padua-Fusina electric railway. LRTJ Juni 1910.
- Eigenheer: Die Wechselstrombahn Padua—Fusina. EKB 1910, H. 12.
- The first single phase railway in Spain. Pamplona—Sanguesa. ERJ Mai 1913. — ETZ 1913, H. 2.
- Blakmore: The Pittsburgh & Buttler street railway. SRJ Aug. 1907.
- Richmond & Chesapeake-Bay Railway. RGCF 1909. — EKB 1909, H. 8.
- Rotterdam—Haag—Scheveningen Railw. ERJ Okt. 1909. — EKB Sept. 1910.
- Heyden: Die elektrische Hauptbahn Rotterdam—Haag—Scheveningen. ETZ 1909, H. 18.
- The Rjukan Railway. ERJ Okt. 1913.
- Marguerre: Elektrisierung der Rjukanbahn. EKB 1912, H. 34.
- Schenectady-Ballston. GEB 1904.
- Nordmann: Spokane & Inland Empire Railway. ERJ Okt. 1909.
- Paz: Die Stubaitalbahn. ETZ 1905, H. 7. — Seefehlner: EKB 1905, H. 35.
- Freyer: Die Wechselstrombahn Thamshavn—Lokken in Norwegen. EKB 1909, H. 21.
- The Toledo & Chicago Interurban Railw. GEB Dez. 1906. — EKB 1908, H. 6.
- Fodor: Vienna-Pressburg electric railway. LRTJ März 1914.
- Seefehlner: Die elektrische Bahn Wien-Preßburg. EKB 1914, H. 32. — Eu.M 1914, H. 45.
- Drehstrom-Wechselstrom-Umformeranlage für die Wien—Preßburger Bahn. EKB 1915, H. 24.
- Valatin: Die elektrische Bahn Pozsony—Landesgrenze. EKB 1915, H. 3.
- * * * Einphasenbahn San Francisco—Napa—Calistoga. ERJ Bd. 60, H. 1. 1922.
- The Visalia fifteen cycle singlephase railway. ERJ Jan. 1910.
- The Warren Jamestown singlephase railway. SRJ Febr. 1906.
- Washington Baltimore & Annapolis Railway. ERJ März 1910. Febr. 1908.
- Kadrnozka: Der Wagenpark für die Einphasen-Wechselstrombahn Wien-Baden. ETZ 1906, H. 50. — EKB 1907, H. 1. — Eu.M 1907. H. 42.

Drehstrombahnen.

Le chemin de fer électrique à récupération de Gergal à Santa-Fé (Espagne). RGE 1917, H. 7.

Die für Lokalbahnunternehmungen zumeist kennzeichnende geringere Verkehrsdichte mit bis 10 bis 12 Zugpaaren täglich, gegenüber bis zu 30 und mehr Zugpaaren stündlich bei Straßenbahnen, bewirkt, daß die in den Ausgaben als feste Post auftretende Kapitaltilgung 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 V 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 diesen ist neben der Streckenlänge 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 Anschaffungskosten 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 V bei 45, 25 bzw. $15-16\frac{2}{3} \sim$ zur Anwendung gelangt. Die Treibmotoren direkt mit Hochspannung zu speisen erwies sich als untunlich.

4. Stadt-(Vorort-)Bahnen.

Gleichstrombetrieb: Amerika.

- Der elektrische Betrieb der Central Argentina. ETZ 1920, H. 9. — Zf.KB Sept. 1920.
 Schimpff: Erweiterungen des Bostoner Schnell- und Unterstraßenbahnnetzes. Zf.KB Juni 1914.
 Wachsmann: Die Untergrundbahn in Buenos-Aires. ETZ 1914, H. 19.
 Zeulmann: Die elektrische Ausrüstung der Untergrundbahn in Buenos-Aires. AEGM 1921, Nr. 3.
 Wenzel: Die Untergrundbahn Buenos-Aires. AEGZ 1914, H. 11.
 Sidler: Buenos Ayres und die elektrischen Untergrundbahnlinien. EKB 1911, H. 12.
 The Buenos Ayres Western Railway. ER Mai 1923.
 Electrification of Montreal Tunnel & Terminal. ERJ März 1914. — ETZ 1922, H. 37.
 Gordon: Electrification of the Montreal Tunnel Zone. Proc. 1918, H. 12.
 Hruschka: Der neue elektrische Betrieb der New Yorker Stadtbahn. ETZ 1901, H. 42.
 Freund: Die New Yorker Untergrundbahn. ETZ 1905, H. 5.
 Törpisch: Die elektr. Bahnen der Vereinigten Staaten Amerikas. GA 1907, Nr. 725.
 Die neuen Untergrundbahnen in New York. ETZ 1911, H. 39. — ETZ 1910, H. 45.
 Zehme: Die elektrischen Stadtschnellbahnen in den Vereinigten Staaten von N.-A. GA 1911, Nr. 824.
 Sneyder: Bemerkungen über Personenbeförderung innerhalb der Stadt in den Vereinigten Staaten. GA 1913, Nr. 860.
 Mattersdorff, Das Doppelnetz des New Yorker Schnellverkehrs. EB 1923, H. 14.
 Musil: Die elektrischen Stadtschnellbahnen der Vereinigten Staaten von N.-A. Organ. 1913, 1915, 1916.
 Brusch: Die Erweiterungen des Schnellbahnnetzes von Groß-New York. DBZ Jan. 1915.
 Schimpff: Die geplanten Erweiterungen des Schnellbahnnetzes in Philadelphia. Zf.KB Juli 1915.
 Die neue Hochbahn in Philadelphia. ERJ 1922, Bd. 60, S. 841. — Ref. ETZ 1923, H. 23.
 Schimpff: Schnellverkehrsfragen in Pittsburg, Pa. ETZ 1912, H. 22.

Deutschland.

- Die elektrische Hoch- und Untergrundbahn in Berlin. ETZ 1902, H. 7. — Zf.E 1902, H. 19.
 Manke: Die AEG-Schnellbahn Gesundbrunnen—Köln. VT 1921, H. 1.
 Meyer: Die elektrische Zugförderung auf der Vorortbahn Berlin—Groß-Lichterfelde Ost. ZVDI 1903.
 Reichel: Über die Einführung des elektrischen Zugbetriebes auf den Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. EKB 1907, H. 11.
 Petersen: Der Personenverkehr und die Schnellbahnprojekte in Berlin. DSKBZ Sept. 1907.
 Schimpff: Berliner Verkehrsfragen und der Wettbewerb Groß-Berlin. EKB 1910, H. 20. — Blum: GA 1910, Nr. 802. — Petersen: GA 1911, Nr. 817.
 Pforr: Betrachtungen zur Elektrisierung der Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. EKB 1912, H. 32.
 Pforr: Projekt über die Einführung des elektrischen Betriebes auf der Berliner Stadt- und Ringbahn. ETZ 1899, H. 46.
 Schimpff: Wirtschaftliche Betrachtungen über Stadt- und Vorortbahnen. Berlin: Springer 1913.
 Kemman: Derzeitiger Entwicklungsstand der Berliner Hoch- und Untergrundbahn. ZVDEV 1911, Nr. 18.
 Gerlach: Die elektrische Untergrundbahn der Stadt Schöneberg. Berlin: W. Ernst & S. 1911.
 Ministerium für öffentl. Arbeiten von Preußen. Denkschrift betreffend die Einrichtung elektrischer Zugförderung auf den Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. EKB 1912, H. 10, H. 16 und H. 49.

- Platzmann: Die städt. Untergrundbahn Berlin-Schöneberg. ETZ 1913, H. 10.
 Przygode: Schnellbahnen oder Schnellstraßenbahnen in Groß-Berlin. ETZ 1914, H. 47.
 Schimpff: Die Gestaltung der Knotenpunkte städtischer Bahnen. Zf.KB Juli 1916.
 Eiselen: Die Nordsüdschnellbahn in Berlin. DBZ Dez. 1916.
 Witthöft: Dampf- und elektrischer Betrieb im Großstadtverkehr. Woche Dez. 1917.
 Ludorf: Die Schwebebahn Barmen-Elberfeld-Vohwinkel. ETZ 1901, H. 26.
 Zehme: Elektrischer Lokomotivbetrieb auf Stadtschnellbahnen. ETZ 1913, H. 22.
 Macholl: Die Profilgestaltung der Untergrundbahnen. EKB 1914, H. 14.
 Zum künftigen Betriebe auf der Berliner Stadt- und Ringbahn. GA 1914, Nr. 888.
 Cauer: Zum Schnellbahnverkehr in Groß-Berlin. VTW 1916, Nr. 1.
 Hahn: Die Berliner Nord-Südbahn. VT 1923, H. 16.
 Speer: Die Elektrisierung der Berliner Stadtbahn. VT 1923, H. 17.
 Steiner: Deutschlands Hoch- und Untergrundbahnen. ZÖ IAV 1912, Nr. 18.
 Stein: Der Bau der Hamburger Hochbahn. GA 1912, Nr. 847. — ZÖ IAV 1912, Nr. 24.
 Mahir: Dasselbe. Zf.KB Mai 1912.
 Dietl: Die Hamburger Hochbahn. EKB 1911, H. 21.
 Mattersdorf: Die Betriebseinrichtungen der Hamburger Hochbahn. EKB 1912, H. 16. — ETZ 1912, H. 23.
 Mattersdorf: Ten years of the Hamburg elevated railway. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 23. — VT 1923, H. 5.
 Soberski: Vergleich des großstädtischen Verkehrs von New York, Paris und Berlin. VT 1923, H. 19.

Ungarn.

- Braun: Die elektrischen Stadtbahnen, Straßeneisenbahnen und die Franz Josef Elektrische Untergrundbahn zu Budapest. ETZ 1897, H. 36.
 Winkler: Ein Vierteljahrhundert elektrische Untergrundbahn in Budapest. SZ 1921, H. 12. — EKB 1922, H. 7.

England.

- L'électrification du Lancashire & Yorkshire railway. Eng. Electr. Journ. 1920, Jan. — Ref. RGE 1921, Bd. X, Nr. 5.
 Aspinall: Erfahrungen auf der Liverpool—Southportbahn. Proc. of Inst. of Mech. Eng. Lond. 1919, S. 423. — Ref. ETZ 1910, H. 20. — Eu.M 1909. — RGCF 1905, Nr. 3.
 Die neue Untergrundbahn in London. EA 1900.
 Die Metropolitan in London. ETZ 1905, H. 5.
 Die Baker Street und Waterloo Untergrundbahn. TRW Bd. 29, 1906. — ETZ 1907, H. 49.
 Zur Frage der Wirtschaftlichkeit städtischer Schnellbahnen. GA 1908, Nr. 734.
 Wittig: Die Weltstädte und der elektrische Schnellverkehr. Berlin: W. Ernst & Sohn 1909.
 Musil: Die Verkehrs- und wirtschaftliche Entwicklung der Londoner elektrischen Untergrundbahnen. ZÖ IAV 1911, Nr. 38.
 Kemman: Betriebsverstärkungen auf dem Bahnnetz des Londoner Innenringes seit Einführung der elektrischen Zugkraft. EKB 1912, H. 11.
 Größe, Bevölkerung und Verkehr von Groß-London. TRW 1913. Bd. 33. — Ref. ETZ 1912, H. 42.
 Renaud: Einiges über den Londoner Verkehr. Zf.KB Juni 1913.
 Der Verkehr Londons. EKB 1914, H. 5.
 Uytborek: Die Elektrisierung der Melbourn Vorortbahnen. BIEKV 1913. — ER 1920, Bd. 86. — Ref. Eu.M 1920, H. 16.
 Brecht: Die Elektrisierung der Stadt- und Vorortbahnen von Melbourne. EKB 1913, H. 5. — TRW Dez. 1912.
 Bearce: Melbourne suburban electrification, Australia. GER 1920, Nr. 8. — RGCF 1920, Nr. 7. — GC 1922, Juli.
 Die Elektrisierung der Strecke Shildon—Newport der North-Eastern-Bahn. ETZ 1918, H. 4.
 Die Motorwagenzüge der London & North Western Railway. MFOM 1921, Nr. 103.

Norwegen.

- Braarud: Die Untergrundbahn in Kristiania. ETZ 1914, H. 2.

Frankreich.

- Blum: Mitteilungen über die Pariser Stadtbahn. Zf.KB Juni 1910.
 Dumas: Le chemin de fer électrique souterrain Nord-Sud de Paris. GC Dec. 1910.
 Petit: Les installations électriques du chemin de fer souterrain Nord-Sud de Paris. Paris: Gauthier-Villars 1911.
 Suguët: Le métropolitain de Paris. GC Apr. 1911.
 Godferneaux: Le chemin de fer métropolitain de Paris. RGCF Nov. 1912.

- Pariser Vorortbahnen. EKB 1913, H 26 — LE Mai 1913. — En. Juni 1913. — ETZ 1913, H. 23.
 Troske: Die Pariser Stadtbahn. Berlin: Springer 1905.
 Godferneaux: Le chemin de fer métropolitain de Paris. RGCF Apr. 1909.
 Die Seine-Unterfahung durch die Linie IV der Pariser Untergrundbahn. SBZ Dez. 1909. — EKB 1910, H. 12.
 Kohlfürst: Die großen, elektrisch betriebenen Pariser Stadtbahnen. Zf.E 1901, H. 25.
 Die Pariser Stadt- und Untergrundbahn. EKB 1910, H. 11. — Zf.KB 1910, Nr. 6.
 Quinat: Les installations électriques du chemin de fer métropolitain de Paris. GC Nov. 1910.
 Mazen: Die Elektrifizierung der Pariser Vorortelinien der franz. Staatsbahnen. BIEKV Juli 1914. —
 RGCF 1902, Nr. 8.
 Dubois: La traction électrique des trains de banlieue de la Cie d'Orléans entre Paris et Juvisy.
 RGCF 1904, Nr. 12.

Spanien.

- Der Fahrpark der französischen westlichen Staatsbahn mit neuer Vielfachsteuerung. El. 1915, Bd. 71,
 S. 353. — Ref. ETZ 1915, H. 28.
 Reinhart: Die Madrider Untergrundbahn. EKB 1920, H. 30
 Gallego: The Metropolitan railway of Madrid. Beama, Mai 1920, S. 494. — ÖWÖBD 1921, H. 7.
 Domansky: Die Untergrundbahn von Madrid. ZÖIAV 1923, H. 48.

Italien.

- Huldschiner: Über die geplante Mailänder Untergrundbahn. EKB 1921, H. 14.

Wechselstrombetrieb.

- Schimpff: Über den geplanten elektrischen Betrieb der Hamburger Stadtbahn Blankenese-Ohlsdorf.
 ETZ 1905, H. 25.
 Wichert: Einrichtung und Betrieb der elektrischen Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf.
 GA 1908, Nr. 747.
 Glinski: Die Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf. ZVDI 1908, S. 1581. — Organ 1911, S. 227.
 Wechmann: Der elektrische Betrieb auf der Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf, kgl. Preuß.
 Eisenb.-Verw. ETZ 1900, H. 41.
 Dietl: London-Brighton & South Coast-Railw. Elektrisierung des Vorortverkehrs. EKB 1910, H. 6. —
 ERJ Mai 1911. — El. Aug. 1912. — LRTJ Juni 1910. — EKB 1911, H. 18.
 Dawson: Further electrification of London—Brighton. ERJ 1922. Bd. 59, Nr. 16.
 Körner: Die Einführung des elektrischen Betriebes auf der Strecke Heysam—Morecamb—Lancaster der
 Midlandbahn. ETZ 1909. — ERJ Bd. 32, Nr. 5. 1908. — EKB 1909, H. 7. — BIEKV 1907, Nr. 5.
 Le chemin de fer électrique de Lancaster—Morecamb—Heysam. Expérience de quatorze ans sur le
 système de traction électrique monophasée avec fil de contact. En. 3. Febr. 1922. — Ref. RGE
 1922. Bd. 12, Nr. 4.
 Grimshaw: Operation of the P.R.R. Philadelphia—Paoli electrification. ERJ Apr. 1916. — Ref.
 Eu.M 1916, H. 13. — ZVDEV 1916, Nr. 42.
 Gibbs: Construction and operation details of Philadelphia electrification. ERJ Jan. 1916. — BIEKV
 1914. — ERJ Nov. 1915.
 Kübler: Der Drehstrommotor als Eisenbahnmotor. Berlin: Springer 1902. — Milch: ETZ 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 die erforderlichen Stromstärken sich mit der Stromschiene 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 V 25 \sim) vor etwa 10 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 Vorortlinie Philadelphia—Paoli mit dieser Stromart eingerichtet worden.

5. Vollbahnen.

Allgemeines:

- Armstrong: The engineering problem of electrification. ERJ Dez. 1913. — ETZ 1914, H. 38.
- Armstrong: Notes on railway electrification. GER 1916, Nr. 11.
- Armstrong: Advantages of the modern electric locomotive. GER 1920, Nr. 11.
- Aspinall: Die Zukunft der elektrischen Eisenbahnen in England. Ref. ETZ 1920, H. 9.
- Babcock: Mountain railway electrification. Proc. 1913, H. 9.
- Baecker: Der derzeitige Stand des elektrischen Vollbahnbetriebes. ZÖIAV 1916, H. 32.
- Baecker: Die Kohlennot und die Elektrisierung der Bahnen. ZÖIAV Juni 1919.
- Bandow: Das Wechselstrom-Bahnssystem der Bergmannwerke. ETZ 1910, H. 41.
- Brecht: Einiges über die Elektrisierung von Hauptbahnen. EKB 1912, H. 32.
- Brugsch: Die zukünftige elektrische Schnellbahn in Konstantinopel. EKB 1921, H. 31.
- Carter: Electric switching results. ERJ 1922. Bd. 59, Nr. 12.
- Collum: Die Zukunft der elektrischen Vollbahntraktion in Großbritannien. El. 1919, Bd. 83, Nr. 2166.
- Crecelius-Phillips: Wirtschaftlichkeit des Drehstromes bei Eisenbahnen. JAIEE 1922, Nr. 5.
- Czeija: Amerikas gegenwärtige Stellungnahme in der Frage Gleich- und Wechselstrom für die Zuförderung. Eu.M 1914, H. 16.
- Davis: Some arguments for railroad electrification. GER 1922, Nr. 12.
- Dobson-Wynne: Railway electrification in Europe. ERJ 1921. Bd. 57, Nr. 24.
- Dod-Potter: Electrification of main line railways. El. Okt. 1919.
- Eichberg: Das Einphasenbahnsystem der Union. EG 1904.
- Eichberg: Über Einphasenbahnen. Zf.E 1904, H. 9.
- Eichberg: Der Stand der elektrischen Vollbahnen mit bes. Berücksichtigung der Einphasenbahnen. ZVDI 1908, S. 1145.
- Eichberg: Über die Entwicklung des Einphasen-Bahnsystems. ETZ 1908, H. 24.
- Electricfication-developments of the future. ERJ Jan. 1916.
- Frischmuth: Über die Einführung des elektr. Zugbetriebes auf Vollbahnen. EKB 1908, H. 30.
- Gibbs: Electric traction on heavy trafic lines. ERJ 1922. Bd. 59, Nr. 4.
- Gleichmann: Bayerische Staatsbahnen. Denkschrift über die Einführung des elektrischen Betriebes auf den bayer. Staatseisenbahnen. EKB 1908, H. 14. — ETZ 1910, H. 15. — Eu.M 1914, H. 17.
- Hershey: Unevaluated factors in electrification. ERJ March 1916.
- Herzog: Vollbahnbetrieb mit einphasigem Wechselstrom. EB 1904, H. 1.
- Hewett: The development of electric traction. GER 1914, Nr. 1.
- Heyden: Periodenzahl bei der elektr. Zuförderung der preuß. Staatsbahnen. EKB 1911, H. 28.
- * * * La locomotive électrique et la traction des trains à grand vitesse. RGE Mai 1917.
- Hill: Progress of high voltage d. c. railways. GER 1916, Nr. 11.
- Hobart: 2400 Volt d. c. Railway electrification. GER Mai 1913. — BIEKV Juni 1913.
- Holmgren: Über elektrischen Betrieb in Verbindung mit Dampftrieb bei Hauptbahnen. ETZ 1917, H. 4.
- Huldschiner: Einige Beiträge zur Frage des geeigneten Systems für die Elektrifizierung der Vollbahnen. Eu.M 1912, H. 51.
- Jullian: Note sur les essais de traction électrique par locomotives équipées avec moteurs à courant monophasé. RGCF 1911, Nr. 3.
- Kahler: Trunk line electrification. Proc. Mai 1913.
- Kummer: Die maßgebenden Gesichtspunkte bei der Systemwahl der elektr. Zuförderung. SBZ 1915. Bd. 66, Nr. 24.
- Kummer: Die Entwicklung der amerikanischen Hochspannungs-Gleichstrombahnen und die Systemfrage der elektrischen Zuförderung. SBZ 1915. Bd. 65, Nr. 17.
- Kummer: Die Systemfrage der elektrischen Zuförderung in Frankreich. SBZ 1920. Bd. 76, Nr. 22.
- Kummer: Vollbahn-Elektrifizierung und Wahl der Stromart in England. SBZ 1920. Bd. 76, Nr. 22.
- Kummer: Zur Wahl der Fahrdrachtspannung auf den französischen Hauptbahnen mit Gleichstrombetrieb. SBZ 1921. Bd. 78, Nr. 25. — RGCF 1921, Nr. 5.
- Kuntze: Die Elektrisierung von Vollbahnen. SZ 1922, H. 5/6.
- Loenen-Martinet: Traction électrique dans les Pay-Bas et Grande Bretagne. BIEKV 1921. Nr. 11.
- Lydall: The choice of voltage for railway electrification on the direct current system. El. Mai 1917.
- Marchena: Comparaison entre les systemes de traction en concurrence pour l'électrification des grandes lignes. GC 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. GC Aug. 1919, S. 201. — BTSR Sept. 1919. — RGE Juni 1918, S. 943 — GER 1920, Nr. 4.
- Niethammer: Die Vollbahn-Elektrifizierung und die Systemfrage. Eu.M 1910, H. 45. — Die elektrische Zuförderung auf dem VIII. Int. Eisenbahnkongreß in Bern. Eu.M 1910, H. 37.
- Oppizi: Trazione elettrica. Mailand: Hoepli 1921

- Pfarr: Wechselstrombahnen. EB 1903, H. 3.
 Pfarr: Der elektrische Vollbahnbetrieb. GA 1907, Nr. 718.
 Pichelmayr: Über die Wahl der zweckmäßigsten Periodenzahl für schwere Wechselstrom-Zugförderung. EKB 1911, H. 7.
 Reichel: Beitrag zur Frage der günstigsten Periodenzahl für Wechselstrombahnen. EKB 1909, H. 5.
 Reichel: Rundschau über die Elektrifizierung von Vollbahnen. EKB Jan. 1912 bis Juni 1913.
 Reyval: L'électrification des chemins de fer suisses. LE 1914, Nr. 2.
 Rice: Railway electrification as a means of saving fuel and relieving freight congestion. GER 1918, Nr. 3.
 Righi: La elettrificazione delle ferrovie. Bologna: Nicola Zanichelli 1915.
 Roedder: Die Fortschritte auf dem Gebiete der elektrischen Fernbahnen. Berlin: Kresidel 1909.
 Schweiz. Studienkommission: Elektrische Bahnen in Nordamerika. Zürich: Rascher 1908.
 Seefehlner: Die elektrische Zugförderung auf den Vollbahnen. ÖWÖBD 1916, H. 2.
 Sieber: Zur Elektrisierung der Vollbahnen. ETZ 1910, H. 9.
 Smith: Some railway conditions governing electrification. LRTJ März 1914.
 Sprague: Retrospect and prospect. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 22.
 Storer: Steam railroad electrification. ERJ Dec. 1915.
 Storer-Gibbs: Characteristics of the electric locomotives. JFI Okt. 1921, Nr. 4.
 Vallauri: Einiges über die Systemfrage bei der Elektrisierung der Hauptbahnen. EKB 1914, H. 24.
 Vallauri: Sulla „Questione del sistema“. Eta Aug. 1916.
 Wilcox: Analysis of the electric railway problem. New-York 73: Elmhurst.
 Wittfeld: Die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Betriebes von Vollbahnen. ZVDI 1919, H. 25.
 Zallud: Einige Gesichtspunkte zur Beurteilung der Vollbahntraktion. E.u.M 1913, H. 35.
 Zipp: Die Leistungsfähigkeit der Dampf- und elektrischen Lokomotive. Helios 1913, Nr. 28.
 Elektrische Zugförderung auf den großen Eisenbahnen. BLEKV Berichte von Gleichmann, Gibbs, Hruschka, Wyssling. Juli 1910.
 La „questione del sistema“. Eta Sept. 1918.
 Vergleich der verschiedenen elektrischen Zugarten für die französischen großen Eisenbahnnetze. SBZ Bd. 78, Nr. 17.
 Direct current for England. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 14.
 Electrification of railways. T&RW 1921, Nr. 14.
 Railway electrification progress. Railw. Mag. 1921, Nr. 254.
 Status of heavy traction abroad. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 1.
 Superpower survey shows advantages of system including electrification. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 19.
 The electrification of main line railways. ER 1922, Bd. 90, Nr. 2307.

Gleichstrombahnen:

- Bearce: Summary of High-voltage D.C. Railways. GER 1920, Nr. 4.
 Renshaw: High voltage D.C. Railway Practice. Proc. Apr. 1916.
 Davis: Review of operating data on B. & O.R.R. electrification. GER 1921, Nr. 10. — Ref. ETZ 1921, H. 49.
 The electrification of the Butte, Anaconda & Pacific Ry. GEB Juli 1914. — ERJ 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.
 Bellinger: Maintenance on the B. A. P. R. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 5.
 Hare: St. Paul to electrify Cascade Mountains. GER 1917, Nr. 5.
 Beeuwkes: Operating results from the electrification of the trunk Line of the Chicago, Milwaukee & St Paul Ry. GER 1917, Nr. 5.
 Energieverteilung und Energiebedarf der Ch.M. & St.P.Ry. SBZ 1921. Bd. 78, Nr. 19.
 Seefehlner: Die elektrische Zugförderung auf der Puget-Sound-Strecke der Ch.M.&St.P.Ry. E.u.M 1918. — EKB 1918, H. 23.
 Stinemetz: Electrification largely a financial problem. ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 20.
 Vollbahn-Elektrisierung in Frankreich. BO 1922, Nr. 11. — ETZ 1922, H. 36.
 Zehme: Die Elektrisierung der Pacificbahn Chicago—Milwaukee—St. Paul. ETZ 1922, H. 21.
 Elektr. Ausbau der Paris—Orléansbahn. GC Bd. 74, S. 4. 1919. — ETZ 1919, H. 4. — Organ 1920, H. 20.
 Muschwitz: Die Elektrisierung der Zone I der Chilenischen Staatsbahnen. ETZ 1922, H. 40. — ERJ 1923, Bd. 62, Nr. 4.
 Geenens: Electric railway construction and operation in Cuba. ERJ 1923, Bd. 62, Nr. 4.
 Wynne: Electric locomotives for Chile passenger and freight service. ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 4, Nr. 8 u. Nr. 16.
 Thirlwall: French progressing with electrification projects. ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 10.
 Charpentier-Bill: Vollbahnelektrisierung in Frankreich. ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 23.
 La traction électrique sur le chemin de fer Central argentine. RGE 19. Juli 1919. — Eng. Okt. 1918. — ERJ Okt. 1918.

- Bearce: Electrification of the Paulista Railway, Brazil, South-America. GER 1921, Nr. 7.
 Eine elektrische Eisenbahn in Japan (Chichibu). ERJ 1922, Bd. 60, S. 290. — Ref. ETZ 1922, H. 50.
 Sabouret: Traction électrique en France et en Espagne. BIEKV 1921, Nr. 11.

Wechselstrombahnen:

Amerika (Vereinigte Staaten).

- Brecht: Neuere von den elektrischen Hauptbahnen Amerikas. EKB 1914, H. 20.
 Eichel: Amerikanische elektrische Bahnen. ISKBV 1908.
 Grimshaw: Operation of the P.R.R. Philadelphia-Paoli electrification. ERJ Apr. 1916.
 Japiot-Ferrand: La traction électrique aux États-Unis. Paris: Dunod 1921.
 Laternser: Die Elektrifizierung der New York-, New Haven- u. Hartfordbahn. SBZ 1916, Bd. 67, Nr. 7.
 Meyer: Amerikanische Wechselstrombahnen. ZVDI 1908, S. 1381.
 Single Phase Traction on Railways. The Railway Eng. Aug. 1908.
 Murray: Conditions affecting the success of main line electrification. Proc. 1915.
 Murray: Electrification analyzed and its practical application to trunk line roads. Proc. 1911.
 Murray: Betriebserfahrungen einer neuen amerikanischen Wechselstrombahn. EKB 1914, H. 12. — ERJ Juni u. Febr. 1914.
 Nordmann: Die Einführung des elektr. Betriebes im Hoosac-Tunnel. EKB 1912, H. 12. — Eng. Sept. 1912. — ERJ Juli 1911.
 Reinhart: Die elektrischen Einrichtungen der New York-, New Haven- u. Hartfordbahn. EKB 1908, H. 5. — SRJ Aug. 1907.
 Schwarzkopf: Strombezug der New York-, New-Haven- u. Hartfordbahn. EKB 1916, H. 29. — ERJ Dez. 1915.
 Smith: New equipment for the Philadelphia electrification. ERJ 1920, Bd. 55, Nr. 24.
 Törpisch: Die elektrischen Bahnen der Vereinigten Staaten Amerikas. GA 1907, Nr. 725.
 Wechmann: Die elektrische Zugförderung auf den Berliner Bahnen. ZVDI 1921, Bd. 65, S. 1.
 Die elektrische Zugförderung auf der Westchester Railway. BIEKV Bd. 8.
 The New York, Westchester & Boston Ry. ERJ Mai 1912.
 New York, New Haven-Hartfordbahn. ERJ Apr. 1910, März 1910, Mai 1909.
 Wynne: Operation on the Norfolk & Western Ry. Proc. 1916. — El. Sept. 1917.
 The Norfolk & Western Electrification. ERJ Juni 1915. — ET Juli 1915.
 Zehme: Bau elektrischer Hauptbahnen in den Vereinigten Staaten. GA 1909, Nr. 767.
 Virginian railway to be electrify. ERJ 1923. Bd. 61, Nr. 18. Hayes. ERJ 1923, Bd. 62. Nr. 21.

Deutschland.

- Alexander: Elektrischer Betrieb auf Fernbahnen. AEGM 1920, Nr. 4.
 Anger: Das deutsche Eisenbahnwesen in der Baltischen Ausstellung. Malmö 1914. ZVDI Sept. 1915.
 Brecht: Elektrische Zugförderung auf den preuß. Staatsbahnen. ZVDI 1911, 1913.
 Engel: Die Elektrifizierung der Vollbahnen Preußens. Eu.M 1920, H. 12.
 Epstein: Die elektrische Zugförderung auf den schlesischen Gebirgsbahnen. ZVDEV Okt. 1913.
 Gleichmann: Elektrische Zugförderung. EKB 1910, H. 10. — BIEKV 1910. — ETZ 1911.
 Gleichmann: Die elektrische Zugförderung im bayrischen Abschnitt der Reichsbahn. ETZ Festschrift 1922.
 Heyden: Die elektr. Zugförderung auf der Strecke Dessau—Bitterfeld. EKB 1911, H. 16. — BIEKV 1911.
 Heyden: Die elektrische Zugförderungsanlage Magdeburg—Leipzig—Halle. EKB 1912, H. 32. — 1920, H. 15.
 Idelberger: Kraft- und Unterwerke für Wechselstrombahnen. EKB 1912, H. 32.
 Kleinow: Die elektrische Zugförderung Laubahn—Königszeit. EKB 1912, H. 32.
 Kleinow: Dreiteiliger Triebwagenzug für die elektr. Zugförderung auf den schlesischen Gebirgsbahnen. EKB 1915, H. 5.
 Trautvetter: Die Elektrisierung der zukünftigen Reichseisenbahnen. EKB 1920, H. 1.
 Usbeck: Die elektrische Zugförderung auf den schlesischen Gebirgsbahnen. ETZ 1921, H. 47.
 Wechmann: Mitteilungen aus dem Fernzugbetrieb der Deutschen Reichsbahn. ETZ 1922, H. 27. — Ref. Eu.M 1922, H. 25. — ZVDI 1922, Bd. 66. Nr. 46.
 Wist: Derzeitiger Stand der Elektrifizierung der Deutschen Reichs-Eisenbahnen. Eu.M 1923, H. 15.
 Zehme: Die elektrische Zugförderung der preußischen Staatsbahnen in Schlesien. ETZ 1919, 17. VII.

England.

- Electrification of British railways. ERJ Mai 1913. — RGCF 1920, H. 10.
 Poschenrieder: Die Elektrifizierung der Eisenbahnen in England. Eu.M 1920, H. 47.
 Raven: Railway electrification. ER Bd. 90, Nr. 2302.

Europa.

- Dawson: Electrical equipment of main line railways in Europe. ERJ 1907, Bd. 30, Nr. 15.
 Hellmund: Electrification of trunk line in Europe. EI Bd. 10, S. 984.
 Poschenrieder: Die Elektrisierung von Vollbahnen in Deutschland, Schweden und Norwegen. Eu.M 1918, H. 12.
 Scheichl: Über elektrische Vollbahnbetriebe. ZÖIAV 1911.

Frankreich.

- Garnier: L'électrification des chemins de fer français et l'expérience américaine. TM 1921, Nr. 7.
 Jullian: Notes sur les essais de traction électrique par locomotives équipées avec moteurs à courant monophasé. RGCF März 1911. — ERJ Mai 1913. — EKB 1912, H. 18.
 Leboucheur: L'électrification des chemins de fer du Midi. TM 1920, Bd. 12, Nr. 12.
 Pahin: Progreß on the Midi Railway Pyreneen electrification. ERJ 1919, Bd. 54, Nr. 10.
 Utybork: Bericht über die Elektrisierungen der franz. Midi-Eisenbahngesellschaft. BIEKV Juni 1914.
 La traction électrique par courant alternatif simple sur les chemins de fer du Midi. IE 1913.

Holland.

- Gesichtspunkte für die Elektrisierung der holländischen Eisenbahnen. ETZ 1922, H. 22 u. H. 41.

Italien.

- Elektrifizierung der mittellitalienischen Linien mit 45periodigem Wechselstrom und 10 kV Fahrdrachtspannung. Eu.M 1922, H. 21.

Österreich.

- Dittes: Der gegenwärtige Stand der Elektrisierung der österreichischen Staatsbahnen. ZÖIAV 1920, H. 17. — Ref. Eu.M 1921, H. 19. — EKB 1920, H. 20. — EKB 1921, H. 8. — Eu.M 1921, H. 16. — Eu.M 1922, Mai. — EKB 1922, H. 8.
 Dittes: Einige Fragen der elektrischen Vollbahntraktion. ZÖIAV 1919, H. 29.
 Dittes: Zur Frage der Energieversorgung elektrisch betriebener Vollbahnen. Eu.M 1919, H. 29.
 Hruschka: Bericht über die Vorarbeiten zur Elektrifizierung der k. k. österr. Staatsbahnen. EKB 1910, H. 25.
 Kratochwil: Elektrisierungsvorsorge in Österreich mit Rücksicht auf die Vollbahn-Elektrisierung. Selbstverl. Salzburg 1916.
 Seefehlner: Stellungnahme Amerikas zum elektrischen Vollbahnbetrieb und die Frage der elektrischen Zugförderung in Österreich. Eu.M 1920, H. 35.
 Seefehlner: Der elektrische Betrieb auf den Österr. Bundesbahnen. ETZ Festschrift 1922.
 Wechmann: Die elektr. Zugförderung auf Fernbahnen in Deutschland u. Österreich. VT 1921. Mai, Juni.

Schweden.

- Die Versuche mit elektrischem Betrieb der schwedischen Staatsbahn. EKB 1908, H. 19. — 1906, H. 9. — 1908, H. 23.
 Dahlander: Versuche mit elektrischem Betrieb auf schwedischen Staatseisenbahnen. Verl. Oldenbourg 1908.
 Dahlander: Vergangenheit und Zukunftsaussichten der schwedischen Staatsbahn-Elektrisierung. Teknisk Tidkrift. Jahrg. 48, H. 52. — Ref. ETZ 1920, H. 11.
 Hoepner: Die Lapplandbahn Kiruna-Riksgränsen. VT 1921, H. 17.
 Oefverholm: Einführung des elektrischen Betriebes auf der schwedischen Staatsbahnstrecke Kiruna—Riksgränsen. EKB 1910, H. 25. — BIEKV 1921, Nr. 10. — Ref. RGE Bd. 10, Nr. 26. 1921.
 Die elektrische Hauptbahn Kiruna—Riksgränsen. ETZ 1915, H. 51, 1914. — EKB 1914, H. 9 — GA 1915 Nr. 909.
 Neue Wechselstrombahnen der schwedischen Staatsbahnen. EKB 1915, H. 31.
 Körner: Electrification of swedish railroads. Teknisk Tidskrift Apr. 1923.
 Kuntze: Aus dem Betrieb der Riksgränsenbahn. EKB 1916, H. 9.
 Winkler: Elektrischer Betrieb auf Fernbahnen. ZVDI 1920, S. 181.
 Wykborn: Elektrifizierung der schwedischen Eisenbahnen. Aseas Egen. Tidning 1923, H. 1.

Schweiz.

- Mitteilungen und Berichte der schweizerischen Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb
 Mitteilungen 1 bis 4. Berichte 1—4. Zürich: Rascher 1908, 1910, 1915.
 Electrification of the Swiss federal railways. Eng. London Sept. 1921. — BIEKV 1921, Nr. 10.
 Betriebskosten der Gotthardbahn bei elektrischer Zugförderung. ZVDEV 1911. — BIEKV 1911.
 Huber-Stockar: Die Elektrifizierung der Schweizer Bundesbahnen. SBZ 1919, Bd. 73, Nr. 13. — Ref. Eu.M 1919, H. 32. — BIEKV 1921, Nr. 7. — Ref. RGE Bd. 11, Nr. 4. 1922. — Ref. Zehme ETZ 1920, H. 5.
 Kummer: Der Kraftbedarf der Gotthardbahn mit Rücksicht auf die Neuanlagen für deren elektrischen Betrieb. SBZ 1912. Bd. 59, Nr. 10.

- Kummer: Bericht und Kreditbegehren der Schweiz. Bundesbahnen zur Einführung der elektrischen Traktion auf der Gotthardbahn. SBZ 1913, Bd. 72, Nr. 20.
- Thormann: Die elektrische Traktion der Berner Alpenbahn-Ges. (Lötschberg) SBZ 1914, Bd. 63, Nr. 2.
- Thormann: Zur Eröffnung der Berner Alpenbahn. SBZ 1913, Bd. 62, Nr. 1.
- Brecht: Die Elektrisierung der Gotthardbahn. EKB 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. — ETZ 1922, H. 1.
- Soberski: Zur Elektrisierung der Schweiz. Bundesbahnen (Gotthardbahn). EKB 1916, H. 17.
- Wlach: Zur Elektrifizierung der schweizerischen Bundesbahnen. E u.M 1922, H. 27.
- Die Elektrisierung der Gotthardbahn. ETZ 1918, H. 27.
- Swiss Electric locomotive progress. ERJ 1921, Bd. 17, Nr. 16.
- Thormann: Der elektrische Betrieb auf der Strecke Spiez—Frutigen der Berner Alpenbahn. SBZ 1911, Nr. 7.
- Les résultats d'exploitation du chemin de fer des alpes bernoises. GC Nov. 1916.
- Huebler: Der elektrische Betrieb auf den Linien des Engadin. SBZ Mai 1916.
- Rhätische Bahn: Der elektrische Betrieb auf den Linien des Engadin. Zürich: Orell Füssli 1915.
- Soberski: Der elektrische Betrieb auf den Linien des Engadins St. Moritz—Schuls—Tarasp und Samaden — Pontresina (Rhätische Bahn). GA 1916, Nr. 939.
- Zehme: Der elektrische Betrieb der Rhätischen Bahn. ZVDEV Apr. 1916.
- Dürler: Der Abschluß der Elektrifizierungsarbeiten der Rhätischen Bahn. SBZ 1922, Bd. 59, Nr. 14. — Sachs: E u.M 1922, H. 33.
- Zur Elektrisierung der schweizerischen Eisenbahnen. ETZ 1918, H. 8. — EKB 1918, H. 25. — E u.M Okt. 1918. — EKB Juli 1917.
- Résultats acquis dans l'exploitation des chemins de fer suisses. RGE Aug. 1918.
- Bachmann: Allgemeines von der Elektrifikation der SBB. STZ 1923, Nr. 27.
- Mitteilungen über die Bahnanlage Seebach—Wettingen. ETZ 1907, H. 4.
- Kummer: Seebach—Wettingen. SBZ Juli 1909.
- Herzog: Die 15 000 Volt-Einphasenbahn Seebach—Wettingen. SETZ Apr. 1908.
- Die Einphasen-Motorwagen Typ: G 4/6 der SBB. SBZ. 1923, Bd. 82 Nr. 1.

Ungarn.

- Verebély: Über die Elektrifizierungsarbeiten der K. Ungarischen Staatsbahnen. E u.M 1923, H. 2.

Drehstrombahnen.

- Herzog: Die Vollbahn Burgdorf—Thun. Die elektrisch betriebenen Straßen-, Neben-, Berg- und Vollbahnen der Schweiz. Zürich: Raustein 1905.
- Neue Motorwagen der Burgdorf—Thun—Bahn. SBZ 1922, Bd. 80, Nr. 23.
- Donati: Traction électrique en Italie. BIEKV 1921, Nr. 9. Engl. Aufl. Nr. 12.
- Krüger: Elektrischer Betrieb auf den italienischen Staatseisenbahnen. EKB 1907, Nr. 11.
- Parodi: Note sur le développement de la traction électrique en Italie. RGCF 1913, Nr. 11.
- Parodi: Etat actuel de la traction électrique sur les grands reseaux. RGCF 1920, Nr. 1.
- Huldschiner: Die Entwicklung der elektrischen Bahnen in Italien im Jahre 1913. EKB 1914, H. 10.
- Semenza: La trazione elettrica in Italia. Eta. 15. Juni 1919.
- Lannino: Aspetti economici della trazione elettrica in Italia. Ingegneria italiana 1921, Nr. 17.
- Sorelli: Elektrischer Bahnbetrieb in Italien. Riv. techn. delle ind. elettroferoviarie. Nov. 1921. — Ref. EKB 1922, H. 4.
- Santi: Electrification progress on Italian railways. Railw. New York. 1921, Nr. 10.
- Schupfer: Die Elektrisierung der Vollbahnen in Italien. RGE 1921. — Bd. 9 Ref. EKB 1921, H. 23. — Italy chings the three phase. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 1.
- Huldschiner: Der Ausbau der Valtellinabahn von Lecco nach Mailand. ETZ 1921, H. 21. — ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 19.
- Pahin: Mont Cenis (Italy) Railway electrification. ERJ Sept. 1917, S. 344.
- Hausmann: Die elektrische Zugförderung auf der Mont Cenis-Bahn. EKB 1914, H. 30. — ETZ 1910, H. 22. — RT 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). ERJ März 1915.
- Die Elektrizität auf den italienischen Staatsbahnen. ETZ 1913, H. 10.
- Kapp: On progress in heavy electric traction. ERJ Sept. 1913.
- Santoro e Calzolari. La trazione elettrica sulla vecchia linea dei Giovi. RT 1914, Nr. 1
- The Giovi Line and Chiappella Station. Eng. Aug. 1913.
- Three phase locomotives for the Giovi-Lines Italy. ERJ Apr. 1911.
- Calzolari: Der elektrische Betrieb auf der alten Giovi-Linie. ETZ 1912, H. 48.

- Verole: Notes sur l'électrification de la ligne des Giovi. RGCF 1912, Nr. 2.
- Righi: Effetti del fumo delle locomotive a vapore sulle linee a trazione elettrica. RT 1911.
- Waterman: Dreiphasen-Zugförderung. Proc. Juni 1905. ETZ 1906, H. 18.
- Sachs: Elektrifizierung der mittellitalienischen Linien mit 45 periodigem Drehstrom und 10000 V Fahrdrachtspannung. Eu.M 1922, H. 21.
- Huber: Soll man elektrische Bahnen mit Gleichstrom oder Drehstrom betreiben? ETZ 1899, H. 9. The operation of the Simplon-Tunnel. EN 1909, Nr. 5.
- Kilchenmann: Betriebserfahrungen bei der elektr. Zugförderung am Simplon. BSEV 1912, H. 11. — EKB 1913, H. 21.
- Les nouvelles installations du Tunnel du Simplon. GC Okt. 1919.
- Schröder: Die Transformatoren-Stationen der neu elektrifizierten S.B.B.-Strecke Brigue – Sitten. BBCM 1920, Nr. 9.
- Ross: Der elektrische Betrieb von Vollbahnen mit Hochspannung und dessen Wirtschaftlichkeit. ZÖIAV 1901.
- Cserháti: Versuchsergebnisse über Stromverbrauch und Rückgewinn auf der Valtellinabahn und einige Eigenschaften der Drehstromtraktion. ZÖIAV 1905, Nr. 23.
- Cserháti: A valtellina vasut elektromos berendezése. MM & EEK 1903.
- Cserháti: Drehstrom versus Gleichstrombahnen. Wechselrede, Kübler, Niethammer, Schimpff. ETZ 1902, H. 20 u. 23. — Kandó: 1903 u. 1904, H. 8. — Lanino: 1904, H. 6, 14.
- Cserháti: Fahrbare Transformatorstation der Veltlinerbahn. ETZ 1907, H. 2.
- Cserháti: Messungen auf der Valtellinabahn. ETZ 1905, H. 7.
- Cserháti: Die Valtellina Hochspannungs-Drehstrom-Vollbahn. ETZ 9103, H. 17.
- Kandó: Über Drehstrombahnen. ETZ 1910, H. 28.
- Kandó: Vollbahnen mit elektrischem Betriebe. Zf.E. 1901, H. 53.
- Kandó-Kummer: Gotthardbahn und Giovi-Linie. Über Berechnungen und Messungen des Kraftbedarfs bei elektrischem Betriebe. SBZ 1912. Bd. 60.
- Golwig: Die elektrische Hochspannungsbahn in der k. u. k. Munitionsfabrik Wöllersdorf. Zf.E März 1902.
- New: Le chemin de fer électrique de Gergal à Santa Fé. TM Bd. 8, Nr. 5.
- Fodor: Dreiphasenstrom gegen Gleichstrom. Zf.E Nov. 1901.
- Jordan: Der Schnellbahnwagen der AEG (Zossen). Zf.E 1901. — Lasche: ETZ 1901, H. 39.
- Reichel: Elektrische Schnellbahnen. ETZ 1901, H. 34.
- Reichel: Schnellbahnlokomotive ausgerüstet mit Motoren für unmittelbare Zuführung von 10000 V Hochspannung. ETZ 1902, H. 32.
- Reichel: Über die Zuführung elektrischer Energie für größere Bahnnetze. ETZ 1904, H. 23.
- Reichel: Versuche über Anwendung des hochgespannten Drehstromes für den Betrieb elektrischer Bahnen ETZ 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. München: Oldenbourg 1903.
- Electrification des chemins de fer fédéraux ligne Brigue–Sione. B TSR 1919, H. 6.
- Elektrisierung der italienischen Eisenbahnen. Eng. 1921. Bd. 131, Nr. 3407.

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

Amerika hat zunächst an dem bei Stadt- und Überlandbahnen bewährten Drehstrom-Gleichstrom-Stromschienen-650 V-System starr festgehalten. Die New York-New Haven-Hartfordbahn blieb lange Zeit das einzige Unternehmen, das sich des Einphasensystems (11000 V 25 ~) bediente.

Mit diesem Versuch, der anfänglich nicht geringe Schwierigkeiten bereitete, war 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 V Gleichstrom ausgeführt wurde, während gleichzeitig weitere großzügige Ausführungen mit 11000 V 25 ~ Wechselstrom, jedoch mit Umformerlokomotiven, entstanden sind. (Norfolk und Westernbahn, Pa., Pennsylvaniaabahn). Außerdem ist eine Gebirgstrecke mit 3300 V 25 ~ Drehstrom ausgerüstet worden.

In Europa besteht eine Einheitlichkeit der Stromsysteme ebensowenig; nichtsdestoweniger liegt fest, daß sich Schweden, Deutschland, Österreich und die Schweiz für das

Wechselstrom 15000 V $15-16^{2/3} \sim$ System entschieden haben und nur Italien an Drehstrom 3300 V $15 \sim$ festhält, während, wie man hört, Ungarn ein Wechselstrom-Drehstrom-Lokomotiv-Umformersystem bei 15000 V Spannung und $50 \sim$ anzuwenden beabsichtigt.

In England und Frankreich hat man neuerdings für Gleichstrombetrieb mit etwa 1500 V Stellung genommen bzw. sich für dieses System entschieden.

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 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 15000 V $15 \sim$ -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 und der Motorwagenbetrieb ohne weiteres möglich ist. Daß dieses Stromsystem nicht auch für andere Zwecke in Betracht kommen kann, ist von untergeordneter Bedeutung.

6. Gleislose Bahnen.

- Lombard-Gérin und Bonfigliettis elektrische Selbstfahrer. ETZ 1900, H. 18.
 Schiemann: Gleislose Motorbahnen mit elektrischem Oberleitungsbetrieb. ETZ 1901, H. 47.
 Elektrisches Automobil mit Luftleitung. Trolley automateur. Zf.E 1901, H. 10.
 Gleislose Bahnen der Braunschweigischen Maschinenbauanstalt. ETZ 1902, H. 50.
 Schiemann: Wirtschaftlichkeit gleisloser Industriebahnen. ETZ 1903, H. 50.
 Elektrischer Omnibusbetrieb. ETZ 1903, H. 34.
 Przygode: Elektrische Omnibusbetriebe. Berlin: S. Calvary 1904.
 Schiemann: Gleislose elektrische Bahnen. ETZ 1905, H. 27. — 1903, H. 50.
 Elektrische Oberleitungsautomobillinien. Mitt. d. V. f. d. Förd. des Lokal- u. Str.B.-Wesen 1909, H. 3.
 Eine Zusammenstellung der elektrischen Oberleitungsautomobillinien. E u.M 1909.
 The filovia trackless trolley in Italy. ERJ Sept. 1909.
 Gleislose elektrische Automobilbahnen. ETZ 1909, H. 10.
 Elektrische Oberleitungsautomobillinien, System Mercedes-Electric-Stoll. DSKBZ 1909.
 Heller: Gleislose Bahnen. ZVDI 1910, Nr. 18.
 England: Die Wirtschaftlichkeit gleisloser Bahnen im Vergleich mit Straßenbahnen. E u.M 1910, H. 36.
 Ertel: Viermotorige elektrische Oberleitungsautomobilwagen System Mercedes-Stoll der Wiener städt. Straßenbahnen. EKB 1910, H. 23.
 Maurer: Elektrische Automobilstrecken mit Oberleitung. SBZ Nov. 1910.
 Stoll: Gleislose Bahnen. Zentralblatt f. Techn. Ind. 1910, Nr. 3.
 Schiemann: Die neuesten gleislosen elektrischen Personen- und Gütertransportmittel für Gleichstrom und Wechselstrom. ETZ 1913, H. 17.
 Trackless trolleys in England. ERJ 1913. Bd. 42, Nr. 14.
 Kalbfuß: Die Altonaer Hafenschleppbahn. Wasser- und Wegbau-Zeitschrift 1913, Nr. 8.
 Nier: Gleislose elektrische Bahnen. Mitt.d.V.D.Str. u. Kl.B. Okt. 1913.
 Stockport Trolley Omnibus Service. ERJ Bd. 41, Nr. 18. 1913. — LRTJ 1914.
 Andrews: Motor Busses or Trackles Trolleys. GER April 1920.

- Elektrische Automobilstrecke Fribourg—Posieux. SBZ Februar 1913.
 Schiömann: Die gleislosen elektrischen Bahnen. Dresden: Selbstverlag.
 Schneider: Gleislose Bahnen. Arch. f. Post u. Telegr. 1911, Nr. 20.
 Stobrawa: Gleislose elektrische Bahnen. ZVDI 1905.
 Przygode: Elektrische Oberleitungsomnibusse der AEG. EB 1904, H. 8.
 Die gleislose Bahn Berlin—Steglitz. ETZ 1912, H. 25.
 Kindler: Elektrischer Omnibusbetrieb mit oberirdischer Stromzuführung in Bremen. ETZ 1911, H. 8.
 Die elektrische Oberleitungsautomobillinie Heilbronn—Böckingen. Eu.M 1911.
 Die elektrische Oberleitungsautomobillinie Klosterneuburg—Weidling. Allg. Automobil-Ztg. 1908, Nr. 22.
 Filovia Pirano—Portorose, Istrien. Eu.M 1909.
 Kurz: Schienenlose Drehstrombahnen. Wien: Selbstverlag der „Auttram“ 1921.
 Findeis: Elektrische Oberleitungs-Automobillinie Pötzleinsdorf—Salmansdorf. Eu.M 1921, H. 22.
 Trolleybuses recommended for Seattle municipal lines. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 24.
 Details of Packard trolley bus. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 10.
 A new merchandising agent. — The railless vehicle. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 13.
 Trackless trolley in Germany. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 19.
 Trackless trolley for New York. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 22.
 Pioneer trackless trolley installation. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 26.
 The railless car Brill Co. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 14.
 Trolley bus operation commences on Staten Island. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 16.
 Simmon: Trackless operation versus rail transport. ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 6.
 Taffs: Gleislose Oberleitungsförderung. ER Bd. 92, H. 2358. — Ref. Eu.M 1923, H. 24.

An diese sind bei ihrem Auftauchen als Ersatz für Straßenbahnen große Hoffnungen 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, Tatabahn 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 V beschränkt. Die Reichweite dieser Bahnen ist daher sehr gering und 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.

B. Fahrzeuge mit eigener Kraftquelle.

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

- Benzolelektrische Triebwagen. AEG 1912.
 Benzolelektrische Lokomotive von 54 t Dienstgewicht. GA 1916, Nr. 886.
 Bieloy: Benzinelektrischer Zug. System Frese. EKB 1906, H. 9.
 De la Court: Verwendung von Verbrennungsmotoren für die Zugförderung. Rivista delle industrie ferroviarie 1921, Nr. 1. — Ref. EKB 1921, H. 8.
 Diesel-Elektriska Vagn-Aktiebolaget. Diesel-elekt. Motorwagen für Eisenbahnbetrieb. Druckschrift 23.
 Dodd: Self propelled railway passenger cars. GER 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. ERJ Okt. 1913.
 Gas electric cars or locomotives. GEB Okt. 1914.

- Gaselectric locomotives for Dan Patch-Line. ERJ Okt. 1915.
 Grempe: Benzol- und Schwerölmotoren im elektrischen Eisenbahnwesen. Helios Sept. 1918, S. 285.
 Heller: Benzolelektrische Eisenbahn-Motorwagen. ZVDI 1912.
 Hubendick: Erfahrungen mit diesel-elektrischen Triebwagen in Schweden. GC 1920, Bd. 77, S. 305.
 — Ref. ETZ 1921, H. 1.
 Königshagen: 90 PS-Öltriebwagen mit elektrischer Kraftübertragung. EKB 1917, H. 16.
 Ostertag: Die erste Thermo-Lokomotive. BIEKV 1913.
 Roland: Die benzolelektrischen Triebwagen der AEG. EKB 1914, H. 15.
 Pahin: Locotracteurs pétroléo-électrique d'artillerie. RGE 1922. Bd. 10, Nr. 26.
 Paulsen: Dieselelektrische Motorwagen. Ascas Egen Tidning. 1923, Nr. 1.
 Sármezey: Motoros kocsik vasuti üzemben. Budapest: Patria 1904.
 Sármezey: Dieselmotorok alkalmazása vasuti-üzemekben. MMEK 1918.
 Schimanek und Nagel: Motorwagen oder Lokomotive. GA 1907.
 Taffs: Gleislose Oberleitungsförderung. ER Bd. 92, H. 258. — Ref. E.u.M 1923, H. 24.
 Valatin: Die Kohlenersparnis im Betriebe der Eisenbahnen Ungarns. EKB 1918, H. 25.
 Wagenknecht: Triebwagen auf amerikanischen Eisenbahnen. EKB 1914, H. 2.
 Waskowsky: Die neueren Heilmann-Lokomotiven. ETZ 1898, H. 4.
 Wechmann: Neuere Benzolelektrische Triebwagen. EKB 1912, H. 30.
 Weyand: Die Triebwagen im Dienst der preuß.-hess. Staatseisenbahnen. EKB 1913, H. 13.
 Zeuner: Die dieselelektrischen Triebwagen für die sächs. Staatsbahnen. EKB 1915, H. 26.
 Ziffer: De l'emploi des voitures automobiles et automotrices sur les lignes des chemins de fer. L'Ind. d. tramw. et ch. d. f. 1913. Int. Straßen- und Kleinbahn-Kongreß 1908 und 1912.
 Locomotive électrique. GC 1893, Nr. 556 u. 564.
 Turbinenlokomotive mit elektr. Arbeitsübertragung. Ref. ETZ 1911, H. 1. — Eng. 1910, S. 54.
 Elektrische Zugförderung mit Diesellokomotiven. ETZ 1920, H. 1.
 Ein britischer benzin-elektrischer Triebwagen. BIEKV Bd. 8.
 Carlier: L'avenir de la traction par accumulateurs. En. Bd. 52. 1921. März. — Ref. RGE 1921, Nr. 16.

Die Wärmekraftmaschinen sind durch hohe Kraftausbeute des Brennstoffes gekennzeichnet. Diese Maschinen eignen sich jedoch wegen ihrer mangelhaften Geschwindigkeitsregulierung und geringen Anfahrzugkraft nicht zur direkten Zugförderung. Durch die Zwischenschaltung der elektrischen Kraftübertragung werden diese beiden Mängel mit großer Vollkommenheit behoben, so daß diese Art Fahrzeuge durch eine vorzügliche Zugkraft- und Geschwindigkeitsregelung gekennzeichnet sind. Die Leistung der am Fahrzeug befindlichen Kraftanlage kann in sehr großen Geschwindigkeitsgrenzen voll ausgenutzt 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.

8. Speicher-Fahrzeuge.

- Anger: Das deutsche Eisenbahnwesen in der Baltischen Ausstellung. Malmö 1914. ZVDI 1915, Bd. 59, Nr. 37.
 Elektromotor-Triebwagen mit eigener Kraftquelle. SBZ Sept. 1916.
 Bode: Akkumulatoren-Triebwagen. ZVDEV 1914, Nr. 43.
 Borghaus: Die Einführung des Akkumulator-Triebwagenbetriebes auf den Strecken Mülheim-Ruhr usw. GA 1913, Nr. 868.
 Carlier: L'avenir de la traction par accumulateurs. En. 1921, Bd. 52. — Ref. RGE 1921, Nr. 16.
 Weyand: Die Triebwagen im Dienste der preuß.-hessischen Staatsbahnen. GA 1914, Nr. 896. — EKB 1904, H. 14. — EKB 1913, H. 13. — BIEKV 1913.
 Akkumulatorenwagen für das Kraftwerk Untra. EKB 1915, H. 4.
 Büttner: Triebwagen für Vorortverkehr in Schweden. EKB 1915, H. 4.
 Heumann: Leistungsgrößen der Akkumulator-Triebwagen der preuß. Staatsbahnverw. EKB 1915, H. 21.
 AEG. Die Akkumulator-Doppelwagen der preuß. Staatsbahnen. 1908.
 Strauß: Die Akkumulatoren-Verschiebe-Lokomotive der Eisenbahn-Werkstätten-Inspektion in Tempelhof. ETZ 1908, H. 26.
 AEG. Akkumulatoren-Doppelwagen mit Stromrückgewinnung der preuß. Staatseisenbahnverwaltung.

- Keller: Rollmaterial der schweiz. Eisenbahnen in der schweiz. Landesausstellung in Bern 1914. SBZ Juli 1915.
- Gayer: Akkumulatorenbetrieb auf den bayr. Eisenbahnen. GA März 1901. — Giesler: ZVDEV Okt. 1907.
- Klausner: Elektr. Speichertriebwagenzüge ÖBB. E.u.M 1921, H. 26.
- Grempe: Neuere Akkumulator-Doppelwagen der preuß. Staatsbahnen. DSKBZ 1917, Nr. 25.
- Guillery: Handbuch über Triebwagen für Eisenbahnen. München: Oldenbourg 1919.
- Riep: Vollspurige Akkumulatoren-Lokomotiven im Verschiebedienst. EKB 1912, H. 36.
- Studer: Akkumulatorenlokomotive des Schlachthofes der Stadt Zürich. SBZ Juli 1910.
- BBCM. Akkumulatorenfahrzeuge zur Verwendung in Fabriken. Mai 1918.
- Rothpelz: Der Förderbetrieb bei Ausbau des zweiten Simplontunnels. SBZ März 1918.
- Winkler: Achtsichtige dreiteilige Akkumulatorentriebwagen der preuß. Staatsbahnen. VTW Okt. 1917.
- Akkumulator-Tunneluntersuchungswagen der preuß. St.E.B.V. AEG.
- Zugförderung mit Akkumulatoren in Italien. Riv. d. Ind. ferroviaria. 1921, Nr. 2. — Ref. EKB 1921, H. 8.
- Meixner: Versuchsfahrten mit Speichertriebwagenzügen auf den ÖBB. E.u.M 1922, H. 32. — Ref. ETZ 1922, H. 51.
- Kleiner Akkumulatorwagen mit Spill. ETZ 1922, H. 31. — BBCM 1921, H. 5. — Ref. ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 8.
- Akkumulatorenwagen auf schwed. und norweg. Staatsbahnen. EKB 1916, H. 16. — ZVDEV 1916, S. 360.
- Triebwagenzug mit Edison-Akkumulatoren und Vielfachsteuerung. ERJ Sept. u. Okt. 1912.
- Büttner: Die Verwendung des Akkumulators in der Verkehrstechnik. GA 1903, Nr. 624.
- Büttner: Über Akkumulator-Triebwagen für Eisenbahnen. EKB 1910, H. 11.
- Strasser: Über die Bestrebungen zur Gewichtsverminderung der Akkumulatoren. ZÖIAV 1916, H. 6.
- AFAG. Förderbetrieb mit führerlosen Akkumulatoren-Lokomotiven.
- Dreger: Eine elektrische Akkumulatoren-Lokomotive mit Edison-Akkumulatoren. ETZ 1909.
- Vallauri: Trazione elettrica con accumulatori. Eta. 1917, Nr. 30.
- Akkumulator-Lokomotiven über und unter Tage. EKB 1909, H. 14.
- Storage-battery-locomotive. EW Okt. 1917.
- Tracy: Calculating battery sizes for locomotives. EW 1921. Bd. 77, Nr. 25.
- Wittfeld: Eisenbahnbetrieb mit Speicherfahrzeugen. VT 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 unzulässig ist. Derartige Fälle liegen z. B. bei Nebenbahnlinien mit sehr schwachem Verkehr, ausgedehnten Bahnhofs- oder Fabrikanlagen, schließlich bei 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 jeweilige 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.

9. 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.

C. Spezialbahnen.

10. Zahnbahnen.

- Nipkow: Untersuchung d. Wirtschaftlichkeit des Zahnradbetriebes a. d. Albulabahn. VTW 1912, Nr. 6.
 Herzog: Die Arth-Rigibahn. SETZ 1907, H. 15. — EKB 1907, H. 11.
 Daubner: Die Barmer Bergbahn. ZVDI 1902, Nr. 1.
 Rölls Enzyklop. des Eisenbahnwesens. Bergbahnen. Wien: Urban u. Schwarzenberg.
 Berner Oberlandbahnen. EKB 1912, H. 12. — BBCM 1916.
 Müller: Die elektrische Bergbahn Brunnen—Morschach. ZVDI 1906.
 Ryncki: Le chemin de fer Blonay-Pleiades. BTSR 1912.
 Boesch-Ouzelet: Die Corcovadobahn. EKB 1910, H. 29. — SBZ 1910.
 Hotopf: Die elektrischen Bahnanlagen der Filderbahn. EKB 1906, H. 15.
 Les tramways de Grenade. Paris. TH 1908. Nr. 141.
 Haag und Greulich: Die elektrische Zahnbahn auf den Gornergrat. SBZ 1898.
 Elektrifizierung der Usui—Togebahn. AEGZ 1914, Nr. 8.
 Les nouvelles locomotives du chemin de fer de la Jungfraubahn. RBBC 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. ZVDI 1404, Nr. 46.
 Siedler: Die Jungfraubahn. Zf. E Wien 1902, H. 48.
 Strub: Die Kraftanlagen, Leitungen und Fahrzeuge der Jungfraubahn. SBZ 1897. — Ref. ETZ 1897.
 Liechty: Lokomotiven mit Hilfsmotoren. GA 1898, Nr. 746.
 Chemin de fer électrique de Loèche — Loèche-les-Bains (Suisse) RBBC 1915, Nr. 8.
 Elektrische Bergbahn-Lokomotive der Quest-Lyonnais Eisenbahn. Eng. 1901.
 Brémond: Chemin de fer électrique de Martigny au Châtelard. BTSR 1908. — Herzog: SETZ 1908, H. 41. BO 1922 Dez.
 Die Monthey-Champéry-Bahn. SBZ 1910. — LRTJ 1910. — ERJ 1909.
 Zehnder-Spoerry: Die elektrische Zahnradbahn Montreux—Glion. SBZ 1909. Zindel: EKB 1909, H. 32.
 La ferrovia elettrica del Mottarone. MT 1911.
 Kuntze: Die elektrische Zahnbahn auf den Mont Salève. ETZ 1894, H. 21.
 Strub: Die Münster-Schluchtbahn. DSKBZ 1907, Nr. 30. — SETZ 1908, H. 32.
 Seefehlner: Die Rittnerbahn (Tirol): EKB 1908, H. 29.
 Leyvraz: Le chemin de fer des Schöllenen. BTSR Nov. 1917.
 Die elektrischen Einrichtungen der Schöllenenbahn. BBCM 1918.
 Die elektrische Bahn Stansstad—Engelberg. ZVDI 1899. — SBZ Bd. 33, Nr. 15.
 Burkard: Neuer elektrischer Automobilwagen für Adhäsions- und Zahnstangenbetrieb der Stansstad—Engelberg-Bahn. SBZ 1905.
 Cattani: Bahntechnischer Rückblick aus der Schweiz. EKB 1914.
 Herzog: Die elektrischen Anlagen der Schweiz. I. Die elektrisch betriebenen Straßen-, Neben-, Berg- und Vollbahnen. Zürich: Raustein 1905.
 Strub: Bergbahnen der Schweiz bis 1900. Wiesbaden: Bergmann.
 Armbruster: Die Tiroler Bergbahnen. Wien: Fachliteratur.
 Die Zahnradbahn Trait-Planches. EB 1904, H. 18.
 Seefehlner: Die elektrische Bahn Triest—Opcina. EB 1904, H. 14.
 Morgenthaler: Die elektrischen Einrichtungen der Vesuv-Bahn. SBZ 1903.
 Strub: Die Vesuv-Bahn. SBZ 1903. Bd. 51, H. 16.
 Die Wendelsteinbahn. ETZ 1914, H. 32. — SBZ 1915, — AFAG Hagen.
 Morgenthaler: Die Elektrifikation der Wengernalpbahn. SBZ 1910.
 Müller: Die Wengernalpbahn. ZVDI 1912, S. 1401. — EKB 1912.
 Elektrische Lokomotiven der Wengernalpbahn. EKB 1910, H. 30. — SBZ 1910.
 Wichert: Zahnradlokomotiven für Anschluß- und Werkbahnen. BSEV 1922, H. 3. — ETZ 1922, H. 18. — Ref. E u M 1922, H. 36.
 Gaze: Elektrische Lokomotiven für Zahnrad- und Adhäsionsbetrieb. ZVDI 1902.
 Brückmann: Neuere Zahnradbahnen. ZVDI 1898, Bd. 42.
 Weiß: Schweiz, Berg- und Paßbahnen. VT 1921, H. 56.
 Peter: Fünfzig Jahre schweiz. Bergbahnbau. SBZ 1921, Bd. 77, Nr. 21.

Zu Zahnbahnen nimmt die Eisenbahntechnik Zuflucht, wenn die verlangten Zugkräfte durch die 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 Eisen-

bahnfahrzeuge 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 Zugseinheiten benötigen; man hat daher bei den bislang auf elektrischen Betrieb eingerichteten Zahnradbahnen mit Mittelspannungen von 550 bis 750 V das Auslangen finden können. Erst in neuerer Zeit fand der Gleichstrom mit Spannungen bis 1500 V für Bahnen mit verhältnismäßig großer Leistung Eingang.

Da Drehstrominduktionsmotoren, Gleichstromnebenschlußmotoren und auch Seriennmotoren 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 Rillenschienensystem 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.

11. Drahtseilbahnen.

- Eberhardt: Die Bergbahn auf den Merkur bei Baden-Baden. DBZ 1914, H. 1.
 Müller: Einige neuere Berg-Aufzüge. GA 1910, Nr. 784.
 Lefébre: Tramway funiculaire de Belleville. Revue pratique des travaux publics 1892 u. 1893.
 Schütt: Seilbahn für Vergnügungsreisende im Kgl. Salzbergwerk zu Berchtesgaden. ZVDI 1913.
 Schmedes: Die neue Drahtseilbahnstrecke der Sao Paulo-Eisenbahn in Brasilien. VTW
 Wohlfahrt: Die Drahtseilrampe in Ofen (Buda). MMEEK 1870.
 Funiculaire électrique du Bürgenstock. Soc. de l'Ind. El. Genève.
 Dumas: Funiculaire de la Bourboule. GC Sept. 1904.
 Fühles: Bergdrahtseilbahn auf Capri. TR 1909, Nr. 21.
 Thieme: Drahtseilbahnen mit elektrischem Antrieb. Cassarate—Mt. Bré. EKB 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. RBBC 1917.
 Bahse: Die Drahtseilbahn Erdmannsdorf—Augustusburg. DBZ 1916, Nr. 8.
 Guntzschbahn, Bozen. Konzessionsbedingungen. Österr. Verordnungsblatt für Eisenbahnen und Schifffahrt, 30. Mai 1912.
 Der Hammetschwand-Aufzug. SBZ Okt. 1905. — ETZ 1906, H. 1.
 Hamilton electric incline railway. ERJ 17. Juli 1915.
 Armknecht: Die Drahtseil-Bergbahn nach der Hohensyburg. ETZ 1909, H. 19.
 Schmidt: Die Bergbahn Heidelberg. ZVDI 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. RTW 1913, H. 21.
 — Konzessionsbedingungen. Österr. Verord. Bl. f. E. u. Sch. 23. April 1912.
 Carpi: Le chemin de fer Lausanne—Ouchy. Die Eisenbahn, Bd. 9.
 Thieme: Drahtseilbahnen mit elektrischem Antrieb Les Avants-Sonloup. EKB 1916, H. 13.
 Lookout mountain incline railway. Brill Magazine 1911.
 Reyval: Chemin de fer funiculaire de Croix paquet à Lyon Croix-Rousse. RGE 1907.
 Grivet: Chemin de fer de Lyon à Fourvière et St. Just. RGCF 1882.
 Die Seilebene bei Mahanoy, Pa. EN 1909.
 Thomann: Die Mendelbahn. EB 1904, H. 3. — Jordan: ZÖIAV Wien 1904, Nr. 31. — Ref. Zf.E 1904, H. 34. — Strub: SBZ 1903.

- Jordan: Über Drahtseilbahnen. EB 1904, H. 22.
 Jordan: Die Signal- und Telephoneinrichtungen auf der Mendelbahn. Zf.E Wien 1904, H. 44.
 Die elektrisch betriebene Seilbergbahn in Mont Dore. ETZ 1899, H. 8.
 Gradenwitz: Eine eigenartige Drahtseilbahn mit elektr. Antrieb. Ep. Wien 1908, Nr. 23.
 Zehnder-Spörry: Die Niesenbahn. EKB 1212, H. 19. — SBZ 1912.
 Tripet: Chemin de fer Neuchatel—Chaumont Tramway et Funiculaire. BTSR 1911.
 Bäseler: Die Oberweißbacher Bergbahn. VT 1921, Nr. 11. — ZVDEV 1920.
 Le funiculaire électrique de Pau. GC 1908, Nr. 1361.
 Strub: Bergbahnen der Schweiz bis 1900. I. Drahtseilbahnen. Wiesbaden: Kreidel 1900.
 Peter: Fünfzig Jahre schweiz. Bergbahnen. SBZ 1921, Bd. 77, Nr. 21.
 Walloth: Die Seilbahnen der Schweiz. Wiesbaden: Kreidel 1893.
 A cable countweight system for steepgrade on an electric railway at Seattle-Wash. EN 1911.
 Zehnder-Spörry: Elektrische Drahtseilbahn Siders—Montana—Vermala. ZÖIAV 1916, H. 9. —
 BTSR 1915, H. 10.
 Seefehlner: Die Seilbahn auf die Tarajka. Eu.M 1909, H. 31.
 Armbruster: Die Tiroler Bergbahnen. Wien: Fachliteratur.
 Birk: Die neueren Standseilbahnen in Tirol. VTW 1915, Nr. 30.
 Peter: Die Drahtseilbahn Treib—Seelisberg. SBZ Bd. 69, Nr. 11.
 Cattani: Der Bergaufzug am Trümmelbachfall. SBZ 1914.
 Strub: Die Vesuvbahn. SBZ 1903, Bd. 41, Nr. 16.
 Schwarz: Die Virglbahn bei Bozen. Organ. 1908, H. 22. — SRJ 1908, Bd. 31, Nr. 10.
 Eggenberger: Seilbahn-Kraftwerk Ritom. SBZ Bd. 81, Nr. 24.
 Eine neuartige Drahtseilbahn. „Vierwaldstättersee“ 54 Jahrg., Nr. 16.

Für diese gilt, soweit die elektrische Einrichtung in Betracht kommt, dasselbe wie für Zahnbahnen. 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 noch tiefgreifender 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.

12. Schwebeseilbahnen.

- Buhle: Seilschwebbahnen für Personenbeförderung. DBZ Nov. 1910.
 Buhle: Seilschwebbahnen für den Fernverkehr von Personen und Gütern. ZVDI 1913, S. 1783.
 Buhle: Kabelkrane und Luftseilbahnen. GA 1915, Nr. 905.
 Frank: Seilhängebahnen oder Seileisenbahnen. ZÖIAV 1912, Nr. 45.
 Gatzweiler: Drahtseilschwebbahnen zur Beförderung von Personen im Vergleich zu ebenerdigen Bahnen. VT Nr. 12.
 Mehrtens: Über die Erfindung und Entwicklung der Seilschwebbahnen. Der Eisenbau 1914, H. 12.
 Sproecke: Personen-Luftseilbahnen, ihre Entwicklung und Ziele. SETZ 1914, H. 20.
 Stephan: Die Drahtseilbahnen. Berlin: Springer 1921.
 Wettich: Zur Kritik über Konstruktion und Verhalten von Personenseilschwebbahnen. FE 1914, H. 7.
 Wettich: Schwebbahnen oder feste Seilbahnen. ZÖIAV 1912, Nr. 39.
 Wintermeyer: Seilschwebbahnen (mit Antrieb) zur Personenbeförderung. EKB 1913, H. 24.
 Woernle: Zur Beurteilung der Drahtseilschwebbahn für Personenbahnen. Zeitschr. Deutsch. Dipl.-Ing. 1913, H. 21.
 Le Vergenier: Schwebbahn von Mähl. GC 1914, Nr. 13 — Organ. 1915.

- Zehnder-Spörry: Schwebebahnen oder feste Seilbahnen. ZÖIAV 1912, Nr. 23.
 Zezula: Drahtseilschwebbahnen. RTW 1915, Nr. 3.
 Wettich, Personenschwebbahnen auf den Kohlernberg. DBZ 1913, Nr. 24.
 Konzessionsbedingungen für die Kleinbahn mit elektrischem Betriebe von Bozen nach Kohlern. DKBZ Sept. 1914.
 Soulavý: Die neue Personenschwebbahn auf den Kohlernberg bei Bozen. ZÖIAV 1913, Nr. 2.
 Schwebefähre in Bordeaux. SBZ April 1919.
 Buhle: Seilschwebbahn von Chamonix auf die Aiguille du Midi, Montblanc-Gruppe. BIEKV Bd. 8.
 Conrad: Der Bau der Seilschwebbahn von Chamonix auf die Aiguille du Midi im Gebiete des Mont Blanc. ZÖIAV 1913, Nr. 48.
 Dalimier: Seilschwebbahn der Aiguille du Midi. Organ. 1914, H. 14. — GC 1912, Bd. 52, Nr. 4.
 Fidaz-Aip Sura (Filmserstein) Seilschwebbahn. EKB 1916, H. 14.
 Luftseilbahn les Garettes. Wasserkraftanlage Tully. SBZ 1922, Bd. 80, Nr. 23.
 F. C. P. Seilschwebbahn über den Niagara. ETZ 1917, H. 8. — ZVDI 1916, Nr. 42. — Eng. Juli 1916.
 Pietrkowski: Die Seilschwebbahn für Personenbeförderung in Rio de Janeiro. ZVDI 1913, S. 927.
 Espitallier: Le transbordeur funiculaire a voyageurs du Mont Ulia près de St. Sebastian. GC 1909, Nr. 1408.
 Fühles: Die Schwebbahn Vigiljoch. ZVDI 1913, S. 729. — EKB 1910, H. 25.
 Conrad: Die Vigiljochbahn und andere Seilschwebbahnen in Österreich. ZÖIAV 1912, Nr. 44.
 Der Wetterhornaufzug. EKB 1909, H. 20. SBZ Dez. 1908.

Für die elektrischen Einrichtungen gelten dieselben Gesichtspunkte wie für Standseilbahnen.

Die hier durchgeführte Einteilung der vorkommenden Arten des elektrischen Bahnbetriebes eignet sich jedoch nicht zur technisch-wissenschaftlichen Behandlung der elektrischen Zugförderung, weil selbst die verkehrstechnisch äußerst 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 Stoffes in dem vorliegenden Werke fußt auf diesem Grundgedanken.

Zweiter Teil.

Stromerzeugung.

1. Technisch-wirtschaftliche Grundlagen.

- D'Aste: Traction électrique et traction à vapeur. LE 1914, Nr. 8.
- Bayrische Staatsbahnen. Denkschrift über die Einführung des elektrischen Betriebes auf den bayrischen Staatsbahnen. 1918. ETZ 1910. — Eu.M 1914.
- Bearce: Kohlenersparnis durch Elektrifizierung der Bahnen. GER Nov. 1917. — Ref. E.u.M 1918, H. 26.
- Der Schnellzugsverkehr mit elektrischen Lokomotiven. BBCM Juni 1917.
- Carlier: L'utilité économique de la traction électrique pour les chemins de fer Belges. LE 1914, Nr. 11.
- Dittes: Zur Frage der Energieversorgung elektrisch betriebener Vollbahnen. Eu.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. ZÖIAV 1918.
- Fränkel: Über die Wirtschaftlichkeit der elektrischen Vollbahnen. GA 1910, Nr. 784.
- Göttler: Das Kraftwerk Amsteg. STZ 1923, Nr. 27.
- Grünhut: Kohlenparmaßnahmen in der Elektrizitätswirtschaft. Eu.M 1920, H. 11.
- Hruschka: Elektr. Zuförderung auf den großen Eisenbahnen. Der Entwurf für die Elektrisierung der Hauptbahnstrecke Triest—Opicina. SETZ 1910, H. 45.
- Huber-Stockar und Laternser: Die Elektrifizierung der New York—New Haven & Hartford-Bahn. SBZ Febr. 1916.
- Kliment: Gedanken über die Zukunft des Lokomotivbaues. BIEKV 1912.
- Kliment: Die Dampfkraft und andere Energiequellen im zukünftigen Transportwesen. ZÖIAV 1912, Nr. 49. Bemerkungen hierzu. Brecht: EKB 1912.
- Klingenberg: Neuere Gesichtspunkte für den Bau von Großkraftwerken. ETZ 1920, H. 29. — Eu.M 1920, H. 30.
- Kummer: Die elektrische Dampfkesselheizung als Notbehelf für schweiz. Eisenbahnen und Dampftrieb. SBZ Juli 1917. — Thormann: Entgegnung hierauf. Ebendort. — Trautweiler: Dasselbe.
- Pfarr: Der elektrische Vollbahnbetrieb. GA 1907, Nr. 718.
- Philipp: Wirtschaftlichkeit der Krafterzeugung bei der Interborough Rapid Transit Co. in New York. EKB Mai 1919.
- Sächsische Staatsbahnen. Denkschrift über die Verwendung von Elektrizität zur Zuförderung 1913.
- Stauf: Kosten der Kilowattstunde im Dampfmaschinenbetriebe. Zd.BRV Januar 1918. — Ref. E.u.M 1918, H. 18.
- Steinmetz: Americas energy supply. Proc. 1918, Nr. 6.
- Usbeck: Die wirtschaftliche Bedeutung des elektrischen Hauptbahnbetriebes. ETZ 1913, H. 34.
- Die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Betriebes von Vollbahnen. ZVDI Bd. 63, H. 14.
- Verebely: Die Elektrifizierung des Hauptnetzes der ung. Staatsbahnen im Hinblick auf die Kohlenwirtschaft. MMEK 1920. Bd. 54, Nr. 13—16.
- Wyssling: Berichte der schweiz. Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb. H. 4. Zürich. Rascher & Co. 1915.
- Die Wasserkräfte zur Elektrisierung der Orléansbahn. GC Bd. 77, S. 170. 1920. — Ref. ETZ 1920, H. 48.

Die Stromerzeugung ist technisch die Quelle und wirtschaftlich die Grundlage der elektrischen Zuförderung. Eine Existenzberechtigung kann der elektrischen Zugkraft nur dann zuerkannt werden, wenn sie die gestellte Zuförderungsaufgabe 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 auf beträchtliche Entfernungen zu übertragen. Da

auch die Stromerzeuger 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 ersteren tritt insbesondere unter den schwierigen Gewinnungsverhältnissen der Brennstoffe in den Vordergrund. Die Ausbeutung einer sonst brach liegenden Wasserkraft stellt ein neugeschaffenes produktives Kapital dar, in dem mit Hilfe eines einmaligen Geld- und Arbeitsaufwandes eine neue dauernde Arbeitsquelle gewonnen wird. Die Wasserkraftanlagen sind weiter eine hochwertige Ausnützungsart der wasserhebenden Sonnenwärme, da die Anlagen zur Wasserkraftgewinnung selbst mit hohen Wirkungsgraden arbeiten. Tatsächlich können von dem dem Wasser innewohnenden 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 Heizmaterialies 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 $0,08 \cdot 7000 \cdot 425 = 238\,000$ mkg $\approx 0,88$ PSh.

Dem Tonnenkilometer entspricht bei 10 kg/t Zugwiderstand 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, demzufolge 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 Dampfhalten, für den Verschub und für die Zufuhr und Verteilung der Kohle nicht berücksichtigt.

Daß aber insbesondere der letztangeführte Aufwand nicht unbeträchtlich ist, geht aus der Rechnung hervor. Für jede Tonne zugeführte Kohle 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 Leergewicht der Wagen, gleich der halben Nutzlast, gefördert werden. Diese letztere Annahme muß gemacht werden, weil Massengüter wie Kohle 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

Kohle. Man muß also, um am Verbrauchsort 1000 kg Kohle zu erhalten, an der Grube 1080 kg, d. s. um 8% mehr, zum Versand bringen. Auf den Erzeugungsort umgerechnet, beträgt der Kohlenverbrauch unter den obigen Annahmen 0,0864 kg für das Brutto/tkm. 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 Kohle 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/tkm	
	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 Dampftrieb als Abfall ausgeschiedene Rauchkastenlöschverheizt 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 Kohle ins Gewicht.

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

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

Demgegenüber scheint die derzeitige 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 Dieselpinzipes 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 Kriegsbehelf vorgeschlagen, die Dampfkessel der Lokomotiven bei reichlich verfügbaren Wasserkraften 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.

Kummer: Über die Kraftverkausnützung beim zukünftigen elektrischen Betrieb der schweizerischen Eisenbahnen. SBZ Febr. 1913.

Kummer: Neuere Studien über die Schwankungen des Kraftbedarfs der elektrischen Zugförderung. SBZ Apr. 1916.

Singlephase power service. EW Nov. 1916.

Smith: Substations of the Chicago Milwaukee & St. Paul Ry. GER 1916, Nr. 11.

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

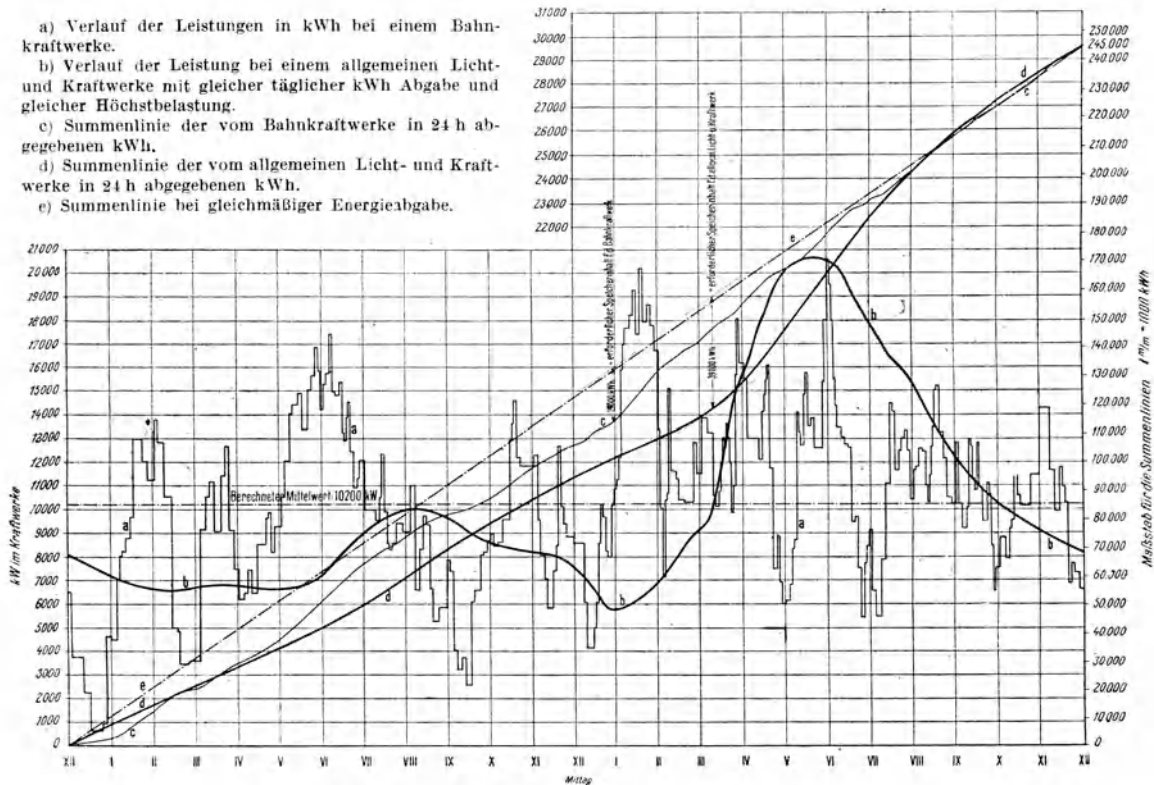


Abb. 2. Leistungsdiagramme. (Dittes.)

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.

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 bereitzu-

haltenden 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. 2) 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 Fall 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 Ausnutzungsziffern an, aus denen die Bestätigung dieser Überlegung hervorgeht.

Bahn-Kraftwerk: Anlage:	Maschinen- leistung: kW	Ausnutzungs- 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:	Ausnutzungs- ziffer:
Stadt Basel	5430	0,23
Stadt Bern	5100	0,25
Bodensee-Thurmtal	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

Nach Angaben von Huber gestaltet sich das Verhältnis der Höchstbeanspruchung der Kraftlieferung zur mittleren Leistung mit Zunahme der Verkehrsleistung wesentlich günstiger. Im Betrieb der Schweizer Bundesbahn wurden folgende Werte ermittelt:

Tägliche Verkehrsleistung tkm	200 000	500 000	1 000 000	1 500 000	2 000 000
Verhältnis der Höchstlast zur mittleren	5,2	4,0	3,2	2,8	2,1

3. Milderung der Spitzen. Die Höchstwerte der Spitzen können dadurch wesentlich gemildert werden, 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.

¹⁾ Speicherung vorhanden.

Kurzschlüsse werden in ihren Wirkungen zwar durch selbsttätige raschwirkende 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.

Münster: Zur Frage der selbsttätig umkehrbaren Batterie-Zusatzmaschinen. EKB 1915, H. 15.

Schröder: Pufferversuche mit Pirani- und Lancashire-Maschinen. E.u.M 1911. — ETZ 1912. — EKB 1912.

Schröder: Wechselstrompufferung. ETZ Febr. 1915.

Weißbach: Die umkehrbare Batterie-Zusatz-Maschine Bauart Pirani der SSW — EKB 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 unmittelbare 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 im Vergleich zum Kraftwerk groß ist — dagegen bei Vollbahnen streng gemieden. Bei Gleichstrom-Hochspannungsbahnen läßt sich die unmittelbare 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 diese 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. 3).

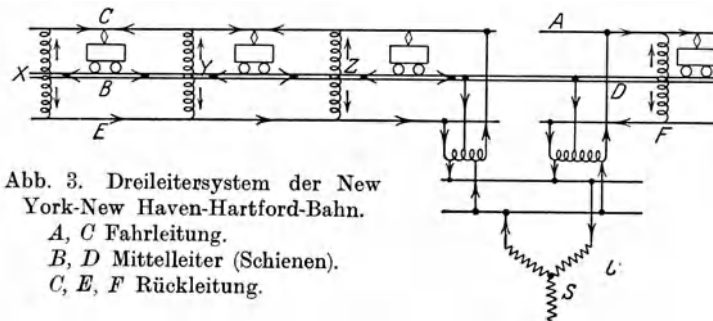


Abb. 3. Dreileitersystem der New York-New Haven-Hartford-Bahn.
A, C Fahrleitung.
B, D Mittelleiter (Schienen).
E, F Rückleitung.

Eine ähnliche Wirkung wie die unmittelbare Speisung haben auch Anordnungen, welche die Festhaltung oder gar Erhöhung bei ansteigender Strombelastung bezwecken. Erwähnung verdient die für andere Zwecke ganz vorzügliche Piranischaltung, die auch für Bahnkraftwerke verwendet wird. (Abb. 4.) Das Wesentliche dieser Schaltung besteht darin, daß eine Seriedynamo ihre Erregung vom Linienstrom erhält und die so erzeugte Spannung einer Pufferbatterie aufgedrückt wird. Stromstöße 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 V-Betrieb zeigte sich als Folge, daß die für die Nebenstromkreise (Licht, Heizung, Bremse) der Fahrzeuge vorgesehenen Patronensiche-

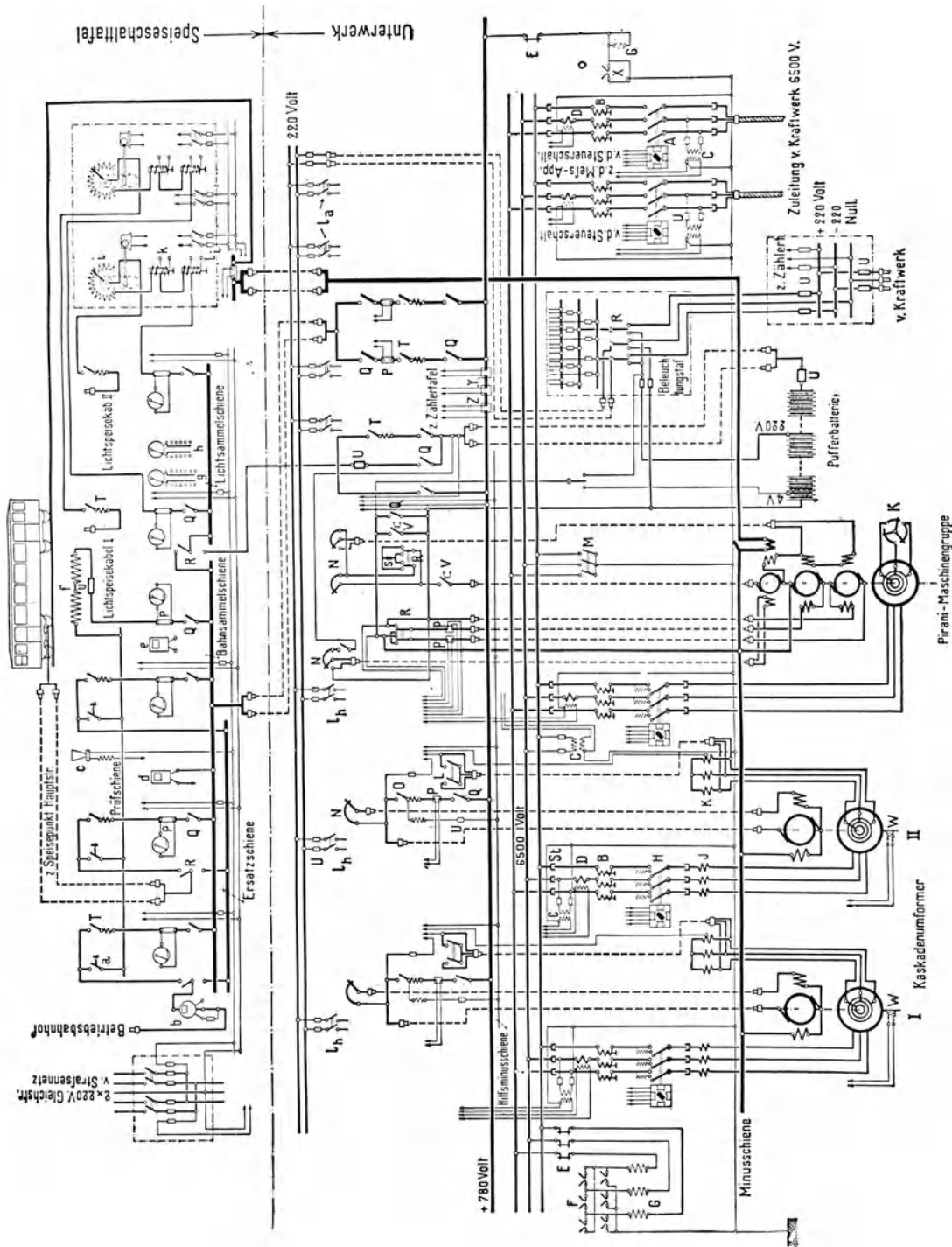


Abb. 4. Schaltplan des Umformerwerkes der Schöneberger Untergrundbahn.
 Gleichstrom 780 V. Drehstrom 6500 V.

rungen, die für 1000 V 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. 11).

Die praktische Notwendigkeit, Bahnanlagen mit verhältnismäßig kleinen mittleren Belastungen mit großen Spannungsabfällen einzurichten, ändert nichts an der fest-

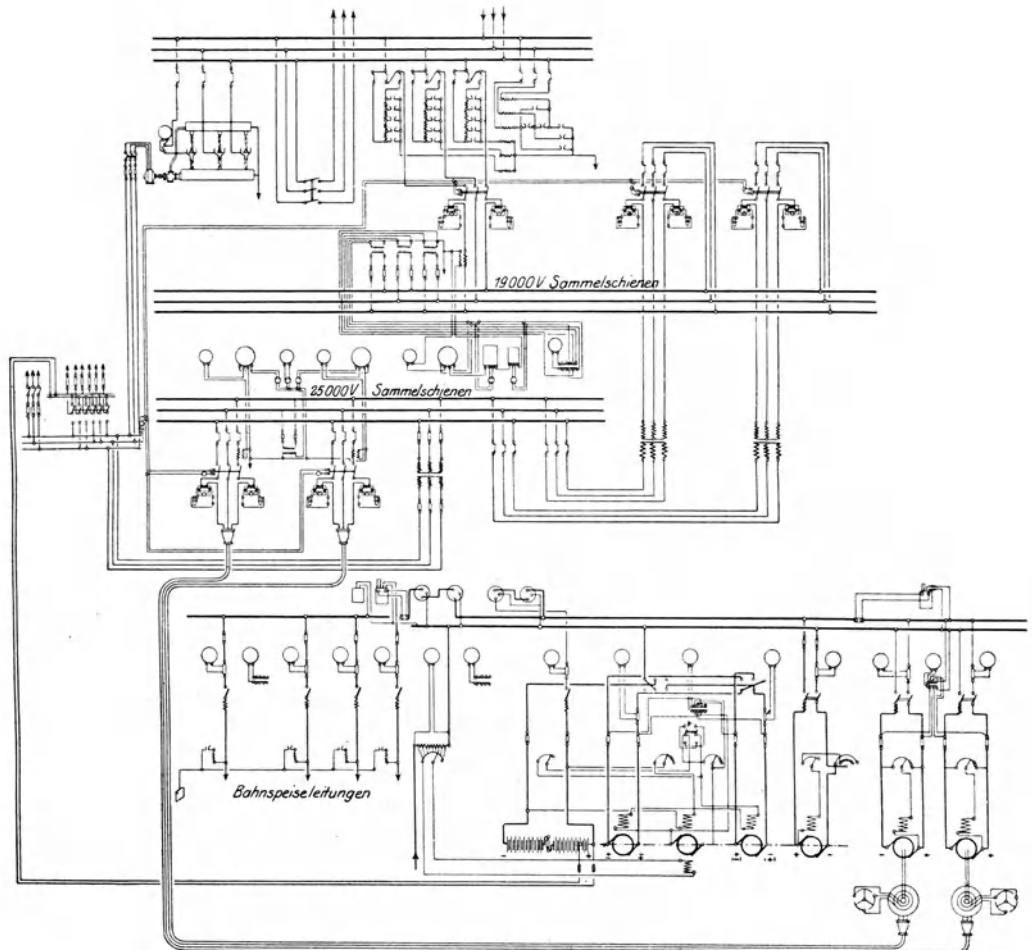


Abb. 5. Schaltplan eines Drehstrom-Gleichstrom-Unterwerkes mit Pirani-Pufferung.
Drehstrom 20000 V/Gleichstrom 800.

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

Genauere, 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.

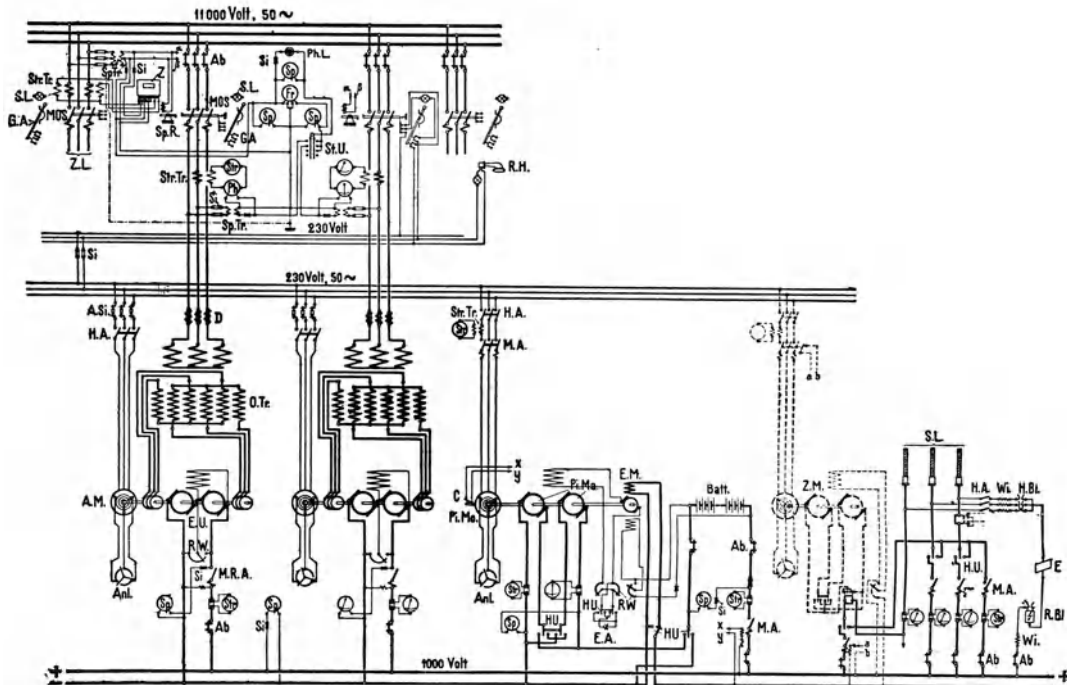


Abb. 6. Schaltplan des Unterwerkes Ramersdorf der Bahn Bonn—Königswinter (SSW).

Zeichenerklärung :

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

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 insbesondere in Amerika auf eine hohe Stufe der Entwicklung gebracht worden. Sie sind durch hohen Wirkungsgrad gekennzeichnet. Ihre Verwendung beschränkt sich jedoch auf Mittelspannungsanlagen (750—800 V max.).

In vereinzelten Fällen sind Einanker-Umformer auch für Spannungen bis 1100 V gebaut worden, doch haben diese Maschinen zwei voneinander getrennte Ankerwicklungen und zwei Kollektoren, die hintereinander geschaltet sind (Abb. 6).

Am europäischen Kontinent zieht man vielfach Motorgeneratoren vor, weil diese 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, Störungen daher 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 jedoch Motorgeneratoren vorzuziehen sind.

6. Stromumformung mit Quecksilberdampfgleichrichter.

- Bally: Gleichrichter-Bauart. BBCM 1922, Nr. 4.
 BBCM. Die ersten Straßenbahnanlagen mit Gleichrichterbetrieb. 1916, Nr. 10.
 BBCM. Untersuchungen an einem Quecksilberdampfgleichrichter. 1918, Nr. 8 u. 1919, Nr. 10.
 BBCM. Tramways-Lausannois 1918.
 Clarafeld: Neuere Fortschritte und Erfahrungen im Bau von Quecksilberdampf-Großgleichrichtern. TM 1918/19, H. 7.
 Hiertzler: Quecksilber-Großgleichrichter für die Straßenbahn Bern—Muri—Worb. BBCM 1921, Nr. 12.
 Marchand: Le convertisseur à vapeur de grande puissance. Rev. Techn. Suisse. Nov. 1916.
 Milliken: Rectifier substations developed abroad. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 18.
 Niethammer: Der Quecksilberdampf-Gleichrichter und seine Verwendung als Perioden-Wandler. EKB 1911, H. 10.
 Obach: Die Großgleichrichteranlage im städt. Elektrizitätswerk zu Hirschberg in Schlesien. ETZ 1918, H. 42.
 Schäfer: Neue Umformeranlagen mit Großgleichrichtern. ETZ 1917, H. 7.
 Schäfer: Quecksilberdampfgleichrichter. BBCM 1919, H. 3.
 Schenkel: Eine Groß-Gleichrichteranlage für Bahnbetrieb. SZ 1922, 5/6.
 Schmieder: Die Quecksilber-Großgleichrichter-Anlage der Personen- und Güterstraßenbahn der Stadt Meißen. Elektro-Journal, Aug. 1922.
 Tschudy: Umriß des Prinzips der Vakuum- oder Dichteregulierung für elektrische Dampfgleichrichter. BSEV 1922, Nr. 3.
 Gleichrichteranlage Monbijou des Elektrizitätswerkes der Stadt Bern. BBCM 1919, Nr. 10.
 Marche en parallèle et réglage de la tension des redresseurs de courant à vapeur de mercure. RGE Febr. 1919.
 Die Umformung von ein- und mehrphasigen Wechselströmen in Gleichstrom mittels Hg-Dampfgleichrichters. Trua 1921, Nr. 8.

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 bis etwa 300 kW für Gleichspannungen bis 800 V 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 weiter Gewicht und Raumbedarf wesentlich geringer sind, wie z. B. für Motorgeneratoren gleicher Leistung, weiter 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. 7.

Der umgeformte Strom ist ein pulsierender Gleichstrom, was bei der Stromwendung der Motoren in Erscheinung tritt und auch zu Telefonstörungen Anlaß geben kann.

Aus diesen Gründen ist primär ein sechsphasiger Anschluß vorzusehen und sind sekundär Dämpfungsdrosselspulen anzuordnen.

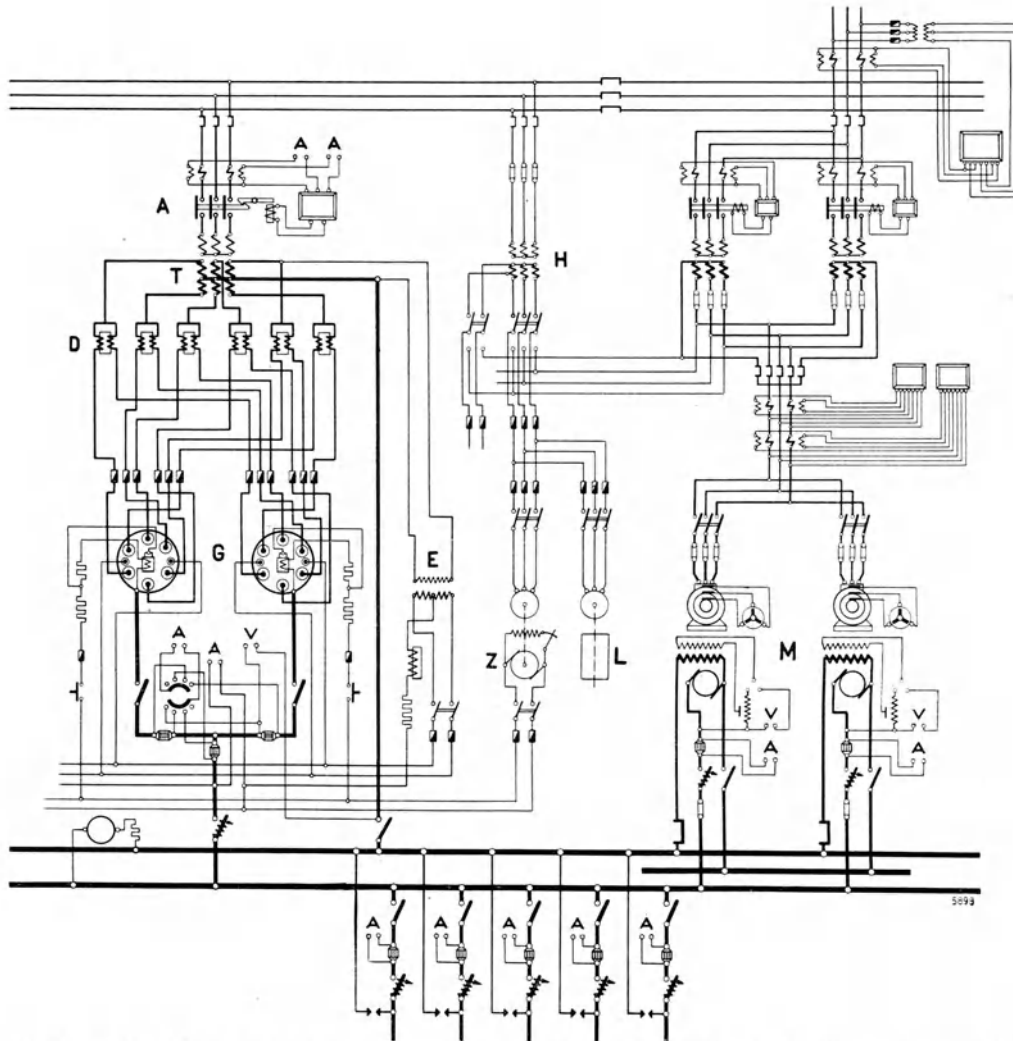


Abb. 7. Schaltplan des Unterwerkes der Limmattal-Straßenbahn. Quecksilber-Dampfgleichrichter. Drehstrom 6000—530/600 V. Gleichstrom (BBC).

Zeichenerklärung.

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

7. Selbsttätige Umformerwerke.

- Allen u. Taylor: Automatically controlled substations. ERJ 1915, Bd. 4, Nr. 12. — Proc. 1915, Nr. 9.
 Davis: Give the operator a job. GER 1916, H. 11.
 Davis: Automatic railway substation. GER 1915, H. 12 und 1921, H. 7.
 Evans: Automatic substation, Sacramento Northern Railroad. GER 1920, Nr. 11.
 Jones: Results of automatic substation operation on the Chicago, North Shore and Milwaukee Railroad. GER 1921, Nr. 7. — ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 4.
 Johnson: A brief review of automatic substation experience on the Aurora, Elgin and Chicago R.R. GER 1921, Nr. 7. — ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 13.
 Nash: A year of the automatic substation at Butte. ERJ 1919. — Ref. Eu.M 1920, H. 1.
 Schmidlin: Automatische Umformerstationen. BCM 1920, H. 8. — SBZ 1921, Bd. 7, Nr. 7.
 Summerhayes: Automatic substations. GER 1913, H. 9.

Wensley: Adapting automatic control to motor started converter. ERJ 1919, Bd. 53, Nr. 20.

Selbsttätige Unterwerke amerikanischer Straßen- und Überlandbahnen. ET Sept. 1920. — Ref. EKB 1921, H. 1. — ETZ 1921, H. 14. — 1922, H. 18.

Automatische Unterstation in Cleveland der Westinghouse-Gesellschaft. ET Sept. 1920. Ref. Eu.M 1920, H. 1. Selbsttätige Unterwerke. ETZ 1922, H. 18.

Singlephase gives the way to the automatic substations. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 14.

Automatic substations in Switzerland. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 15.

Betriebserfahrungen mit selbsttätigen Umformerwerken. ETZ 1923, H. 29.

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 etwaiges Hinzutun 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 Relaisystem betätigt wird, welches einen Wechselstrom-Hilfsmotor einschaltet. Dieser Hilfsmotor dient zum Antrieb einer Schaltwalze, die alle zum Anlassen und Abstellen des Umformers nötigen Schaltverbindungen herstellt; er treibt zugleich auch einen Gleichstromgenerator an, welcher zur Sicherung der Polarität des Konverters während des Anlassens den Erregerstrom liefert. (Abb. 8 u. 9.)

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 eigenen Kollektor gelegt worauf der Konverter die normale Betriebsspannung an seinen Klemmen erzeugt, nachdem er gleichzeitig auch drehstromseitig auf die volle Spannung geschaltet worden ist. Der nächste Schritt ist die Einschaltung der Linie unter Zwischenschaltung eines zwei stufigen 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 dieses in Gänze eingeschaltet. Setzt der Strombezug aus, tritt das Kontaktvoltmeter in umgekehrtem Sinn in Wirkung, löst alle Schaltungen und setzt den Umformer still. Damit dies nicht bei vorübergehenden Strompausen, Wagenauslauf u. dgl., eintritt, sind die

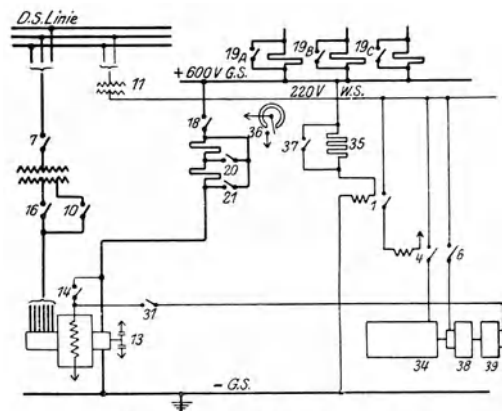


Abb. 8. Vereinfachter Schaltplan eines selbsttätigen Unterwerkes.

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 Linienschalter. 19 A, 19 B, 19 C Widerstände und Schalter zur Strombegrenzung. 4 Steuerstromschalter. 6 Schalter für den Steuermotor. 38, 39 Erregermaschine. 34 Schaltwalze. 36 Polarisiertes Relais.

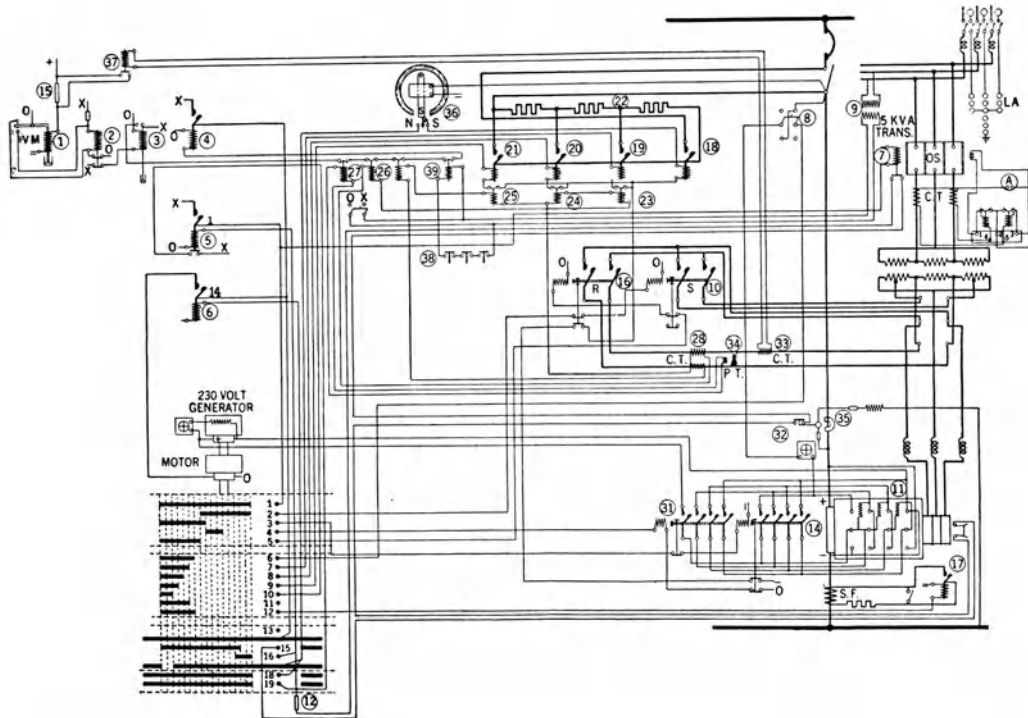


Abb. 9. Schaltbild eines selbsttätigen Drehstrom-Gleichstrom-Unterwerkes (GEC).

1 Kontakt-Voltmeter. 2 Schaltrelais. 3 Zeitrelais ($2\frac{1}{2}$ Min.). 4 Magnetischer Schalter. 5 Steuerstromschalter. 6 Schalter für den Steuermotor. 7 Ölschalter mit magnetischer Auslösung. 8 Umschalter. 9 5 KH-Transformator. 10 Anlaßschalter für den Umformer. 11 Converter. 12 3000 Ω -Widerstand. 14 Erregerschalter. 16 Hauptschalter. 17 Feldnebenschieber. 18 Linien-schalter mit magnetischer Auslösung. 19, 20, 21 Höchstsstromschalter. 22 Vorschaltwiderstände. 23, 24, 25 Strombegrenzer 26 Zeitrelais für Überlastung. 28, 29 Stromtransformatoren. 31 Feldschalter. 32 Feldwiderstand. 34 Spannungswandler 35 Rückstromrelais. 36 Polarisiertes Relais. 38 Thermostat. 39 Thermostatrelais.

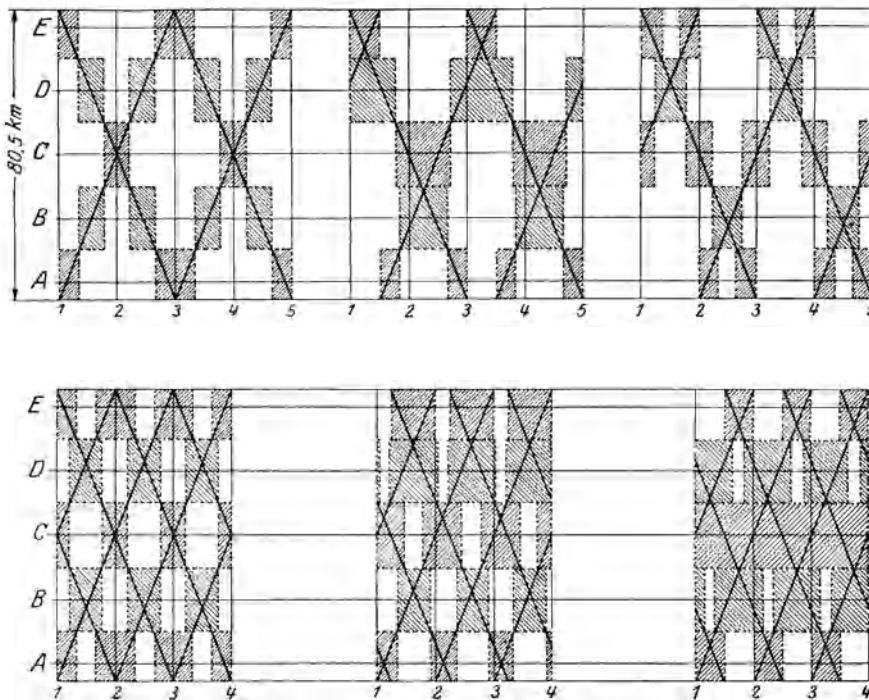


Abb. 10. Bildfahrpläne zur Darstellung der Arbeitszeiten selbsttätiger Unterwerke. Oben: Zugfolge 2^h. Unten: Zugfolge 1^h. A, B, C, D, E Lage der Unterwerke.

Abschaltrelais so eingestellt, daß sie erst in Wirkung treten, wenn die Strompause 5 Minuten andauert.

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. 9.)

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. 10.)

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
Hiervon 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(Gold)	K.	16420.—	10400.—
	(Gold) M.	13700.—	8700.—

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

Die beschriebene Anordnung wird für europäische Verhältnisse kleineren Umfanges 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 unwesentlich, 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 mitbenützt 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 Anlagen handelt, für die nur hochgespannter einphasiger Wechselstrom mit 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 im Bau und Betrieb sehr teuer. Diesen Übelstand versucht eine Einanker-Maschine der Bergmannwerke und der AEG zu umgehen, deren Wirkungsweise 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 niederpolige — 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 Wicklungen 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 AEG läuft der Rotor als Asynchronanker mit doppelt-synchroner Geschwindigkeit gegen das eine Drehfeld um, während er im anderen als gleichstrom-erregtes 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 Zieles ist es nicht nötig, die Elastizität des Stromerzeugungssystems preiszugeben und den absoluten Wert der Spitzen, wie dies bei der Piranischaftung 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 Gegenkomoundwicklung des Generators (Abb. 11) erzielt werden, die vom Linienstrom durchflossen wird oder indem man die Pirani-Maschine der Dynamo gegensaltet.

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

Bei Wechselstromanlagen dienen dem gleichen Zweck Drosselspulen, 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 Induktionsmotor durch einen Gleichstrommotor ersetzte. Trotz des nachträglichen Umbaus machten sich die aufgewendeten Kosten gut bezahlt.

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

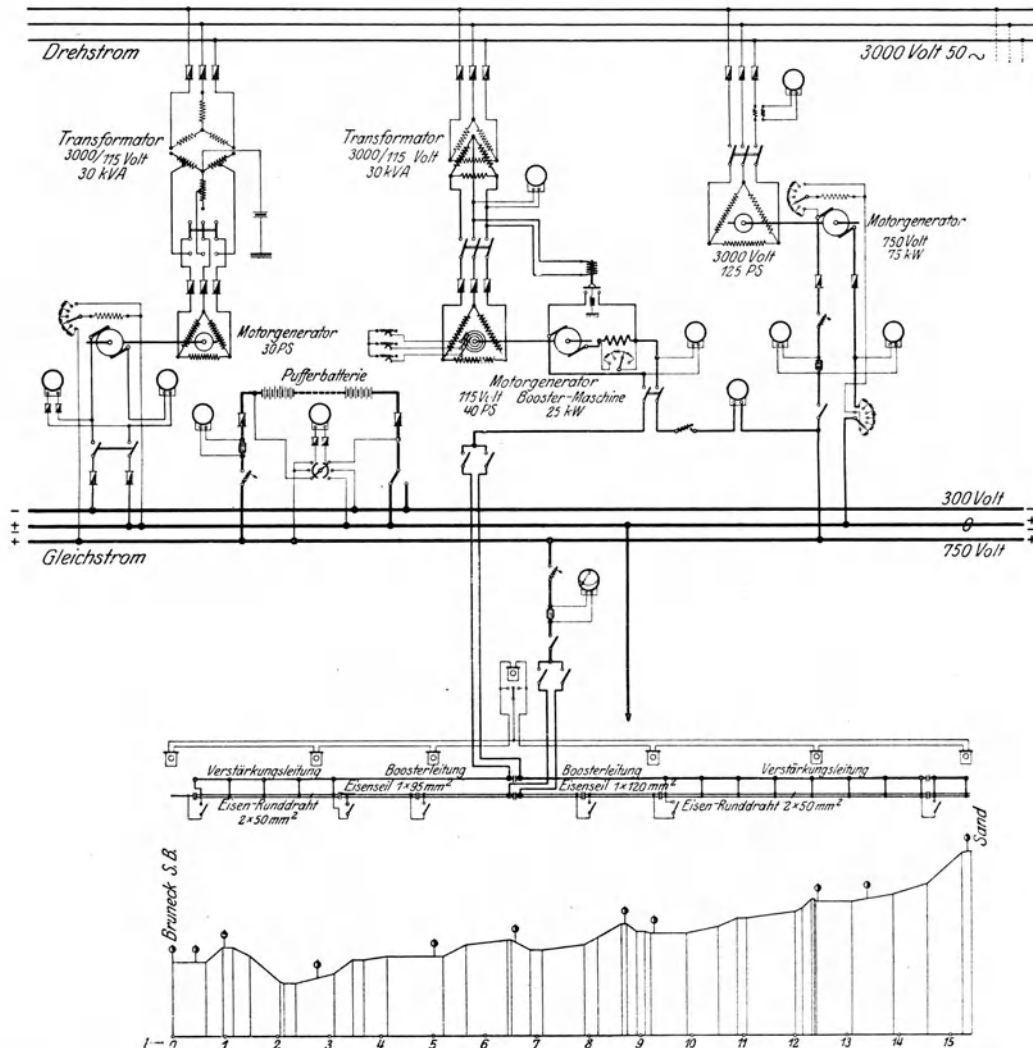


Abb. 11. Schalt- und Stromverteilungsplan eines Drehstrom-Gleichstrom 750 V-Unterwerkes mit Kurzschlußmotor (AEGU).

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. Resonanzerscheinungen bei plötzlichen Entlastungen, namentlich nach Kurzschlüssen, gehören zu den gefürchtetsten Vorkommnissen, weil sie infolge unzulässiger Drucksteigerungen nicht selten zu Rohrbrüchen 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. 12, 13.)

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 umgesäumt und geradezu instinktiv getroffen werden müssen. Das ist nur bei einer einfachen Anlage erreichbar.

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; ebenso ist für jeden Stromzweig ein selbsttätiger Höchststromausschalter ausreichend. 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. 13.)

Es ist 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, daß in einer Gruppe der Transformator und in einer anderen Gruppe der Generator defekt wird, 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 die Schaltanlage wird auf diese Art viel einfacher und billiger, als wenn man dasselbe 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 es auch bei Motorgeneratoren, insbesondere bei kleinen Einheiten, 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; bei erreichter Synchrondrehzahl wird 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. 11). Diese Umformerart eignet sich auch besonders 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 besonders heftige 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.

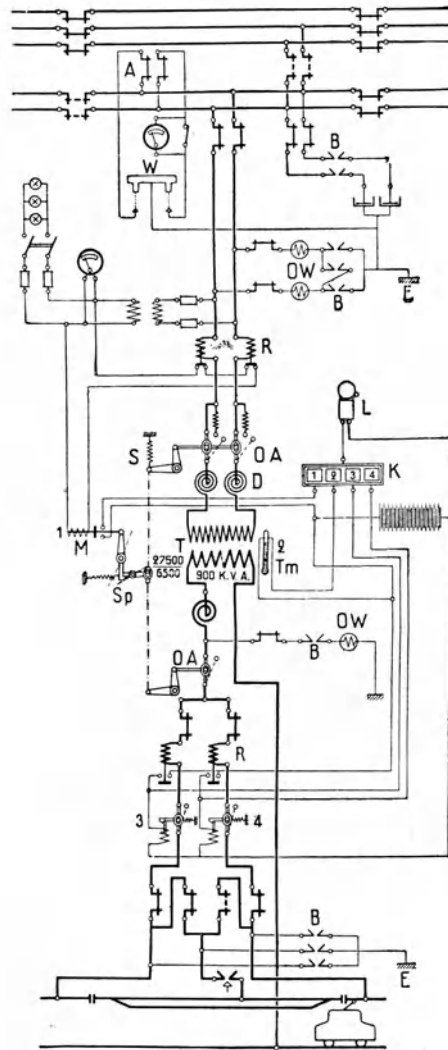


Abb. 12. Schaltbild eines Umformerwerkes der Mariazellerbahn. 11 000/6000 V. 25 ~ (OSSW).

T	Transformator	B	Blitzableiter
D	Drosselspule	OW	Ölweiderstand
OA	Öltauchschalter	W	Wasserstrahler
R	Zeitrelais	Tm	Thermometer
S	Spanner	K	Klappenschrank
Sp	Sperrung	L	Lautwerk
M	Elektromagnet	E	Erde
A	Abschalter		

Bahnbetriebe verzichten nur in besonderen Ausnahmefällen auf die Erde bzw. die Schienenrückleitung. Da solcherart der eine Pol der Stromerzeugungsanlage stets das Nullpotential aufweist, ist es zwecklos und im allgemeinen unzulässig, in diesem Pol irgendwelche Schalter oder Schutzvorrichtungen anzuordnen.

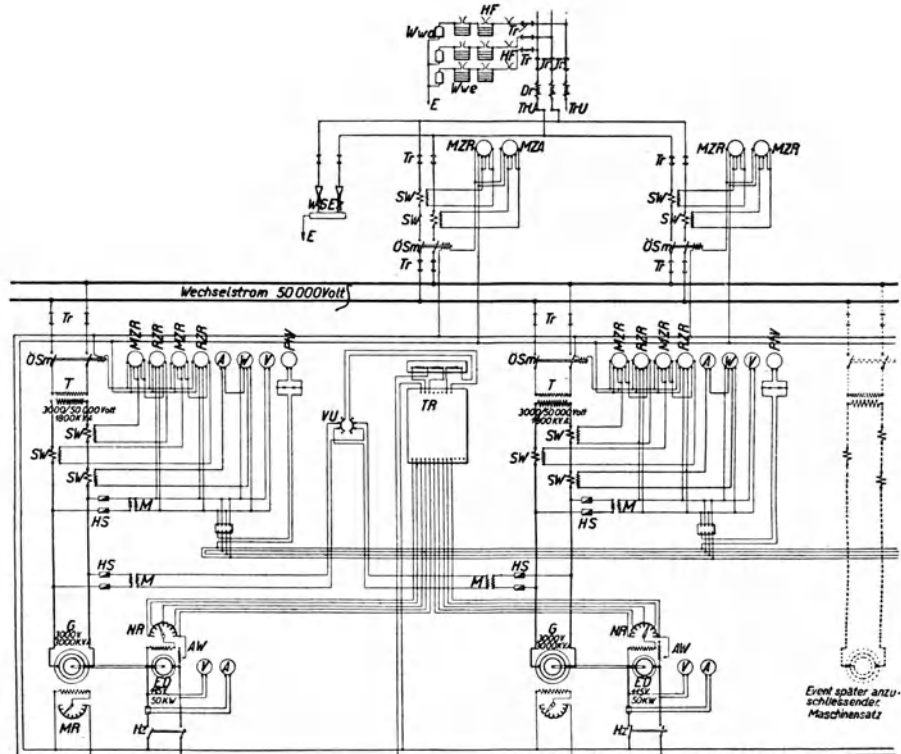


Abb. 13. Schaltplan eines Bahnkraftwerkes für einphasigen Wechselstrom. Maschinenspannung 3000 V. Spannung der Fernleitung 50 000 V (Tirrill-Regler, AEGU).

<i>G</i> Generator	<i>NR</i> Nebenschluß-Regler	<i>W</i> Leistungszeiger
<i>ED</i> Erreger-Dynamo	<i>MR</i> Magnet-Regler	<i>PhV</i> Phasen-Spannungszeiger
<i>T</i> Transformator	<i>AW</i> Ausgleichs-Widerstand	<i>HS</i> Hochspannungs-Sicherung
<i>OSm</i> Ölschalter mit magn. Auslösung	<i>SW</i> Stromwandler	<i>Dr</i> Drosselspule
<i>Tr</i> Einpoliger Trennschalter	<i>M</i> Meßtransformator	<i>HF</i> Hörnerfunkenableiter
<i>TrU</i> Einpoliger Trenn-Umschalter	<i>MZR</i> Maximal-Zeitrelais	<i>Wwe</i> Einpoliger Wasserwiderstand
<i>VU</i> Spannungszeiger-Umschalter	<i>RZR</i> Rückstrom-Zeitrelais	<i>Wud</i> Dreipoliger Wasserwiderstand
<i>H_z</i> Zweipoliger Hebelschalter	<i>A</i> Stromzeiger	<i>WSEz</i> Zweipoliger Wasserstrahler
<i>Tr</i> Tirrill-Regler	<i>V</i> Spannungszeiger	<i>E</i> Erde

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 ~ 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 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 Zwischenschaltung einer elastischen und magnetisch trägen 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 ~ W.St. — nehmen muß. Im zweiten Fall, wenn man also umformt, ist es selbstverständlich, daß man diejenige Stromart wählt, die für den Bahnbetrieb die geeignetste ist.

Wie wenig haltbar die Bestrebungen sind, ein Einheitssystem für Bahnen, 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 V-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 Bahnanlagen genügt die Leitfähigkeit der aus Gründen der mechanischen Festigkeit mit bestimmten Querschnitten ausgelegten Fahrleitung allein nicht mehr für die Stromzufuhr 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, betriebstechnisch insbesondere dann unbequem, wenn die Speiseleitungen auch für andere Zwecke dienen. Jede Instandhaltungsarbeit bedingt unter einem die Abschaltung der Speiseleitung. Bei höheren Spannungen, etwa über 20000 V, 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 Bahntrasse 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 Einrichtungen gehören, daher in bezug auf die Stromspitzen viel größere Spannungsverluste 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 Spitzenleistungen nur während eines verschwindenden Teiles der Betriebszeit beansprucht wird. Es wird daher den Anforderungen der Wirtschaftlichkeit am besten entsprochen, 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 Erörterungen finden.

Die Arbeitsleitung (Fahrleitung).

A. Theorie und Berechnung.

I. Elektrische Eigenschaften; Festwerte; Berechnung der Leitungsanlage.

- Behn Eschenburg: Spannungsabfall von Wechselströmen in Eisenbahnschienen. ETZ 1904, H. 16.
- Bisacre: Berechnung von Spannungsabfällen und Energieverlusten bei Gleichstrombahnen. El. 1920, Bd. 84, S. 188. — Ref. ETZ 1920, H. 50.
- Boucherot: Abaque pour faciliter le calcul des courants alternatifs au moyen de la methode de M. Boucherot. RGE Juni 1918, S. 821.
- Breitfeld: Strom- und Feldverdrängung in runden Leitern. Eu.M 1920, H. 48.
- Breitfeld: Berechnung von Wechselstromfernleitungen. Braunschweig: Vieweg 1912.
- Easton: The construction of abaci. El. Aug. 1918.
- Gall: The a. c. track circuit. El. Sept. 1919, S. 244.
- Hak: Berechnung der Induktivität und Kapazität der Freileitungen. Eu.M 1921. — Ref. ETZ 1922, H. 8.
- Hoppe: Strombelastung von Metallschienen. EKB 1917, H. 22.
- Huldschiner: Berechnung des Spannungsabfalles in den Fahrleitungen und Schienenrückleitungen von Wechsel- und Drehstrombahnen. ETZ 1910, H. 48.
- Huldschiner: Zur Berechnung von Spannungsabfällen in den Fahr- und Speiseleitungen elektrischer Wechselstrombahnen. ETZ 1920, H. 52.
- Kennelly: Wechselstromwiderstand von Eisenbahnschienen. JFI 1916, Bd. 182, Nr. 2. — Ref. Eu.M 1916, H. 51.
- Koch u. Mauder: Entwurf von Kurvenblättern für schnelle und genaue Berechnung von Hochspannungsfernleitungen. ETZ 1921, H. 15.
- Kummer: Eiserne Fahrleitungen für Wechselstrombahnen. SBZ 1917, Bd. 70, Nr. 25. — Ref. Eu.M 1918, Nr. 7.
- Lhériaud: Le retour du courant de traction dans un réseau à courant alternatif monophasé. Verl. R.G.E.
- Lichtenstein: Experimentelle Bestimmungen der für die Berechnung von Wechselstrombahn-Leiteranlagen maßgebenden physikalischen Größen. ETZ 1907, H. 25.
- Lüthy: Ein neues System der selbsttätigen Fehlerisolierung in Traktionsleitungen. SBZ 1923, Bd. 82, Nr. 12.
- Niethammer: Strombelastung von Metallschienen. Eu.M 1918, H. 4.
- Rosenbaum: Über die zulässigen Temperaturgrenzen bei Bemessung von Freileitungen. Eu.M 1922, H. 22.
- S.E.V. Die Korrosion durch Erdströme elektrischer Bahnen. BSEV 1908, Nr. 7.
- Truxa: Beitrag zur Berechnung des Wechselstromwiderstandes massiver Eisenleitungen. Arch. Elektrot. 1919, Bd. 8, H. 4.
- Wechmann: Elektrotechnik unter dem Einfluß des Krieges. GA 1916, Nr. 931.
- Weel: Über einige bemerkenswerte Fluchtlinientafeln zur Berechnung elektrischer Leitungen. EA 1920, Nr. 81.
- Wilson: Selbstinduktion von Straßenbahnschienen. El. 23. II. 1906.
- Zickler: Die Berechnung des Wechselstromwiderstandes von Eisenleitern mit kreisförmigem Querschnitt. Eu.M 1919, H. 40.
- Zickler: Die Berechnung des Wechselstromwiderstandes von massiven Eisenleitern beliebiger Querschnittform. Eu.M 1920, H. 15.
- Wechselstrom-Verluste in Stahlschienen. Report of the Electr. Railway Fest. Comm. to the President of the Luisiana Purchase Expor. Ref. ETZ 1907, H. 30.

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 und 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 beide 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

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

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

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

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

$$\kappa = \frac{r}{100} \sqrt{\frac{\sim \mu}{\rho}}.$$

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 unbedeutend vermehren. Im Laboratorium wurde als Mittelwert des spez. Widerstandes von Eisenbahnschienen der Wert $0,195 \Omega/\text{mm}^2/\text{m}$ festgestellt.

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 Schienenlänge gleichkommt. Bei 10 m langen Schienen erhöht sich der spez. Widerstand auf das 1,2 bis 1,5fache des Schienenstahles, daher 9,6 bis 15fache des Kupfers; bei 15 m langen Schienen auf das 1,13 bis 1,33fache des

Schienenstahles und 9,0 bis 13,3 fache des Kupfers. Die Bedeutung der großen Schienenlänge und einer guten Stoßverbindung geht aus diesen Angaben hervor.

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

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

ist, wo G das Metergewicht der Schiene bedeutet.

Prüft man diese Formel, findet man, daß der durch sie gegebene Wert einem etwa 15fachen Widerstand des Kupfers entspricht.

Carter gibt demgegenüber

$$W_{SG} = \frac{1,38}{G} \text{ bis } \frac{1,69}{G} \text{ an.}$$

Der Widerstand eines gut erhaltenen 100 mm²-Kupferverbinders beträgt nach durchgeführten Messungen 0,000093 Ω , das ist bei einem Schienenprofil von 42,5 kg je l. m der Widerstand von 2,72 m Schienenlänge. Die Vermehrung des Widerstandes beträgt bei 12 m Schienenlänge somit 23,2%.

Die Stoßverbinder System Scheinig und Hofmann wiesen als Mittelwert von zahlreichen Messungen einen Widerstand von 0,0000085 Ω auf, entsprechend 0,258 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 Ω/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 den Widerstand der Schienenlängen nur um 1,0 bis 1,5 m. Der Widerstand wird dann nur mehr das 8,5- bis 11,0 fache des Kupfers.

Der Eigenwiderstand eines Außenlaschen-Drahtverbinders von 50 mm² Querschnitt und 1 m Lochabstand wurde zu 0,0037 Ω gemessen. Der Übergangswiderstand soll nach Angaben von F. Krauß ebenso groß sein. Somit ist der Widerstand eines derartigen Verbinders gleich dem Widerstand von etwa 24 m Phönix-Schiene von rund 43 kg/m. Bei dieser Verbindertypen sind die Laschen stark an der Stromleitung beteiligt.

Der Eigenwiderstand eines Unterlaschenverbinders von 80 mm² Querschnitt und 250 mm Lochabstand wurde zu 0,000066 Ω , etwa gleich 2,2 m Schiene, festgestellt. Einschließlich des Übergangswiderstandes wiesen derartige Verbinder einen Widerstandswert von 6,53 m Schienen auf. Geschweißte Stöße vergrößern den Rückleitungswiderstand je Stoß um etwa 0,09 m Schienenlänge.

In einem Betrieb mit gut erhaltenem Oberbau ergaben Messungen folgende Ergebnisse.

Stoßverbinderart	Zahl der Messungen	% der Stöße, deren Widerstand		
		weniger als 1 m Schiene	gleich 1—2 m Schiene	mehr als 3 m Schiene
Cu-Draht 50 mm ²	32	40,7	53,1	6,2
Cu-Band 80 mm ²	24	79,2	12,5	8,3
Edison-Brown-Verbinder	34	91,2	8,8	0,0
Geschweißte Stöße	12	100,0	0,0	0,0

Trotz des verhältnismäßig hohen spez. Widerstandes und 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. Eine 42,5 kg/m schwere Schiene hat z. B. einen Querschnitt von 5400 mm², das Gleis somit 10400 mm². Beträgt die Leitfähigkeit nur $\frac{1}{15}$, d. h. die Stoßverbinder verringern die Leitfähigkeit beinahe auf die Hälfte, so ist dieser Oberbau einem Kupferleiter von 720 mm² 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 mm² Querschnitt oder andere gleichwertige Verbinder.

Für die Widerstandsvermehrung der Schienen durch die Hautwirkung gelten die Erfahrungsformeln von Zickler, in welche statt des Durchmessers der Koeffizient α mit dem Querschnitt q in cm² 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 AEG lautet

$$W_w = \frac{c \sqrt{\alpha}}{2u} \Omega/\text{km Gleis},$$

wobei

$$c = 2,6 \text{ für } 15 \text{ bis } 25 \sim \text{ bzw.}$$

$$c = 2,9 \text{ für } 40 \sim \text{ zu setzen ist.}$$

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 bedeuten.

Zur Berechnung der Selbstinduktion darf x weder gleich Null, noch $= R$ (Radius des Leiters) gesetzt werden. Für $x = 0$ wäre das Feld im Leiter nicht berücksichtigt, für $x = R$ bliebe unbeachtet, 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

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

ab. Für Kupfer wird

$$R_0 = 0,78 R.$$

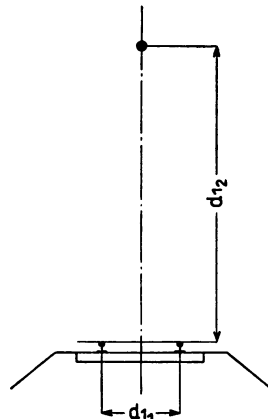


Abb. 14. Schema der Hin- und Rückleitung.

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. 14) wird danach

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

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

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

je Kilometer.

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

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

und für den Leiter 2 (Fahrdrabt)

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

da hier

$$R_{02} = \frac{R_2}{e^{\frac{1}{4}}} = 0,78 R_2.$$

Hier bezeichnen

R_1 den gleichwertigen Halbmesser der Schiene in cm,

R_2 den Halbmesser des Fahrdrabtes in cm,

d_{12} den Abstand beider Leiter in cm.

Der induktive Spannungsabfall in der Schleife (Abb. 14) $e_{\sigma 12} = e_{\sigma 1} - e_{\sigma 2}$ wird, da $J_1 = -J_2 = J$:

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

wo d , R_1 und R_2 in cm einzusetzen sind.

Geht man auf die in Wirklichkeit vorkommende Leiteranordnung über, bei welcher die Rückleitung von zwei im Abstand d_{11} cm befindlichen Schienen gebildet wird, so berechnet sich der induktive Spannungsabfall eines kupfernen Fahrdrabtes nach der in gleicher Weise abgeleiteten Formel zu

$$e_{\sigma 12} = \frac{4\pi \sim}{10^4} J \left(\ln \frac{d_{12}^2}{\sqrt{R_1 d_{11}} \cdot 0,78 R_2} + \frac{\mu}{8} \right).$$

Für Eisenfahrdrabt ist

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

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

$$\begin{aligned} W &= 0,02 \Omega/\text{km} \text{ der Gleiswiderstand für Gleichstrom,} \\ q &= 5851 \text{ mm}^2 \quad G = 45,93 \text{ kg/m} \text{ das Schienengewicht.} \\ R_1 &= 4,31 \text{ cm} \quad d_{11} = 143,5 \text{ cm} \quad d_{12} = 600 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Spannungsabfall in V/km und je A-Einphasenstrom.

~	Fahrdrahtquerschnitt 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
50	0,78	0,71	9,14	6,60

Schon bei kupfernen Fahrleitungen findet man, daß die Periodenzahl 15 die Impedanz bei 100 mm² Fahrdraht auf 0,31 Ω /km, das ist auf das 1,61 fache des Gleichstromwertes erhöht. Für denselben Fahrdrahtquerschnitt, 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.

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

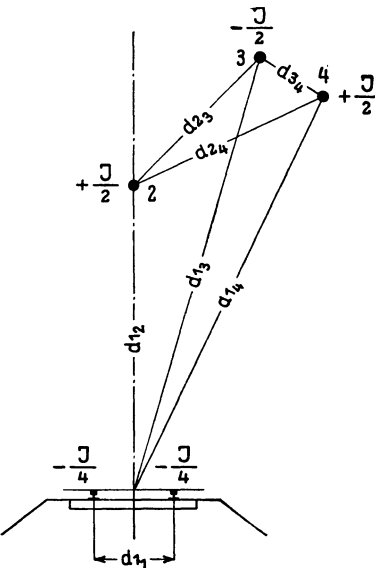


Abb. 15. Schema der Hin- und Rückleitung mit je einer Verstärkungsleitung.

Bei der Stubaitalbahn konnte zufolge der einfachen Anlageverhältnisse die gesamte Impedanz über eine Länge von rund 11 km gemessen werden. Für einen Fahrdraht von 53 mm², Drahthöhe 5,0 m, Spurweite 1,0 m, Schienengewicht 17,89 kg/m ergab die Messung bei 48 \sim rund 0,8 Ω /km Impedanz gegen den nach der Kummerschen Ableitung berechneten Wert von 0,965 Ω .

Für Doppelgleise mit einfachem Fahrdraht gilt

$$e_{\sigma 12} = \frac{4 \pi \sim}{10^4} \left(\lg n \frac{d_{12}^2 d_3^2}{R_2 d_{22}^2 \sqrt{R_1 d_{11}}} + \frac{\mu}{8} + \frac{1}{4} \right).$$

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. 15 gebrauchten Bezeichnungen gilt

$$\text{für den Fahrdraht} \quad k_2 = \frac{4 \pi \sim}{10^4} \left(\ln \frac{d_{12} d_{23}}{R_2 d_{24}} + \frac{1}{4} \right),$$

$$\text{für den negativen Speisedraht } k_3 = \frac{4\pi}{10^4} \left(\ln \frac{d_{23} d_{34}}{R d_{13}} + \frac{1}{4} \right),$$

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

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

Der kilometrische Widerstand (Impedanz) des ganzen Systems wird

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

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 Entfernungen von je 50 m metallische Querverbinder vorgesehen, außerdem auf die Kontinuität des Oberbaues in Weichen und Kreuzungen geachtet. Bei Fernbahnen begnügt man sich mit etwa 4 Querverbindungen je Kilometer.

Außer dem durch den Strom verursachten Spannungsabfall, dessen angemessener Wert mit Rücksicht auf die Wirkungsweise der Triebmaschinen, Fragen der Wirtschaftlichkeit, des Baues und des Betriebes usw. zu bestimmen ist, erscheint es vorweg nötig, auch den Arbeitsverlust in der Leitung und die hierdurch verursachte Erwärmung der Leitung zu ermitteln.

Für die Erwärmung von Freileitungen sind von Kennelly Formeln angegeben worden; die von Uppenborn errechneten Werte der zulässigen Höchststromstärken enthält die nachstehende Tabelle.

Querschnitt qmm	Stromstärke A für Leiter aus		
	Cu	Al	Fe
10	86	65	30
16	118	90	40
25	162	125	55
35	206	155	72
50	266	205	95
70	340	260	120
95	420	320	150
120	500	380	175

Die angegebenen Stromstärken sind Dauerwerte. Der Art der Strombelastung im Bahnbetriebe entsprechend ist mit Stromspitzen vom 3 bis 5fachen Wert des Mittelwertes zu rechnen. Die von derartigen Stromstärken verursachten Spannungsverluste erreichen das Vielfache der in Hinblick auf einen geordneten Betrieb zulässigen Werte, insoweit Kupfer als Baustoff verwendet wird. Hieraus folgt, daß sich die Nachrechnung der Leitungen für Bahnen auf Erwärmung im allgemeinen erübrigt.

II. Die Stromverteilung.

Bell-Rasch: Stromverteilung für elektrische Bahnen. Berlin: Springer 1898.

Herzog-Feldmann: Die Berechnung elektrischer Leitungen in Theorie und Praxis. Berlin: Springer 1921.

König: Der mehrpolige Polplan in der zeichnerischen Leitungsberechnung. ETZ 1903, H. 5.

Lawrence: The economics of direct current railway distribution. JAIEE 1922, Nr. 5.

Pfarr: Die Anwendung des Seileckes für die Berechnung der Stromverteilung elektrischer Bahnen. ETZ 1901, H. 20.

Reichers: Die Einführung des Dreileiterbetriebes bei der Straßenbahn in Dresden. Mitt. V. El.-Werke 1918, Nr. 210. — Ref. Eu.M 1918, H. 14.

Schuler: Schaltanordnungen in den Fahrleitungsanlagen der SBB. SBZ 1922, Bd. 80, Nr. 16.

Sieber: Dreileitersystem bei Straßenbahnen. VT 1921, Nr. 9.

Way: Three-wire railway distribution in Wilmington. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 9.

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 mittelbar geeignete Stromart 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, nämlich Drehstrom mit 42, 50, 60 Perioden.

Diese Stromart und Periodenzahlen eignen sich für den Bahnbetrieb nicht. Da 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 unmittelbaren Speisung durch die Primäranlage 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 ist und für gleichen Kostenaufwand die Umformungsverluste ausgeglichen werden können.

Die mittelbare 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 unmittelbar 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 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 und 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 Stromverzweigungen ausbildet. Wenn demnach aus einem Unterwerk mehrere Rückleitungskabel herausführen, um die vorgeschriebenen 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 Zweileitersystem — Fahrleitung und Schienenrückleitung — oder auch mit dem Dreileitersystem zur Ausführung gelangen.

Das Dreileitersystem 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 mittelbaren 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 Dreileitersystem, vielmehr ein mit gemeinsamer Rückleitung arbeitendes doppeltes Zweileitersystem.

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 Ausgleichstrom. 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. Nach getroffener 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, so erhält man im fraglichen Zeitpunkt für jeden Zug die Stelle, an welcher dieser 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 Pol, erhält man das Krafteck (Stromeck, Abb. 16). Die beiden äußersten Seiten des Stromeckes schließen demnach die Summe aller Stromstärken ein. Deutet man hierauf auf einer wagerechten Geraden in maßstabrichtigen Entfernungen die Lage der Belastungen durch

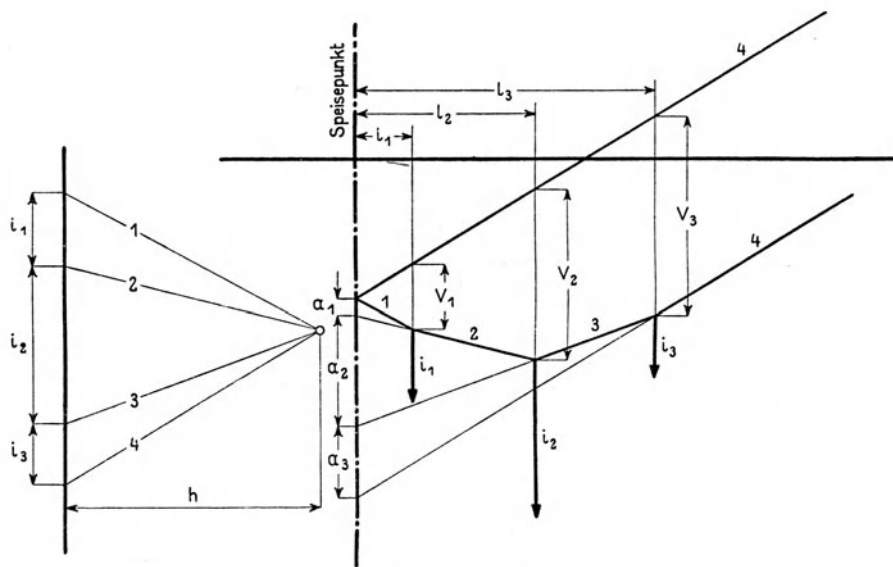


Abb. 16. Stromeck und Seileck.

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, welche die zugehörige Strombelastung einschließen. So mit allen Strombelastungen fortfahrend, erhält man das Seileck, dessen zwei letzte Seiten parallel zu den Außenseiten des Krafteckes liegen.

Freitragende Speisung (Abb. 16). 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 Parallele mit derjenigen äußersten Seite des Stromeckes, die der Strombelastung i_1 entspricht, bis zur Senkrechten der Strombelastung i_3 , hierauf eine Parallele mit dem Strahl 2 des Stromeckes bis zur Senkrechten für i_2 , usw. Zieht man schließlich vom Schnittpunkt des Seileckes 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 der betrachteten Leitung darstellt.

Es bestehen die geometrischen Beziehungen

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

Daraus folgt

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

Der Spannungsverlust bis zum Streckenende ist gleich

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

das ist die Summe der Strommomente multipliziert mit dem kilometrischen Widerstand R .

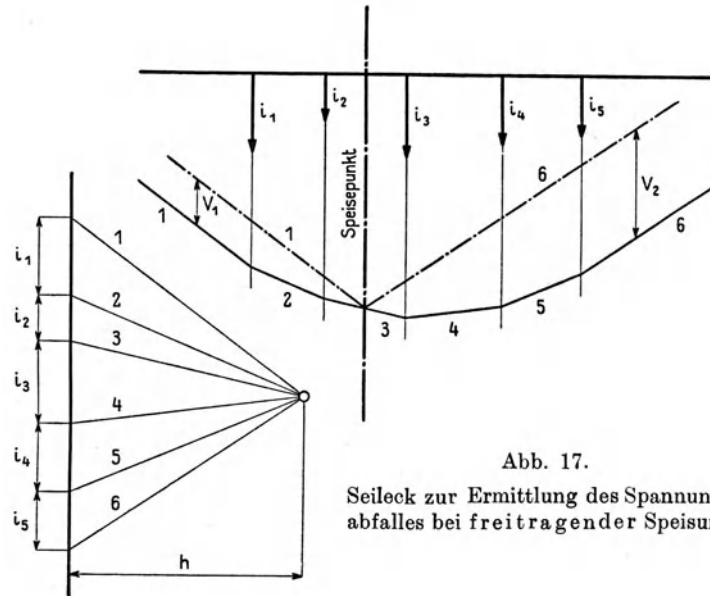


Abb. 17.

Seileck zur Ermittlung des Spannungsabfalles bei freitragender Speisung.

Wählt man R nicht willkürlich, sondern

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

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

Weiter 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 gleich

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

Wie ein Blick auf Abb. 17 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 ent-

sprechenden Polabständen für die im Bereich der betreffenden Streckenteile vorkommenden Strombelastungen zu ziehen. Die Schlußlinie wird keine Gerade, sondern eine so oft gebrochene Linie, als Querschnittsänderungen vorkommen, wobei die Teillinien parallel zu den aus den einzelnen Polabständen gezogenen Außenseiten des Stromeckes sind.

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 der Abb. 18 dargestellt.

Da je zwei Seiten im Seilpolygon durch die zu ihnen parallelen Strahlen im Stromeck denjenigen Stromwert abgrenzen, der im Belastungsschema an ihrem Schnittpunkt angreift, bestimmt die Schlußlinie auch in diesem Fall die von jedem Speisepunkt abgenommene gesamte Stromstärke.

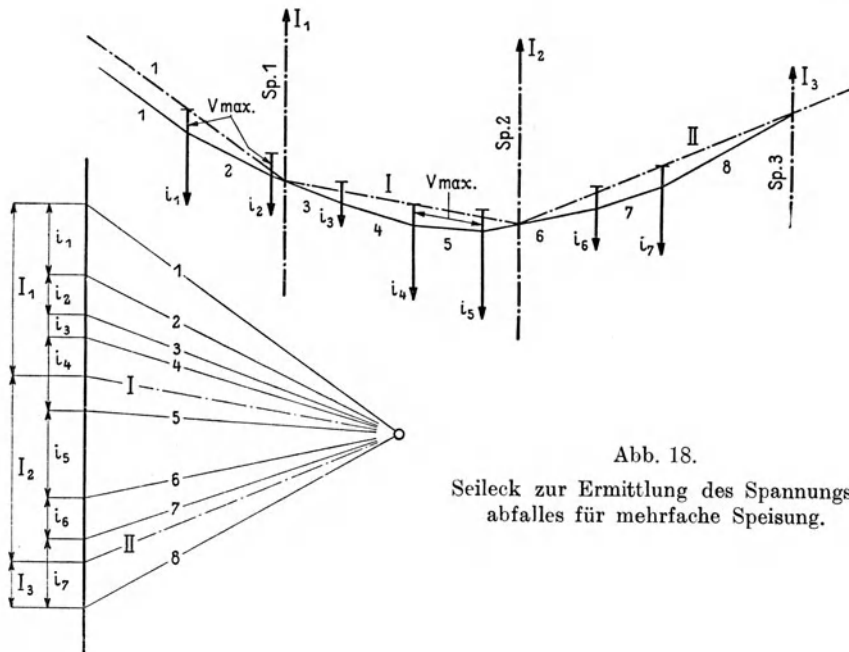


Abb. 18.
Seileck zur Ermittlung des Spannungsabfalles für mehrfache Speisung.

Dieses Verfahren kann ohne weiteres zur Austeilung 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 schließlich die günstigste Mittellage für die Speisepunkte. Das Seileck gibt unter einem die Belastungen der einzelnen Speisepunkte, indem man zu den gefundenen Schlußlinien Parallele im Stromeck zieht. Die Parallelen zu den in 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, so 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 werden. 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 was die Rückleitung und den zahlenmäßigen Wert der Strombelastungen anbelangt, 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.

- Ambrosius: Beeinflussung von Telegraphenleitungen durch eine Hochspannungsanlage. Helios 1911, Nr. 19.
 Behn-Eschenburg: Über Wechselstrommotoren der M.F.O. und ihre Wirkungen auf Telephonleitungen. EKB 1908, H. 28.
 Brauns: Telegraphenstörungen durch Wechselstrombahnen mit Schienenrückleitung. ETZ 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.
 Chappuis-Desprez: Recherches sur les courants vagabonds et sur l'électrolyse produite par ces courants. RGE 1922, Bd. 11, Nr. 1.
 Devaux-Charbonnel: Le telegraphe et la traction monophasée. Verl. der RGE.
 Dumermuth: Maßnahmen gegen die Störungen der Telegraphenleitung im Rhonetal durch den Bahnbetriebsstrom der Lötschbergbahn. SBZ 1917, Bd. 59, Nr. 12. — ETZ 1917, H. 4.
 Farnham: The destructive effect of electric currents on subterrenean metal pipes. Transactions AJEE Bd. 11, S. 191.
 Girousse: La traction monophasée et les lignes à courant faible. LE Nov. 1913. — EKB 1914, Nr. 2. Inductive interference in heavy traction. ERJ Febr. 1916. — Mai 1914. — Schwarzkopff: EKB 1904, H. 23. — SBZ 1917, Bd. 59, Nr. 25. — ETZ 1920, H. 11.
 Hohage: Über die Beeinflussung von Schwachstromleitungen und -apparaten durch Starkstromanlagen. ETZ 1911, H. 51.
 Kenelly: Wechselstromwiderstand von Eisenbahnschienen. JFI Bd. 182. — Ref. EKB 1917, H. 31.
 Kummer: Die Maschinenlehre der elektr. Zugförderung II. Berlin: Springer 1920.
 Kuntze: Untersuchungen über Schwachstromstörungen bei Einphasen-Wechselstrombahnen. München: R. Oldenbourg 1920.
 Leuthel: Elektrisierung der franz. Eisenbahnen. GC 1919. Bd. 74, S. 334. — Ref. ETZ 1920, H. 11.
 Lichtenstein: Experimentelle Bestimmungen der für die Berechnung von Wechselstrombahnleiteranlagen maßgebenden phys. Größen. ETZ 1907, H. 25. — EKB 1907, H. 27. — E 1907, Nr. 32.
 Lichtenstein: Erdstromfragen in Theorie und Praxis. ETZ 1921, H. 31.
 Lindström: Telephon- und Telegraphstörungen durch den elektrischen Bahnbetrieb. Aseas Egen Tidning 1922, H. 11.

- Marcuse: Schutz oberirdischer Fernsprechleitungen gegen störende Beeinflussung durch parallelliegende Hochspannungsleitungen. Z.Eisenb.Sich.Wes. 1915, Nr. 24.
- Marguerre: Über Telephonstörungen durch Wechselstrombahnen und einige Vorgänge in Einphasengeneratoren. ETZ 1912, H. 47.
- Marguerre: Einige Messungen über influenzierte Spannungen in Freileitungen. EKB 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. SETZ 1909, H. 40.
- Porney: Die Elektrisierung der Eisenbahnen in den Vereinigten Staaten und der Schutz der Telegraphen- und Fernsprechlinien. Ann. des Postes, Télégr. et Téléphon. 1919, S. 566. — RGE 1920. Bd. 7, S. 199. — Ref. ETZ 1921, H. 21.
- Rohr: Störende Beeinflussungen und Schutzvorkehrungen. Zf.KB 1916, H. 2.
- Rüdenberg: Fernwirkungen von Hochspannungsleitungen auf benachbarte Schwachstromleitungen BSEV 1923, Nr. 3.
- Rüdenberg: Über den räumlichen Verlauf von Erdschlußströmen. ETZ 1921, H. 31.
- Schröter: Schutz von Starkstromleitungen gegen Starkstrom. ETZ 1915, H. 7.
- Schrottke: Über den Einfluß der Hochspannungsleitungen auf die Betriebsfernprechleitungen. ETZ 1907, H. 28.
- Schreiber: Graphische Berechnung elektrischer Leitungen. ETZ 1923, H. 12.
- Scott: Die Frage der induktiven Indifferenz und der Elektrolyse in bezug auf Eisenbahn-Elektrisierung. EJ 1922, Nr. 4.
- Schuler: Störungen der Schwachstromleitungen durch Wechselstrombahnen. SBZ 1921. Bd. 78, H. 15. — Ref. ETZ 1922, H. 10.
- Shepard: Some new light on electrolysis. ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 14.
- Smith: Electrolysis mitigation in Winnipeg. ERJ 1921, Bd. 57, S. 584. — Ref. ETZ 1921, H. 27.
- Stein: Störungen in Fernsprechleitungen durch Wechselstrombahnen. ETZ 1912, H. 33.
- Stecher: Verfahren zur Berechnung der elektrostatischen Einwirkungen von Drehstromlinien auf benachbarten Schwachstromleitungen. ÖWÖBD 1915. 21. Jahrg.
- Sulot: Beitrag zur Berechnung der Influenzwirkung von Starkstromleitungen auf parallellaufende Schwachstromleitungen. Eu.M 1918, H. 33.
- Thormann u. Kummer: Beeinflussung der Schwachstromanlagen durch die elektrischen Traktionsbetriebe. Schweiz. Studienkommission. Bericht 4. II. Zürich: Rascher 1915.
- Truxa: Untersuchungen über die Beeinflussung von Schwachstromleitungen durch die elektr. Mittewaldbahn. ZÖIAV 1921, H. 20/21.
- Valensi: Telefon- u. Telegrafstörungen. Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones. Aug. 1918, März 1919.
- Warren: Inductive effects of alternating current railroads. Proc. Aug. 1918. — Ref. ETZ 1920, H. 11.
- Ytterberg: Untersuchungen über Telefonstörungen, verursacht durch einphasige Bahnmotoren. Aseas Egen Tidning 1923, H. 1.
- Zanger: Die Methoden zur Untersuchung der Korrosionsverhältnisse bei elektrischen Bahnen. BSEV Nov. 1920.
- Zanger: Leitsätze zur Verminderung der Korrosion an Rohren und Kabeln durch Erdströme elektrischer Bahnen. BSEV 1922, Nr. 11 u. 12.
- Saugtransformatoren auf der mit Wechselstrom betriebenen Strecke Perpignan-Villafranca der franz. Südbahn. RGE 1917, Bd. 1, H. 9 u. 14. — SBZ 1917, Nr. 25. — Ref. EKB 1917, H. 31.
- La Traction électrique et les lignes à courant faible. TM März 1919, S. 113. — LE März 1919.
- Korrosionsverhältnisse bei elektr. Bahnen. BSEV 1920, Nr. 10. — Ref. Eu.M 1921, H. 28. — ETZ 1921, H. 30.
- Einfluß von Unterwerken auf Verminderung der Streuströme. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 18. — Ref. ETZ 1921, H. 45.
- Amerikanische Untersuchungen über Schwachstromstörungen durch Starkstromleitungen. ETZ 1921, H. 44.
- Der Saugtransformator in der Stromverteilung für elektr. Bahnen. SBZ 1917, Bd. 59, Nr. 25.

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 Bereiche befindlichen, anderen Zwecken dienenden Leitungen beeinflussen. Handelt es sich dabei um Leitungen von Starkstromanlagen, bleiben diese Fernwirkungen belanglos. Die Fernwirkungen 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 Doppelleitungen 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. 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 innerhalb ihres Bereiches befindlichen Leiter durch statische Induktion sehr hohe Spannungen erzeugen, die wieder die Quelle von Ladeströmen sind.

Die statisch induzierte Spannung ist proportional der induzierenden Spannung, die Ladeströme dagegen der Periodenzahl. Die Fernwirkung nimmt mit der Entfernung der Leitungen voneinander ab. Die diesbezüglichen elektrophysikalischen Gesetze hat Schrottko 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 die Beeinflussung daher 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; er erreicht seinen Höchstwert, wenn der Isolationswiderstand Null wird.

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

In den eigenen Betriebstelephonleitungen der ebenfalls mit 15000 V WS betriebenen Wien—Preßburger Bahn, die am Bahnkörper auf besonderem Holzgestänge in einer Ausdehnung von 50 km verlegt sind, wurden Spannungen bis zu 2000 V gemessen.

Physiologisch können selbst diese Spannungen für die mit den Apparaten in Berührung tretenden Personen nur unangenehm, nicht aber 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 mittelbar 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 Telephonströme undurchlässig ist, dagegen in bezug auf die statische Spannung einem Kurzschluß gleichkommt; diese Anordnung, ebenso wie die Einschaltung besonderer Kondens-

satoren 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 Schwachstromleitungen eindringen oder daß die Ströme durch die als Rückleitung dienende Erdleitung unmittelbar 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 einzig sichere Schutz eine an sich gute Isolation und Verzicht auf die Erdrückleitung der Schwachstrombetriebe.

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 Dreileitersystem, 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 V erreichen.

Die auf die chemisch wirkenden Erdströme zurückzuführenden Gefahren sind insbesondere von den interessierten schweizerischen und amerikanischen Fachverbänden theoretisch und praktisch untersucht worden.

Die vom Gleisnetz elektrischer Bahnen, die die Schienen als Leiter benützen, abweichenden Streuströme folgen auf ihrem Wege durch den Erdboden geschlossenen Metallmassen, vor allem Rohrleitungen und metallischen Mänteln von Kabeln. Erde und Rohrleitungen nehmen solcherart unter Bevorzugung der letzteren an der den Fahr-schienen zufallenden Stromführung teil. Richtung und Stärke der Streuströme ist durch die Potentialverteilung bestimmt. Das Gleisnetz entsendet an Punkten hohen Potentials Streuströme nach dem Rohrleitungsnetz, um sie an Punkten eigenen niederen Potentials wieder aufzunehmen. Das Erdreich wirkt hierbei infolge seines Gehaltes an Feuchtigkeit und Salzen als Elektrolyt; den Fall gleichbleibender Stromrichtung vorausgesetzt (Gleichstrombahnen), „wandert die Basis, bzw. das Metall mit dem Strom“, der Säurerest zersetzt (korrodiert) die Kathode. Am Rohrnetz ist daher das „Einzugsgebiet“ der Erdströme ungefährdet, das Gebiet ihres Austrittes ist der „Korrosionsbereich“. Die zwischen Einzugsgebiet und Korrosionsbereich liegende „neutrale Zone“ führt das Maximum des Rohrstromes.

Als Maß der Gefährdung im Korrosionsbereich gilt die „zerstörte Schichtdicke“ des Rohrmetalles (Kabelmantels)

$$\delta = \frac{\alpha j t}{\gamma}$$

α = elektrochemisches Äquivalent des Rohrmetalles, γ = spezif. Gewicht des Rohrmetalles, j = Stromdichte an der Stromaustrittsstelle, t = Zeit der Einwirkung. Für verschiedene Rohrmaterialien ist für $j = 0,001$ A je dm^2 Stromdichte am Rohr unverändert wirkend während eines Jahres, die zerstörte Schichtdicke (rechnungsmäßig):

Aluminium	= 0,114 mm
Kupfer (in höherer Valenz)	= 0,232 "
" (in niederer ")	= 0,166 "
Eisen (in höherer ")	= 0,115 "
" (in niederer ")	= 0,077 "
Blei	= 0,295 "

Hiernach sind Leitungen mit Kupfer- oder Bleimantel besonders gefährdet. Eine Rückbildung des korrodierten Metalles bei Umkehr der Stromrichtung ist nicht nachgewiesen. Bei periodischem Polwechsel tritt bei 5 Perioden je Minute praktisch keine Korrosion ein. Der periodische Polwechsel verringert die Wirkung der Elektrolyse. Das Bureau of Standard konnte feststellen, daß schon der einmalige Polwechsel am Tage die Gefährdung auf etwa $\frac{1}{4}$ herabsetzt.

Für die Wahl der Polarität der Schienen können keine allgemein gültigen Regeln gegeben werden. Bei einer unverzweigten Linie tritt die größte Spannungsdifferenz an dem an das Schienenkabel angeschlossenen Ende auf. Es ist mit Rücksicht auf dieses Kabel vorteilhaft, dieses Gebiet in die Eintrittszone des Stromes zu verlegen. Ist der $+$ -Pol am Fahrdraht, greifen die bei der Stromabnahme durch Unterbrechungen entstehenden Lichtbogen den Fahrdraht stärker an. Liegt der $-$ -Pol am Ende, wird in erster Reihe die Umgebung der Speisepunkte gefährdet. Es muß vermieden werden, den Sammelpunkt der Erdströme dorthin zu verlegen, wo viele Rohre zusammenkommen. Befindet sich ein Speisepunkt nächst eines solchen Rohrknottenpunktes, so wird es besser sein, den $+$ -Pol zu erden.

Das Übel der Streuströme wird am besten durch eine Neutralisierung der Schienenrückleitung behoben. Ein gut ausgeglichenes Dreileitersystem bewirkt eine derartige Neutralisierung.

Die Größenordnung der Gefährdung durch Streuströme wird durch Steigerung der Betriebsspannung herabgesetzt, indem der absolute Wert des Betriebsstromes verkleinert wird.

Eine einseitig gespeiste Fahrstrecke mit einfachem Pendelbetrieb und ein dazu paralleler Rohrstrang weisen die in Abb. 19 dargestellte Potentialverteilung auf. Unter der Voraussetzung, daß die Streuströme im Verhältnis zum Schienenstrom gering sind und der Rohrstrang gut leitend ist, wächst das Schienenpotential vom Schienenspeisepunkt aus linear mit der Entfernung an (Spannungsabfall im Gleis), während das Rohrpotential praktisch konstant bleibt. Die Potentialdifferenz zwischen Schiene und Rohr

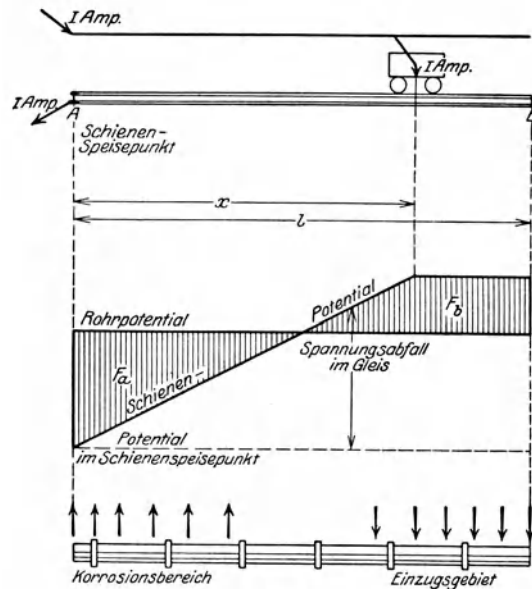


Abb. 19.

führt zur Ausbildung der Erdströme, deren Stromdichte für die Gefährdung maßgebend ist. Unter der Voraussetzung gleicher Leitfähigkeit des Erdbodens über die ganze Strecke müssen die Potentialflächen Fa und Fb einander aufheben (aus der Bedingung gleicher Strommenge im Einzugsgebiet und Korrosionsbereich). Die Gesetzmäßigkeit für den Höchstwert der Gefährdung (zerstörte Schichtdicke) ist durch folgenden Beziehungen gekennzeichnet:

nächst des Speisepunktes A :

$$\delta_a = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \frac{p_{\max} T}{3 \Delta r_e} \quad (\text{Korrosionsbereich für die ein-} \\ \text{gezeichnete Stromrichtung})$$

nächst des Streckenendes B :

$$\delta_b = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \frac{p_{\max} T}{6 \Delta r_e},$$

wobei: α und γ wie oben (Konstante des Rohrmaterials)

p_{\max} der tatsächlich (in der ungünstigsten Wagenstellung: Streckenende) auftretende Höchstwert des Spannungsabfalles im Gleis,

Δ die für den Stromein-(aus-)tritt maßgebende Fläche am Rohr pro Längeneinheit,

r_e der Erdwiderstand zwischen Gleis und Rohr pro Längeneinheit,

T die einfache Fahrzeit über die Strecke, während welcher die Schichtdicke δ zerstört wird.

Ebenso ist allgemein für andere Belastungsfälle:

$$\delta = k \cdot \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \frac{p_{\max} T}{\Delta r_e},$$

wobei k folgende Werte annimmt:

	Im Korrosionsbereich (ungünstigster Punkt)	Im Einzugsgebiet (ungünstigster Punkt)	
Gleichpotentiale Schienenspeisung an beliebigen Punkten einer nicht verzweigten Strecke.	einfacher Pendelbetrieb mit einem Wagen	$k = \frac{1}{3}$	$k = \frac{1}{6}$
	gleichmäßig belastete Strecke mit sehr vielen Wagen	$k = \frac{2}{3}$	$k = \frac{1}{3}$

bezogen auf negative Schienenspeisung; bei positiver Schienenspeisung ist die Sachlage umgekehrt.

Der Durchmesser der gefährdeten Rohre erscheint in der Größe Δ , woraus folgt, daß Rohre mit kleinen Durchmessern vergleichsweise mehr gefährdet sind, als solche mit großem Querschnitt.

Je größer der Erdwiderstand zwischen Schiene und Rohr ist, um so geringer wird der Streustrom.

Eine gut isolierende trockene Schienenbettung ist in diesem Belangen ein wirksames Mittel. Eine zuverlässige Bestimmung des Erdwiderstandes ist kaum zu erzielen, nicht zuletzt auch wegen Beeinflussung der Ergebnisse der Messung durch Polarisationserscheinungen.

Das Bureau of Standards gelangte zur Feststellung, daß der Erdwiderstand mit wachsendem Druck bis etwa 7 at allmählich zunimmt, doch ist die Veränderung überhaupt klein; von großem Einfluß hingegen ist die Feuchtigkeit des Bodens. Eine Tonerde von 10 bis 20 v. H. Feuchtigkeitsgehalt änderte den Widerstand von 2340000 Ω/cm bei 5 v. H. Feuchtigkeitsgrad auf 5045 Ω/cm bei 78 v. H. Feuchtigkeitsgrad. Ebenso ist der Einfluß der Temperatur außerordentlich groß. Der Widerstand erreichte den 500fachen Wert durch Verringerung der Temperatur von $+18^\circ C$ auf $-19^\circ C$. Darnach sind im Sommer größere Streuströme zu erwarten als im Winter.

Bei in Beton gebetteten Schienen mit Eisenschwellen war der Übergangswiderstand von der Schiene zur Erde am geringsten, etwa $0,11 \Omega/\text{km}$. Eingeschotterte Schienen auf Holzschwellen wiesen einen Widerstand von $0,33$ bis $0,36 \Omega/\text{km}$ auf. Vignolschienen zeigten bei offener Verlegung noch höhere Werte. Bei Verlegung auf Holzschwellen und Erdunterlage bis zum Schienenfuß wurde $1,2$ bis $1,4 \Omega/\text{km}$ gefunden. Die Tränkung der Schwellen ist ohne Einfluß, dagegen setzt eine solche mit Zinkchlorid den Widerstand auf etwa die Hälfte herab.

Die Spannungen zwischen Schiene und Rohr dürfen angesichts dieser Veränderlichkeit des Erd- und Übergangswiderstandes nicht ohne weiteres als Maß der Korrosionsgefährdung gelten. In den Bezirken maximaler Spannungsdifferenz kommen Mittelwerte von $0,5$ bis 3 Volt bezogen auf eine charakteristische Periode des Bahnbetriebes häufig vor. Stark überlastete Strecken und solche mit schlechtem Erhaltungszustand der Schienen gehen aber bedeutend höher; Besig hat an den Ausläufern des Straßennetzes Genf vorübergehende Werte von 20 Volt und mehr ermittelt (bei positiver Schienenspeisung). Solche hohe Werte müssen nicht notwendig (hoher Erd- und Übergangswiderstand, kleine Zugsfrequenz) starke Rohrgefährdung zur Folge haben, andererseits können bei ungünstigen Widerstandsverhältnissen viel kleinere Spannungen zu gefährlichen Zerstörungen durch den Erdstrom führen. Maßgebend für die Zerstörung bleibt immer die an der ungünstigsten Stelle auftretende höchste Stromdichte und die Zeit ihrer Einwirkung.

Theoretisch bewirkt der ununterbrochene Angriff der nachstehenden Erdstromdichten innerhalb 30 Jahren eine Verzehring der halben Wandstärke:

Rohr, Wandstärke:

Gußeisen	10 mm	1,3 mA/dm ²
Schmiedeeisen	3 "	0,4 "
Blei	3 "	0,15 "

Experimentell stellte Besig bei seinen Untersuchungen in Genf an einigen besonders gefährdeten Stellen des Rohrnetzes die nachstehenden Werte von Stromdichte und Spannungsdifferenz (Mittelwerte gelten über eine charakteristische Betriebsperiode) fest:

Gemessene Erdstromdichtungen.

Nr.	Bodenbeschaffenheit	Rohr		Stromdichte in mA/dm ²		Spannung zwischen Rohr und Schiene in Volt	
		Größe und Lage	Zustand	Mittelwert	maximaler Wert	Mittelwert	maximaler Wert
1	Lehm mit Sand und Steinen vermischt, feuchter Boden	Gußrohr 100 mm \emptyset , parallel mit Schiene 0,9 m unter Boden	Angerostet, noch keine Anzeichen von Korrosion	0,10	0,31	0,65	0,9
2	Lehm und Sand, wenig feuchter Boden	Gußrohr 80 mm \emptyset , Kreuzung mit Schiene 1,0 m unter Boden	Deutliche Anzeichen von Korrosion	0,33	0,93	1,0	3,2
3	Trockener Sand und Schutt, mit Schotterstein vermischt	Schmiedeeisernes Rohr 20 mm \emptyset , Kreuzung mit Schiene 0,3 m unter Boden	Ausgeprägte Korrosion	0,51	1,14	2,1	4,5
4	Sand mit Steinen vermischt, wenig feuchter Boden, an der Korrosionsstelle Stockwasser	Bleirohr 20 mm \emptyset , Kreuzung mit Schiene 0,9 m unter Boden	Starke Korrosion, Rohr ist undicht geworden	0,87	2,04	0,9	2,9

Bei Fernbahnen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, mit allen Mitteln für die Herabsetzung des Schienenpotentials überhaupt zu sorgen. Wiederholte zuverlässige Erdung der Schienen, sorgfältige Instandhaltung der Längs- und Querverbinder bilden 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 elektrolitischen 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 Nutungen 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 erreichen, müssen die Leitungen jeder Schleife systematisch verdrillt werden, damit jeder Draht genau gleich und entgegengesetzt der induktiven Beeinflussung unterliegt.

IV. Mechanische Eigenschaften der Leitung.

- Antranakian: Formules et abaques pour servir au calcul au point de vue mécanique des lignes aériennes. RGE 1921, Bd. 9, Nr. 16.
- Besser: Durchhang von Freileitungen. ETZ 1910, H. 48.
- Blondel: Calcul des lignes aériennes. RGE 1914.
- Carpentier: Sur la représentation graphique des tensions des conducteurs des transmissions d'énergie en fonction des portées. RGE 1922, Bd. 11, Nr. 24.
- Coding-Brackett: Exp. und rechn. Ermittlung des Durchhanges von Leitungen. EW Sept. 1912.
- Donath: Die Berechnung von Isolatorstützen. ETZ 1920, H. 41. — 1921, H. 17.
- Dreisbach: Neue Methode zur Prüfung des Durchhanges von Freileitungen. Eu.M 1909, H. 50.
- Edler: Hilfswerte zur Berechnung der Freileitungen. Eu.M 1919, H. 48.
- Edler: Aneisungsformeln. BSEV 1920, Nr. 8.
- Egg: Der einseitige Zug bei Freileitungen. BSEV 1920, Nr. 7. — Ref. ETZ 1921, H. 11.
- Fetter: Die Zustandsgleichung eines Seilzuges und deren Auflösung vermittelt der kollinearen Rechentafel. Eu.M 1920, H. 47.
- Fetter: Der Einfluß des Gewichtes der Abspannketten auf den Durchhang von Freileitungen. Eu.M 1921, H. 24.
- Feuer: Berechnung gegliederter eiserner Gestänge für Freileitungen. ETZ 1920, H. 37.
- Gesing: Drahtdurchhang und Querschnittbemessung, sowie Bestimmung der Montagezüge für Hochspannungsfreileitungen. EKB 1913, H. 20.
- Glinski: Zur Bestimmung des Durchhanges und der Spannung in Drähten. ETZ 1903, H. 14.

- Graphische Tabellen zur Bemessung von Holz- und Eisenmasten. Berlin: Jaeger 1921.
- Grothe: Durchhänge von Freileitungen. ETZ 1920, Bd. 41, H. 16. — Ref. Eu.M 1920, H. 42.
- Grütter: Beitrag zur Berechnung von Freileitungen. BSEV 1913, Nr. 2.
- Guerndt: Ermittlung des Durchhanges von Freileitungen an schweren Abspannisolatorketten. ETZ 1922, H. 5.
- Hals: Berechnungsgrundlagen für das Spannen von Fernleitungen. Elektro-Industrie, Kristiania 1920, H. 7. — Ref. Eu.M 1921, H. 5.
- Heinemeyer: Formeln für die Durchbiegung von Gittermasten. ETZ 1921, H. 30.
- Jobin: Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter. BSEV 1919, Nr. 7. — 1923, Nr. 5.
- Joitel: Nomogrammes pour les calculs mécaniques des lignes aériennes de transmission d'énergie électrique. RGE 1922, Bd. 12, Nr. 1; Bd. 11, Nr. 26.
- Jüllig: Über die mechanische Beanspruchung elektrischer Luftleitungen. ETZ 1899, H. 51.
- Kallir: Das Verhalten der Freileitungen bei zusätzlicher Eisbelastung. Eu.M 1923, Nr. 41.
- Kirsten: Transmission line design. Proc. 1917, Nr. 8.
- Kohler: Deutsche und Wiener Sicherheitsvorschriften für Freileitungen. Eu.M 1910, H. 13.
- Krautt: Stahlaluminium-Seile für Hochspannungsfreileitungen. Eu.M 1923, H. 7.
- Krzyzanowski: Über den Einfluß von Isolatorketten auf die Beanspruchung und den Durchhang im Spannungsfelde. Eu.M 1917, H. 41.
- Lhermitte: Tensions [d'équilibre pour plusieurs portées consécutives lorsque les conditions initiales varient. RGE 1921, Bd. 10, Nr. 26.
- Müller: Methode zu graphischen Ermittlungen des Durchhanges von Drähten. Eu.M 1911, H. 18.
- Neubert: Zeichn. Berechnung von Fahrdrachtspannungen. VT 1921, H. 5/6.
- Nicolaus: Über den Durchhang von Freileitungen. ETZ 1907, H. 37.
- Ott: Rechentafel zur Berechnung von Holzmasten für elektrische Freileitungen. Eu.M 1920, H. 43.
- Otto: Berechnung des Drahtdurchhanges. ETZ 1903, H. 3.
- Pender-Thomson: The mechanical and electric characteristics of transmission lines. Proc. Juli 1911. — EW Sept. 1912. — Ref. Eu.M 1912.
- Poschenrieder: Bau u. Instandhaltung d. Oberleitungen elektr. Bahnen. München: Oldenbourg 1904.
- Potin: Calcul à vue des lignes aériennes pour l'emploi de nomogrammes à points alignés. TM 1912, Nr. 8.
- Rachel: Die neuen Bahnkreuzungsvorschriften für fremde Starkstromanlagen der Reichsbahnverwaltung. ETZ 1922, H. 2.
- Riedlinger: Das Freileitungsgrundmonogramm. Eu.M 1923, H. 38.
- Rosenbaum: Die Bemessung der Zusatzlast von Freileitungen. ETZ 1922, H. 36.
- Santuari: Di due grandezza caratteristiche della catenaria e del loro uso nel calcolo pratico di conduttori sospesi. Eta. 1921, Nr. 12.
- Schauer: Spannung und Durchhang in Starkstromfreileitungen. EKB 1910, H. 24.
- Schenkel: Die größtmögliche Spannweite bei Freileitungen. ETZ 1921, H. 27.
- Schenkel: Stahlaluminium für Freileitungen. ETZ 1922, H. 37.
- Schenkel: Neues über Freileitungen. Einfluß der Hängeisolatoren. ETZ 1921, H. 31.
- Schulze: Bestimmung des Durchhanges von Hochspannungsleitungen mit Abspannisolatorketten. ETZ 1922, H. 7.
- Schwarzkopf: 110000 Volt Kraftübertragung in großer Gebirgshöhe. EKB 1916, H. 33.
- Seefehlner: Kollineare Rechentafel und Nomogramm zur Ermittlung von Spannung und Durchhang einer Freileitung bei veränderlicher Temperatur und veränderlichem Gewicht für beliebige Spannweite. Eu.M 1919, H. 51. — EKB 1920, H. 3.
- Seidemann: Durchbiegung von Gittermasten. ETZ 1920, H. 51.
- Sener: Vereisung von Fahrleitungen. ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 24. — Ref. Eu.M 1922, H. 42.
- Sengel: Berechnung d. Durchhanges u. d. Spannung in frei gespannten Drähten. ETZ 1903, H. 39.
- Singer: Rechentafel z. Bestimmung d. Spannung u. d. Durchhanges v. Freileitungen. Eu.M 1920, H. 35.
- Sumec: Graphische Bestimmung der Zugbeanspruchung von Freileitungen. ETZ 1915, H. 26.
- Szilas: Über d. Durchhang v. Freileitungen. MMEEK 1917, Bd. II, Nr. 16. — ETZ 1919, H. 38.
- Truxa: Schaulinien zur raschen Ermittlung des Durchhanges und der Beanspruchung von Leitungseilen. Eu.M 1923, H. 34.
- Vaupel: Eine neue Art der Zug- und Durchhangsbestimmung bei Freileitungen. ETZ 1923, H. 7.
- Weil: Beanspruchung und Durchhang von Freileitungen. Berlin: Springer 1910.
- Wlach: Bestimmung des Durchhanges bei Kettenfahrleitungen und deren selbsttätige Nachspannung. ETZ 1920, H. 18.
- Zeulmann: Bewegungsvorgänge in Kettenfahrleitungen elektrischer Bahnen. EKB 1921, H. 8. — Eu.M 1921, H. 22.
- Zeulmann: Einfluß der Isolatorketten auf Beanspruchung und Durchhang von Freileitungen. EKB 1921, H. 22.
- Neue franz. Vorschläge zur mech. Berechnung von Freileitungen. RGE 1921, H. 11. — Ref. EKB 1921, H. 8.

Oberleitungskonstruktionen an einer Zweigstrecke der St. Paulbahn. ERJ 1921, Bd. 57, S. 637. — Ref. ETZ 1921, H. 24.

Calculs mécaniques des lignes aériennes. RGE 1921, Bd. 9, Nr. 11.

Vereisungen ungewöhnlicher Stärke an Freileitungen. ETZ 1922, H. 21. — EW 1922, Bd. 79, S. 335.

Circulaire déterminant les conditions auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique pour l'application du loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie. RGE 1922, Bd. 10, Nr. 14.

1. Allgemeines. System. 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 Austeilung 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 wegen ihres höheren Gewichtes. Der Bügel verlangt auch eine straffer gespannte Leitung als die Rolle, damit der Fahrdrabt 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 Berechnungen wird angenommen, daß die Stützpunkte des Fahrdrabtes — die Drahtalter — im Raum unverrückbar festliegen, obzwar dieser Zustand weder erwünscht noch zulässig ist und der Praxis auch nicht entspricht. Die Untersuchungen bezüglich des Durchhanges 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, wodurch 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. (Durchhangsberechnung.)

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

Leitungen gilt. Nachdem weiter das Bahngestänge vielfach auch Speise- und Verstärkungsleitungen zu tragen hat, ist eine allgemeine Behandlung des Durchhangproblems am Platze. Die Besonderheiten 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 Vorschriften 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 Nomographie 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 Behandlung abgeleitet werden.

Grundgleichungen. Eingewichtsloses, 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. 20 wird im Zustand des Gleichgewichtes

$$H_1 = H_2$$

und

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

Die wagerechten Kräfte sind in jedem Punkte gleich groß und entgegengesetzt; wäre dies nicht der Fall, könnte kein Gleichgewichtszustand eintreten und müßte eine Ver-

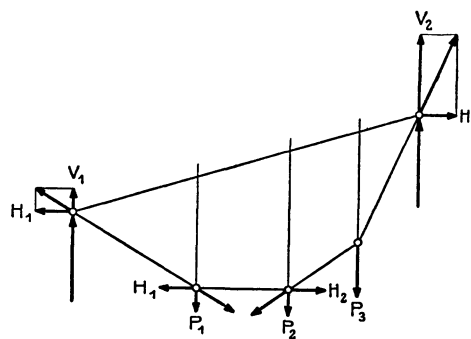


Abb. 20. Kräfteplan für einen zwischen zwei Stützpunkten gespannten, mit drei Gewichten belasteten gewichtslosen Faden.

formung erfolgen, bis der Zustand

$$H_1 = H_2$$

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

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

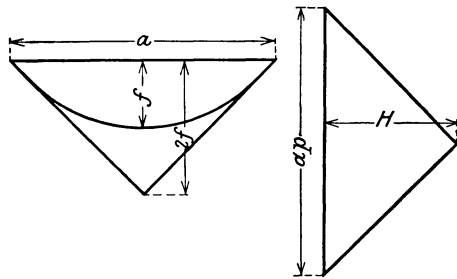


Abb. 21. Kräfteplan der Parabel der zwischen zwei Stützpunkten frei gespannten Leitung mit p kg/m Eigengewicht.

Durch gleichmäßige Lastverteilung längs des gespannten Seiles wird das Seilpolygon zur Kettenlinie (Abb.21). Die Belastung sei p kg/m, gleichgültig, ob sie durch das stoffliche Eigengewicht der gespannten Leitung oder durch eine zusätzliche Belastung verursacht wird. In den praktisch in Betracht kommenden Fällen ist die Annahme zulässig, daß die Belastung längs der Bogenlänge gleichmäßig verteilt ist.

Nachdem mit der Gleichung der Kettenlinie

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

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 bezeichnet.

Diese Annäherung bringt die physikalische Hypothese zum Ausdruck, daß das Gewicht des Seiles je Längeneinheit der Horizontalprojektion den unveränderlichen Wert p aufweist, eine Annahme, die für die meisten praktisch vorkommenden Fälle zulässig ist und das Rechnungsergebnis unwesentlich beeinflusst.

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 die kennzeichnende Größe, der Durchhang, aus den bekannten Parabeleigenschaften unter Verwertung der der Abb. 21 zu entnehmenden geometrischen Beziehungen ableiten.

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

Hier bezeichnet 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,

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

wo q den Leiterquerschnitt in mm^2 und σ die Drahtspannung kg je mm^2 bezeichnet, ist

für die Parabel

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

oder

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

Diese Beziehung gilt unter den gemachten Voraussetzungen nur für wagerechte Spannweiten. Für den Fall, daß die Verbindungslinie der Stützpunkte gegen die Wage-rechte um den Winkel ω geneigt ist, ist die Seilspannung am Stützpunkt in eine Senkrechte (V) und eine in die Richtung der Sehne fallende Teilkraft (R) zu zerlegen; dann wird

$$H = R \cos \omega.$$

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

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

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 (Abb. 20) der Stützpunkte erbringen. Es gilt

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

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

daher

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

Nachdem die Bogenlänge L der halben Spannweite 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 und gleich dem Gewicht eines vom betrachteten Punkt bis zur Leitlinie frei herabhängenden Seiles mit dem Metergewicht $p \text{ kg}$. Für den Scheitel gilt $H = p c$, da dieser sich in der Höhe c von der Abszisse des Bezugssystems befindet.

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

$$\sigma = \frac{\gamma}{1000} y, \text{ da } S = q\sigma \text{ und } p = \frac{q\gamma}{1000};$$

weiter ist

$$y = c + \eta,$$

und für den Stützpunkt

$$y = c + f,$$

daher ist die Beanspruchung am Stützpunkt

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

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

wo f in m einzusetzen ist.

Es sei $\sigma = 12 \text{ kg}$; $\gamma = 35,3$ (für 16 mm² 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 wagerechten Teilkraft des Seilzuges entsprechenden Spannung zu rechnen.

Für die mathematische 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 ist $f = a\varphi$ und

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

Für die Bogenlänge l (m) der Parabel mit wagerechter Spannweite gilt

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

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

und unter Einführung des Symbols φ

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

Für Spannweiten mit Stützpunkten in verschiedener Höhenlage mit der Sehnenslänge b und wagerechtem Abstand a wird die Bogenlänge nach Resal:

$$l = b + \frac{8}{3} \frac{f^2 a^2}{b^3},$$

indem für die senkrecht auf die Sehne gemessene Pfeilhöhe des Parabelbogens angenähert gilt

$$F = f \cos \omega \quad \text{und} \quad \cos \omega = \frac{a}{b},$$

hieraus

$$l = b + \frac{8}{3} \frac{F^2}{b} \dots \dots \dots (3b)$$

Für den Sonderfall wagerechter Spannweiten $a = b$ und $f = F$ geht Gleichung (3b) in die Gleichung (3) über.

Die Belastung der Leitung. 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.

Der Winddruck kg/m^2 und die vom Wind getroffene Fläche ist ebenfalls auf 1000 m Länge zu beziehen und wird wagerecht gerichtet angenommen; die resultierende Gesamtbelastung je Längeneinheit ergibt sich durch geometrische Addition mit der senkrechten Gewichtsbelastung.

Die für die Leitungsberechnung derzeit in Deutschland und Österreich vorgeschriebenen Annahmen berücksichtigen den auf die Leitung selbst wirkenden Winddruck nicht, wogegen die Bauvorschriften anderer Länder die Berücksichtigung auch dieser Belastung verlangen. In besonderen Fällen kann es notwendig werden, sich über die Bedeutung der Windbeanspruchung Rechenschaft zu geben.

Es sei $p_w \text{ kg/m}^2$ der der hypothetischen Windgeschwindigkeit entsprechende Winddruck auf eine ebene Fläche. Es muß, um das Problem einheitlich behandeln zu können, auch diese Belastung auf den km Leitungslänge und je qmm Leitungsquerschnitt bezogen werden. Die dem Winde dargebotene Fläche einer Leitung von l km Länge und d mm Durchmesser ist

$$F^{m^2} = 1000 l \frac{d}{1000} = ld; \quad \text{da} \quad d = 2 \sqrt{\frac{q}{\pi}}$$

und für kreisrunde Leitungsquerschnitte mit einem Reduktionsfaktor ϱ (Österreich $\varrho = 0,5$, Frankreich $\varrho = 0,6$) gerechnet, wird

$$\gamma^w = \frac{2 p_w \varrho}{\sqrt{\pi q}}$$

Die Gewichtsbelastung γ wirkt senkrecht, der hier errechnete Winddruck jedoch wagerecht, der Berechnung ist die durch geometrische Addition gefundene Mittelkraft

$$\gamma_R = \sqrt{\gamma_w^2 + \gamma^2}$$

zugrunde zu legen.

Für die Berücksichtigung der durch Vereisung durch Rauheis oder Schneelast verursachten Belastung der Leitungen bestehen in verschiedenen Ländern voneinander wesentlich abweichende Vorschriften, durch die man bestrebt ist, den durch die jeweils herrschenden klimatischen Verhältnisse verursachten Beanspruchungen Rechnung zu tragen. Das Wesentliche dieser Vorschriften sei nachstehend zusammenfassend angedeutet.

Deutschland und Österreich: Zusatzlast $180 \sqrt{d}$ g/m (d Durchmesser in mm), dementsprechend

$$\gamma_{\text{eis}} = 180 \frac{\sqrt{d}}{q} \text{ kg/km/mm}^2.$$

Schweiz: Schneezylinder 80 mm Durchmesser. Spez. Gewicht hierfür 0,16 kg/dm³, somit

$$\gamma_{\text{eis}} = \gamma + \frac{(80^2 - d^2) \frac{0,16 \pi}{4}}{q}$$

Frankreich: Eine Eislast, die das Gewicht der Leitung verdoppelt oder den Durchmesser verdreifacht und Winddruck von 10 kg/qm getroffener ebener Fläche des Leiters, oder Eislast gleich der Hälfte des Eigengewichtes und ein Winddruck von 30 kg/qm ebene Fläche. Reduktionsfaktor für den Kreisquerschnitt 0,6.

Amerika: Eiszyylinder von 12,7 mm Stärke um den Leiter. Spez. Gew. 0,925 kg/dm³, somit

$$\gamma_{\text{eis}} = \gamma + \frac{0,925 [(d + 12,7)^2 - d^2] \pi}{4q}$$

außerdem ein Winddruck von 40,3 kg/qm auf den Längsschnitt der Leitung:

$$\gamma_W = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \rho \cdot 40,3 \cdot \sqrt{q}$$

Diese Beziehungen und Festwerte 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 $180 \sqrt{d}$ g/m (ebenso in Deutschland) gegeben ist, bei -5°C nicht stärker beansprucht werde.

Da 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 durch Vermehrung der Last oder der Zugspannung die Beanspruchung je mm² 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

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

wo l die Drahtlänge in m,

α die lineare Ausdehnungszahl der Wärme,

E den Elastizitätsmodul kg/cm² bezeichnet.

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

$$a \simeq l$$

eingeführt werden, wodurch die Gleichung in die Form

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

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

$$\frac{16}{3} \cdot 10^{-4} a \varphi d\varphi = \alpha a dt + \frac{100 a^2}{80 E} d \frac{\gamma}{\varphi}$$

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 bzw. γ_0 bis γ , so wird

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

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

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

Da

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

so gilt auch für unveränderliches γ :

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

Für die gebräuchlichen Baustoffe kommen nachstehende Festwerte in Betracht:

Tabelle I.

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	—

Setzt man die obigen Festwerte in die Gleichung 5a ein, so 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 „

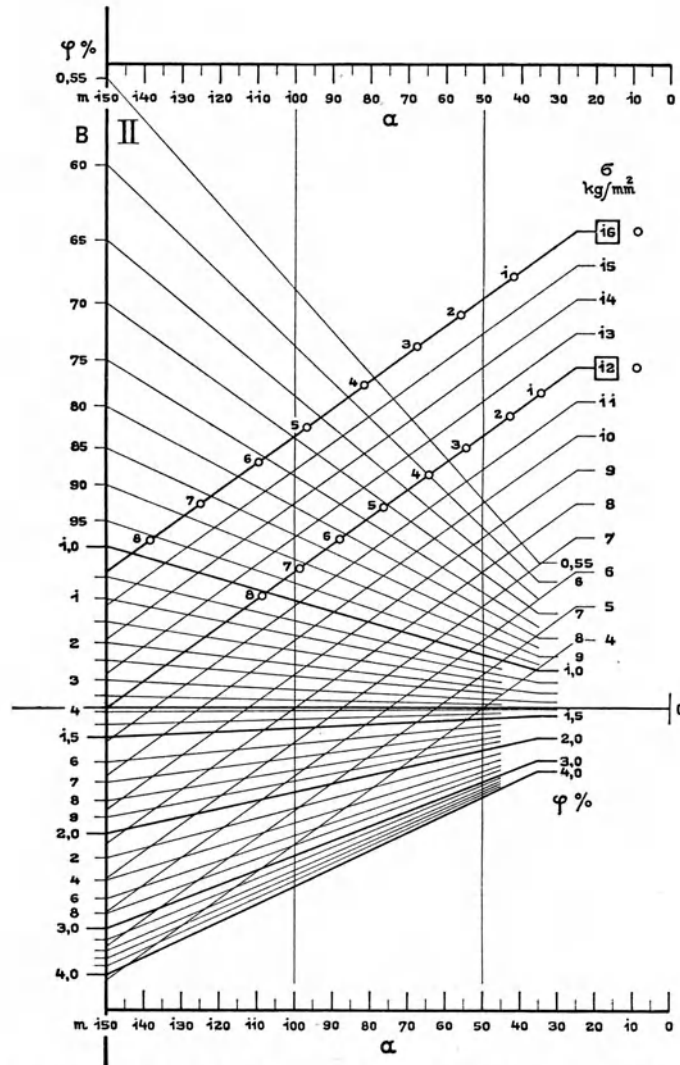
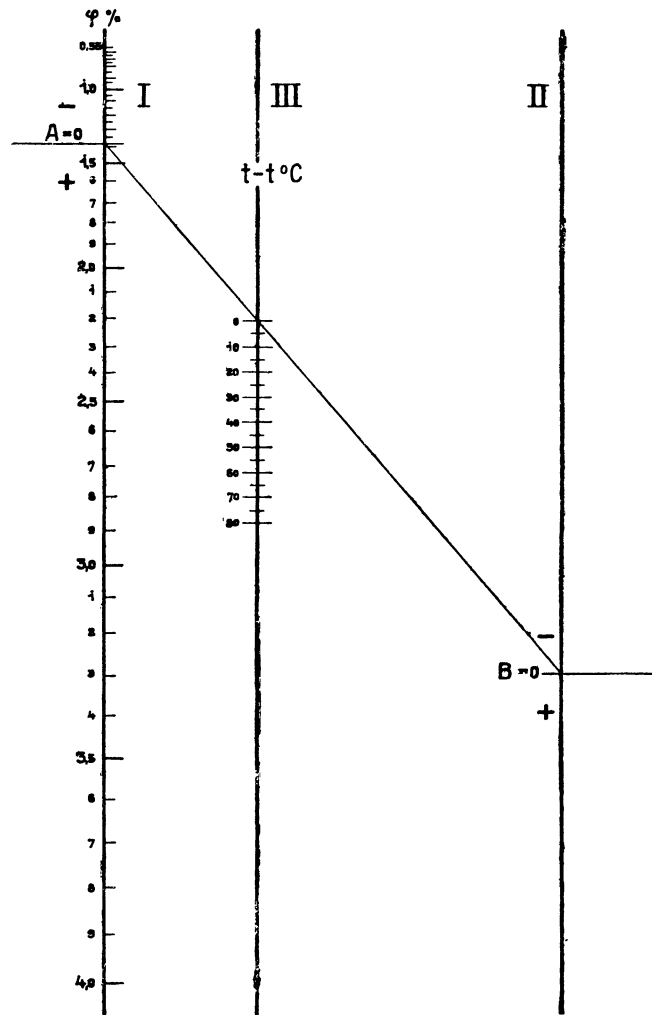


Abb. 22. Fluchtlinien-Rechentafel für die allgemeine Zustandsgleichung einer zwischen zwei Stützpunkten frei gespannten Leitung. Baustoff: Kupferdraht und -seil.

Ausgehend von einem durch die Temperatur t_0 , den Durchhang φ_0 und die Beanspruchung σ_0 bestimmten Anfangszustand kann man mit Hilfe der Gleichungen 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.



Deckblatt zur Rechentafel Abb. 22.

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 vorgesehenen 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

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

bei einem gegebenen Baustoff bzw. Drahtlast nur von φ^2 , und

$$B = \frac{1,25 a \gamma}{E \alpha} \left(\frac{1}{\varphi_0} - \frac{1}{\varphi} \right) \dots \dots \dots (7)$$

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

Es gilt auch

$$B = \frac{100}{E \alpha} (\sigma_0 - \sigma), \dots \dots \dots (7a)$$

gleichfalls eine lineare Beziehung.

Die Teilfunktionen

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

sind einfach zu entwickeln. Die Aufgabe wird mit Hilfe einer aus drei parallelen Achsen, demnach nur aus geraden Linien bestehenden Fluchtlinientafel, Abb. 22 (Deckblatt) lösbar, wenn man sich in dieser vorläufig mit der Darstellung der 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 an Spannweite (a) mit dem Argument (φ) kotiert, jedoch entsprechend der Funktion $B = f\left(\frac{1}{\varphi}\right)$ oder für die lineare Beziehung (7a) nach σ gleichmäßig 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 den dem jeweiligen Temperaturzustand entsprechenden Durchgangswert ab.

Da die B -Funktion von der Spannweite linear abhängt, entspricht jeder Spannweite eine andere Skala. Die Teilungen der Skalen können durch ein aus dem Nullpunkt $a=0$ ausgehendes Strahlenbündel in einem rechtwinkligen Koordinatensystem erzeugt werden, indem für gegebene φ -Werte, also $\varphi = \text{konst.}$, die Werte $B = \frac{1,25 \gamma}{E \alpha} \cdot \left(\frac{1}{\varphi_0} - \frac{1}{\varphi} \right) a = \text{konst.}$ durch Gerade dargestellt werden, die sämtlich den Nullpunkt dieses rechtwinkligen Bezugssystems $B = f(a)$ schneiden.

Um die zusammengehörigen Werte φ 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 gelegt werden.

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

Für $\sigma = \text{konst.}$ folgt aus den Gleichungen 2a und 7, daß

$$B \frac{E\alpha}{1,25\gamma} = \frac{a}{\varphi_0} - \frac{80\sigma}{\gamma},$$

d. h. $B = f(a)$ ist ebenfalls die Gleichung einer Schar von parallelen Geraden, deren Ordinatenabschnitt je nach dem gewählten Wert von σ variieren.

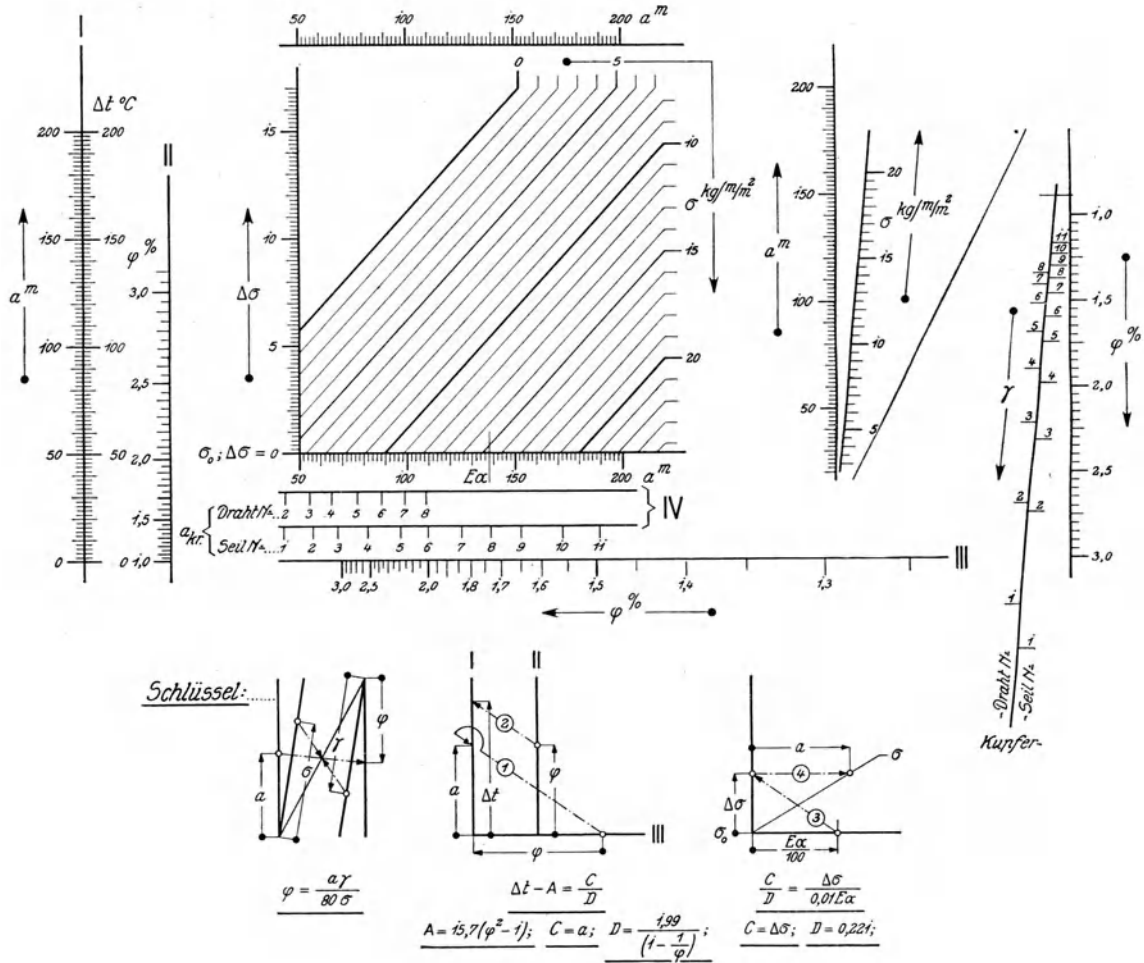


Abb. 23. Fluchtlinien-Rechentafel für die allgemeine Zustandsgleichung einer zwischen zwei Stützpunkten frei gespannten Leitung. Baustoff: Kupferdraht und -seil.

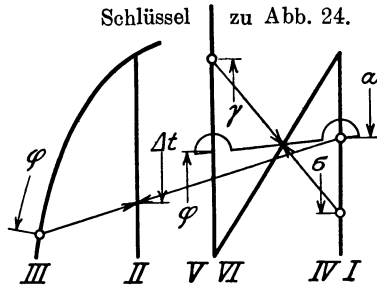
Aus der obigen Gleichung der Geradenschar folgt, daß

$$\text{tg } \delta = \frac{1,25\gamma}{E\alpha\varphi_0},$$

somit ist der Neigungswinkel δ zur Abszisse unabhängig von der Beanspruchung, dagegen — unter Annahme eines gegebenen φ_0 -Wertes — durch die physikalischen Eigenschaften des Baustoffes (γ, E, α) der freigespannten Leitung bestimmt.

*) E.T.Z. 1907, S. 901.
 **) E.T.Z. 1914, S. 1109.

Durch Verlegung der Mittelskala des Nomogrammes Abb. 21, kann das kollineare System so ausgelegt werden, daß die φ -Skala auch für einen anderen oder mehrere andere Baustoffe richtig bleibt; in diesem Fall behält die Strahlenskala auch ihre Gültig-



keit bei, ebenso die für gegebene σ -Werte gezogenen parallelen Geraden die unveränderte Neigung.

Diese Klarstellung der Zusammenhänge ist für Fälle wertvoll, wo mit besonderen Zusatzlasten (Winddruck, Kettenfahrleitung) oder abnormalen Belastungen gerechnet werden muß.

Will man die Zerlegung der Rechentafel in zwei Behelfe vermeiden, so kann man zur Lösung der allgemeinen Zustandsgleichung 5 noch andere Achsensysteme heranziehen. Abb. 23 stellt eine Verhältnistafel und Abb. 24 Fluchtlinientafeln 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 der Fall, so könnte dem nomographischen Rechenverfahren keine Überlegenheit gegenüber anderen Methoden zuerkannt werden.

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

Ebenso kann es vorkommen, daß man den Winddruck als Zusatzlast berücksichtigen muß.

Die Grundgleichung 5 berücksichtigt

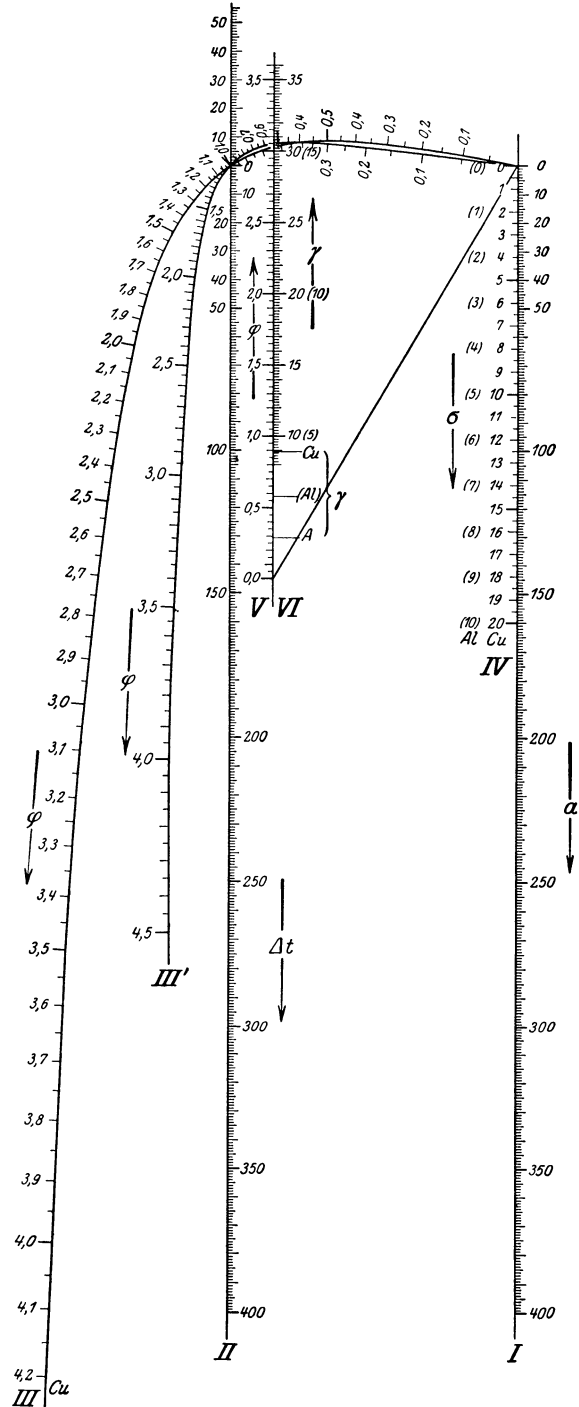


Abb. 24. Fluchtlinienrechentafel für die allgemeine Zustandsgleichung einer freigespannten Leitung. Baustoffe: Kupfer (III), Aluminium (III').

auch den Fall der Veränderung der Drahtlast und die hierdurch bewirkte Änderung der Beanspruchung.

Für die Drahtspannung σ gilt:

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

Der Zusammenhang zwischen zwei durch verschiedene Drahtbelastungen verursachten Drahtspannungen, bzw. bei gleichen Drahtspannungen zwischen den 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 wenn

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

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

Da

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

wird in diesem Fall das zweite Glied der Grundgleichung 5

$$B = 0$$

und daher

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

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

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

und

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

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 ebensowenig überschritten wird wie bei -25°C ohne Eislast. In diesem Falle ist

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

und die kritische Spannweite

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

γ_e ist im Sinne der Formel (Zusatzlast $180 \sqrt{a} \text{ g/m}$) 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, hierfür die „kritischen Spannweiten“ vorweg auszurechnen. Vermerkt man diese in irgendeiner zweckmäßigen Weise in den Rechen- tafeln oder faßt man diese Angaben in einer Tabelle übersichtlich zusammen, so erhält man sofort Aufschluß darüber, welche Belastungsart in einem bestimmten Fall zur ungünstigeren Beanspruchung führt. Ist die anzuwendende Spannweite größer als die „kritische“, so 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 Zusammenhanges der Durchhänge bei Eigenbelastung und Zusatzbelastung dient die äquivalente Temperatur. Hierunter ist diejenige Temperatur zu verstehen, bei welcher die Leitung ohne Zusatzlast ebenso durchhängt, wie mit Zusatzlast bei der vorgeschriebenen 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 Fahrdraht wagrecht 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

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

oder

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

und daher

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

Für den in den Sicherheitsvorschriften vorgesehenen Fall ist

$$t_z = -5^0 \quad \text{und} \quad t_0 = t_{kr},$$

die kritische Temperatur. Für diese gilt daher:

$$t_{kr} = \frac{1,25 a}{E \alpha \varphi} (\gamma_z - \gamma_0) - 5^0 \dots \dots \dots (8b)$$

oder

$$t_{kr} = \frac{100 \sigma_{max}}{E \alpha} \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_z}\right) - 5^0.$$

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 bei unbelastetem Seil dem gleichen 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“, sofern die Beanspruchungen gegeben sind, ein für allemal fest, da die Temperatur der Eislast im Sinne der Sicherheitsvorschriften mit -5^0 C festgesetzt ist. Man kann daher die für die wenigen marktgängigen Querschnitte in Betracht kommenden kritischen Temperaturen den Rechentafeln fallweise beifügen.

Der Zahlenwert der kritischen Temperatur ist insofern von praktischem Interesse, als für die Höhenlage der Leitung der überhaupt auftretende größte Durchhang maßgebend ist. Ist $t_{kr} \leq 40^0$ C, die hypothetisch höchste Temperatur, so ist auf Grund des Durchhanges bei dieser Temperatur die Höhenlage der Stützpunkte zu bestimmen.

Wird $t_{kr} \geq 40^0$, so ist der Zustand mit Eislast für die Auslegung der Höhe der Stützpunkte bestimmend und es erübrigt sich die Durchhangberechnung für $t = 40^0$ C.

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

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

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

Zahlenbeispiele. 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 daher 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? Benützt man die krummlinige Rechentafel Abb. 24, 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 (kотиert mit 80°), 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 der belastete.

Von diesem Punkt (Skala II) $31,1 - 10 = 21,1^{\circ}\text{C}$ Teilstriche abtragend, findet man denjenigen Punkt (58,9) 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

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

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

Es sei z. B. mit Hilfe der Verhältnistafel Abb. 22 folgender Belastungsfall zu untersuchen: $a = 150$, Kupferdraht Nr. 4 ($q = 50\text{ mm}^2$), $\gamma_{Zts} = 19,0$, $\sigma_{max} = 12$.

Aus dem Doppel-Produkt-Nomogramm entnimmt man $\varphi = 2,95$. Durch Übertragung dieses Wertes in die Verhältnistafel gibt der Weiser 2 den Temperaturwert $168,5^{\circ}$ an, dem die kritische Temperatur laut Tabelle II $+23,9^{\circ}\text{C}$ zuzuordnen ist. Sollen die Kennwerte z. B. für $+10^{\circ}$ festgestellt werden, so ist in der Skala vom Temperaturwert $168,5 - 23,9 + 10,0 = 154,6$ auszugehen. Der vom Punkt $E\alpha$ in der Strahlenskala gezogene parallele Index gibt die Beanspruchung an, die der Draht bei der gleichen Temperatur ohne Eislast erfahren würde ($\sigma = 6,35$). Für jede andere Temperatur findet sich die zu wählende Zugspannung und der zugeordnete Durchhang durch Ziehen der beiden parallelen Weiser 1, 2 zu den den gleichen Durchhangswerten auf den Skalen II und III.

Aus Vorstehendem ist zu entnehmen, daß diese Rechentafel auch ohne das Produktnomogramm für die Beziehung $\varphi = \frac{a\gamma}{80\sigma}$ verwendbar ist, da man nach dieser Gleichung aus der für den betreffenden Fall geltenden Höchstbeanspruchung die der unbelasteten Leitung entsprechende Beanspruchung $\frac{\gamma_{Zts}}{\sigma_{max}} = \frac{\gamma}{\sigma}$ berechnen und, von diesem σ in der Netztafel ausgehend, die Neigung des Suchstrahles in der Verhältnistafel zur Bestimmung von φ entnehmen kann. Die Produkttafel soll das Verfahren mit den geltenden Zusatzlasten vereinfachen.

Tabelle II.

Querschnitt Nr.	Querschnitt mm^2	Durchmesser mm Draht Seil		Kupfer $\gamma = 8,9$						Aluminium $\gamma = 2,9$, $\sigma = 7\text{ kg/mm}^2$		
				Draht: $\sigma = 12\text{ kg/mm}^2$			Seil: $\sigma = 16\text{ kg/mm}^2$			γ_e	a_{kr}	t_{kr}
				γ_e	a_{kr}	t_{kr}	γ_e	a_{kr}	t_{kr}	γ_e	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	20,8	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	—	—	—	12,9	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, da diese aus 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. 25).

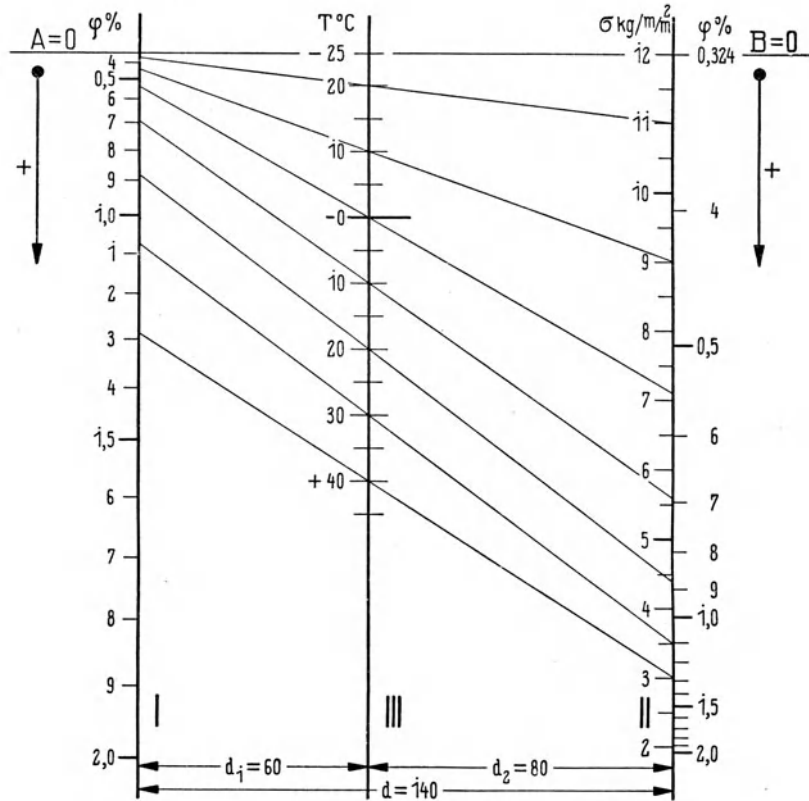


Abb. 25. Rechentafel für Bestimmung der Montagezüge im Fahrdrabt einer selbsttragenden Fahrleitung.

Temperatur ° C	Zugspannung σ kg/mm ²	Drahtzug kg mm ²				Temperatur ° C	Zugspannung σ 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: $a_{max} = 35$ m, $\sigma_{max} = 12$ kg/mm², $\varphi = 0,324$ ‰ bei T = - 25 ° C
 $\gamma = 8,9$ kg/km/mm², $\alpha = 17 \times 10^{-6}$, $E = 1,3 \times 10^6$.

Mit Hilfe der Rechentafel (Abb. 25) lassen sich noch andere, sonst nur durch umständliche Rechnungen lösbare 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 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 ° C der Durchhang der Kette, und damit die Absenkung des Tragwerkes, das zulässige Maß überschreite.

Mit Hilfe der Rechentafel (Abb. 26) seien für eine Fahrleitung, bestehend aus einem 38,5 mm² Stahlseil und 100 mm² Kupferfahrdrabt, $\gamma_k = 34,3$, $\gamma_e = 64,6$ kg/km/mm², (öst. Formel) und $a = 75$ m die Montage Spannungen und Beanspruchungen zu ermitteln.

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

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

über.

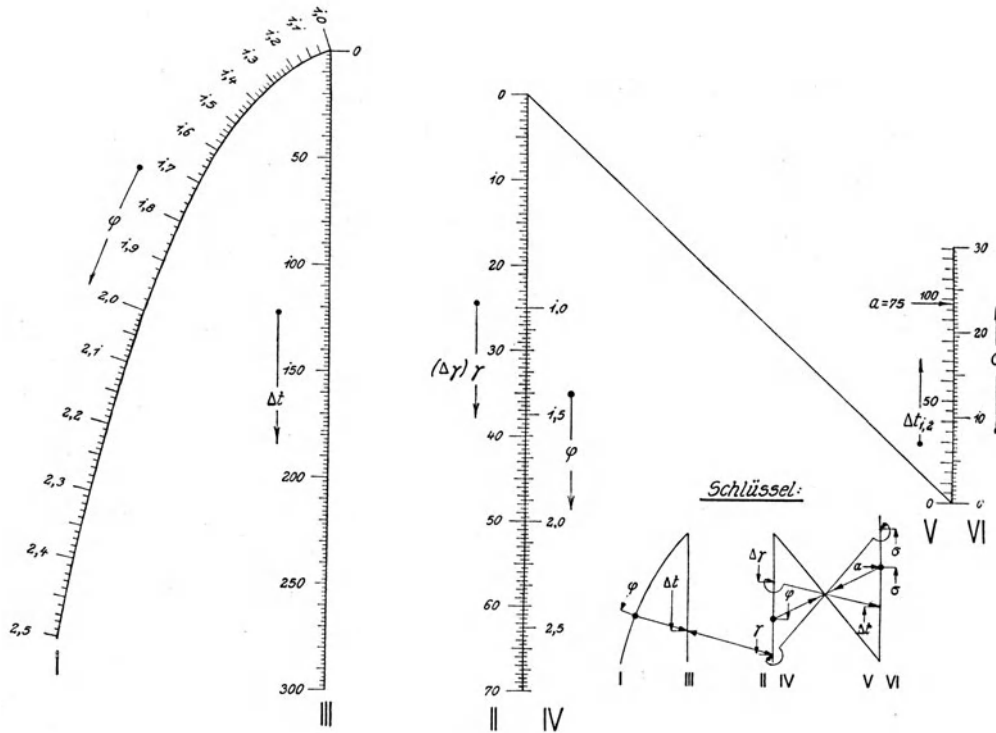


Abb. 26. Krummlinige Fluchtlinien — Rechentafel für die allgemeine Zustandsgleichung einer Kettenfahrleitung.

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

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

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:

Fahrdraht: $q = 100$ und 65 mm^2 , Kupfer.

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

Die äquivalente Temperatur wird

$$\Delta t_{1,2} = \frac{3,87}{\varphi} \Delta\gamma,$$

wo $\Delta t_{1,2} = t_2 - t_1$ 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, so hat man im Produkt-Nomogramm (Abb. 26) die Indizes

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

und

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

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 $t_2 = \Delta t_{12} + t_1 = +54,5_0 \text{ C}$ zuzuordnen, wodurch für jede beliebige Temperatur der Durchhang und die zugehörige Beanspruchung gefunden werden kann. Z. B. wird bei $t = 0^0 \text{ C}$ das leere Seil ($\gamma = 9,1$) mit $\varphi = 1,59\%$ Durchhang aufzulegen und dementsprechend mit $= 4,25 \text{ kg/mm}^2$, insgesamt also mit $4,25 \times 38,5 = 153 \text{ kg}$, zu spannen sein.

Frage: Welchen Durchhang wird das Tragseil bei Eislast $\gamma_e = 64,6$ und -5^0 C Temperatur aufweisen?

In diesem Fall ist $\Delta\gamma = -30,3$ und $\Delta t = -54,7^0$, daher $t_2 = -44,7^0 \text{ C}$. Dem Schnittpunkt des Index $\varphi = 2,14 \text{ (I)} - \gamma_e = 64,6 \text{ (II)}$ mit Skala III ist der Wert $t = -44,7$ zuzuordnen, woraus man für $t_2 = -5$ durch Ziehen der Suchlinie von Punkt $\gamma_e = 64,6 \text{ (II)}$ 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 $1,8 \text{ m}$, die zugelassene Absenkung von 200 mm würde somit nicht überschritten.

Schiefe Spannfelder (Abb. 27). Die bisherigen Betrachtungen setzten wagerechte 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, worin f_1 den Durchhang, bezogen auf den höheren Stützpunkt, und

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

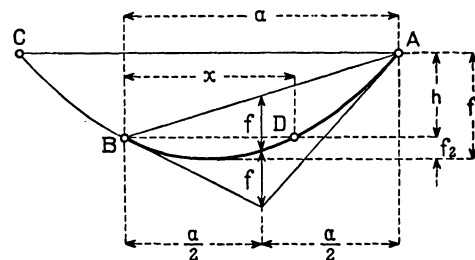


Abb. 27. Spannfeld mit Stützpunkten in verschiedener Höhe.

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

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. 27).

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

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

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

Liegt der Scheitel innerhalb der Spannweite a , so ist

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

liegt er hingegen außerhalb a , so wird

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

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; daraus folgt:

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

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

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

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

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

Nachdem die Scheitel- und die Höchstbeanspruchung sowie der Zusammenhang beider ermittelt wurden, 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 wagrechte 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 wagrechte Spannweite. Wenn man die Spannungswerte längs dieser in einer Kurve aufträgt, so wird die Höhe des Rechteckes mit gleicher Basis a und gleicher Fläche den gesuchten Wert geben. Es sei in einem beliebigen Punkt die Beanspruchung

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

wobei

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

daraus folgt, daß

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

Das dritte Glied kann vernachlässigt werden; daraus folgt 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

$$a = x_1 - x_2$$

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

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

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

Für wagrechte Spannungsfelder wird

$$h = 0,$$

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

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

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

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

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

Diese Werte für l und l_0 in die Grundgleichung eingesetzt, ergibt:

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

hierin bedeutet:

- a die horizontal gemessene Spannweite in m,
- b die schief gemessene Spannweite in m,
- φ den relativen Durchhang in ‰.

Die Formel stimmt in dieser Gestalt mit derjenigen für wagrechte Spannungsfelder überein. Sie geht in diese für

$$a = b$$

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

Messung des Durchhanges. Die Feststellung des Durchhanges im Wege der Messung ist unter allen Umständen schwierig bzw. 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:

$$T = \pi \sqrt{\frac{J}{Mge}},$$

wobei T die Dauer einer einfachen Schwingung in sek,
 M die Masse des Pendels in kgsek^2/cm ,
 J das Trägheitsmoment in $\text{cm}^2/\text{kg}/\text{sek}^2$,
 e den Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse in cm und
 g die Erdbeschleunigung cm/sek^2 bezeichnet.

Für die Parabel ist

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

hiermit wird die Zahl der einfachen Schwingungen

$$n_{\text{sek}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Mg \frac{2}{3}f}{\frac{8}{15}Mf^2}},$$

die Zahl der Schwingungen je min

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

und der Durchgang 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 mitspricht. Es ist ohne weiteres zu erkennen, daß verhältnismäßig große Durchhänge geringe Zugkräfte bedeuten, daher leichtes Seil und in den Kurven Maste mit geringem Widerstandsmoment verlangen, die dem Durchhang entsprechend große Länge erhalten müssen. Was jedoch in einer Beziehung an Gewicht erspart wird, muß andererseits wieder zugesetzt werden. Unter einfachen Verhältnissen läßt sich der Zusammenhang überblicken.

Berücksichtigt man als maßgebende Beanspruchung nur den Kurvenzug (N) allein, so verursacht dieser ein Biegemoment.

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

wenn h die Fahrdrathöhe in m und

f den Durchhang m bezeichnet,

$h + f$ somit den Hebelarm des Kurvenzuges (N) darstellt. Für N gilt

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

wobei S die Spannung im Seil ist.!

Für diese 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 Verminderung des Durchhanges unter einem gewissen Wert das Drehmoment sehr rasch anwächst; unterhalb dieses Wertes wird dagegen nichts mehr gewonnen. Der kritische Punkt ist durch die mit einem Winkel von 45° geneigte Tangente bestimmt. Es ist demnach zweckmäßig, den Wert des Durchhanges in dieser Höhe zu wählen.

Die Kurve (Abb. 28) bezieht sich auf das auf S. 86 durchgerechnete Beispiel einer Kettenfahrlleitung 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, so läßt sich auch 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

$$W = q C \quad \text{und} \quad M = \frac{1}{4} W \sigma,$$

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 Fahrdrahthöhe ist. 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, so wäre das Ergebnis ein wesentlich anderes. Für die Wahl eines mäßigen Durchhanges sprechen auch Rücksichten der bequemen Instandhaltung und der Baukosten. Sind die Stützpunkte der Isolatoren wesentlich über Manneshöhe über dem Fahrdraht angebracht, so

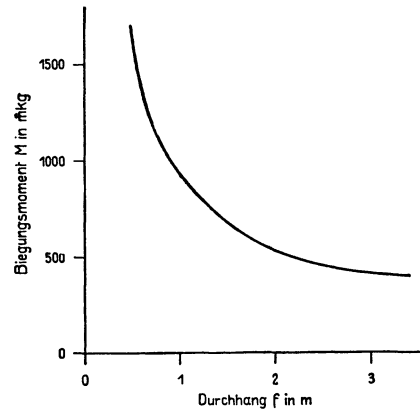


Abb. 28. Biegemoment eines Kurvenmastes in Abhängigkeit vom Durchhang des Tragseiles.

wird es umständlich, das Tragseil und die Stützpunkte zu erreichen. Man geht daher in der Bemessung des Durchhanges, zuzüglich des zwischen dem Fahrdrat 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 aber 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, Schiefstellung 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 Kennwerte entsprechend der in allen Feldern gleicher Spannweite gleichmäßig vorhandenen Vereisung.

Entledigt sich die über reibungslose Rollen geführt 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.

Da 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

$$L_2 = ml_1 + (n - m)l_2,$$

wobei

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

und

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

daher

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

während die gesamte Seillänge bei gleichmäßiger Vereisung aller Felder

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

ist.

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

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

sein.

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

$$L_1 - L_2 = \left(1 - \frac{\varphi_e}{\varphi \zeta} \right) 100 \frac{na \sigma_e}{E},$$

somit

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

Nach einigen Umformungen erhält diese Gleichung die Form

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

Setzt man

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

und

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

so 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, in dem bis auf ein Spannfeld alle übrigen eisfrei sind. Die Leitung bestehe aus Aluminium, Querschnitt 45 mm^2 .

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

Der Ausgleich benachbarter Felder ist demnach durchaus zweckmäßig, eine bedenkliche Vermehrung des Durchhanges 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 auszuliegen ist.

Ähnlich sind die Verhältnisse bei Kupferleitungen.

3. Der Lageplan der Fahrleitung für Rollenstromabnehmer.

Poschenrieder: Oberleitungen elektrischer Bahnen. München: Oldenbourg 1904.

Wahle: Kurvenabspannung des Fahrdrahtes bei elektrischen Straßenbahnen mit Rollenkontakt. ETZ 1904, H. 35.

Richey: Electric Railway Handbook. New York: The Graham Hill B.Co. 1915.

Der Lageplan der Fahrleitung für Rollenstromabnehmer muß, wie bereits angedeutet, unvermittelte Richtungsänderung vermeiden, soll ein Entgleisen der Rolle selbst

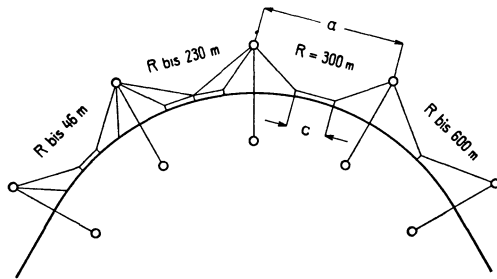


Abb. 29. Verspannung der Fahrleitung für Rollenstromabnehmer in Krümmungen.

bei mäßigen Geschwindigkeiten verhindert 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. 29 ist eine amerikanische Regelbauart dargestellt. Diese Ausführung des Spannerkes entspricht folgender Tabelle:

Halbmesser des Bogens m	Teilung Cm der Auszüge	Mastteilung am	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	
50	4,9	23,4	3
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 Fahrdraht als gegeben betrachteten Höchstspannung.

4. Der Lageplan der Fahrleitung für Bügel- oder Walzenstromabnehmer. Die Leitung ist über gerader Bahn entsprechend der nutzbaren Bügelbreite in Zickzacklinie zu verlegen, um eine gleichmäßige Abnutzung der Schleifstücke und 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 anzuordnen.

Für Krümmungen läßt sich die richtige Lage der Fahrleitung bei voller Ausnutzung der Schleifbreite aus der in Abb. 30 dargestellten Figur ohne weiteres ableiten.

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

$$a = \sqrt{8 R b}.$$

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

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

Für den Kurvenzug N gilt, wie dem in Abb. 30 dargestellten Kräfteplan zu entnehmen ist,

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

daraus folgt die gesuchte Mastteilung

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

Für die Bügelbreite ist kein Regelmaß eingeführt, sie richtet sich vielmehr nach den örtlichen Verhältnissen. Vielfach verlangen vorhandene Kunstbauten, Brücken, Tunnels, Tore und dergleichen schmälere Typen als vom Standpunkt des wirtschaftlichen Leitungsbauers 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 mit bis zu 2,0 m breiten Schleifstücken. Walzen sind aus konstruktiven Gründen wesentlich kürzer, insbesondere für Drehstromoberleitungen. Die zweipoligen 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. 30 und 31), in welchen die Beziehung

$$a = \sqrt{8 R b}$$

und die Gleichung für den Kurvenzug

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

zur Darstellung gelangen.

An Hand des Nomogrammes (Abb. 30) 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 Fahrdrachtspannung ein Kurvenzug $N = 400$ kg; da Hartgummi-Isolatoren äußerst

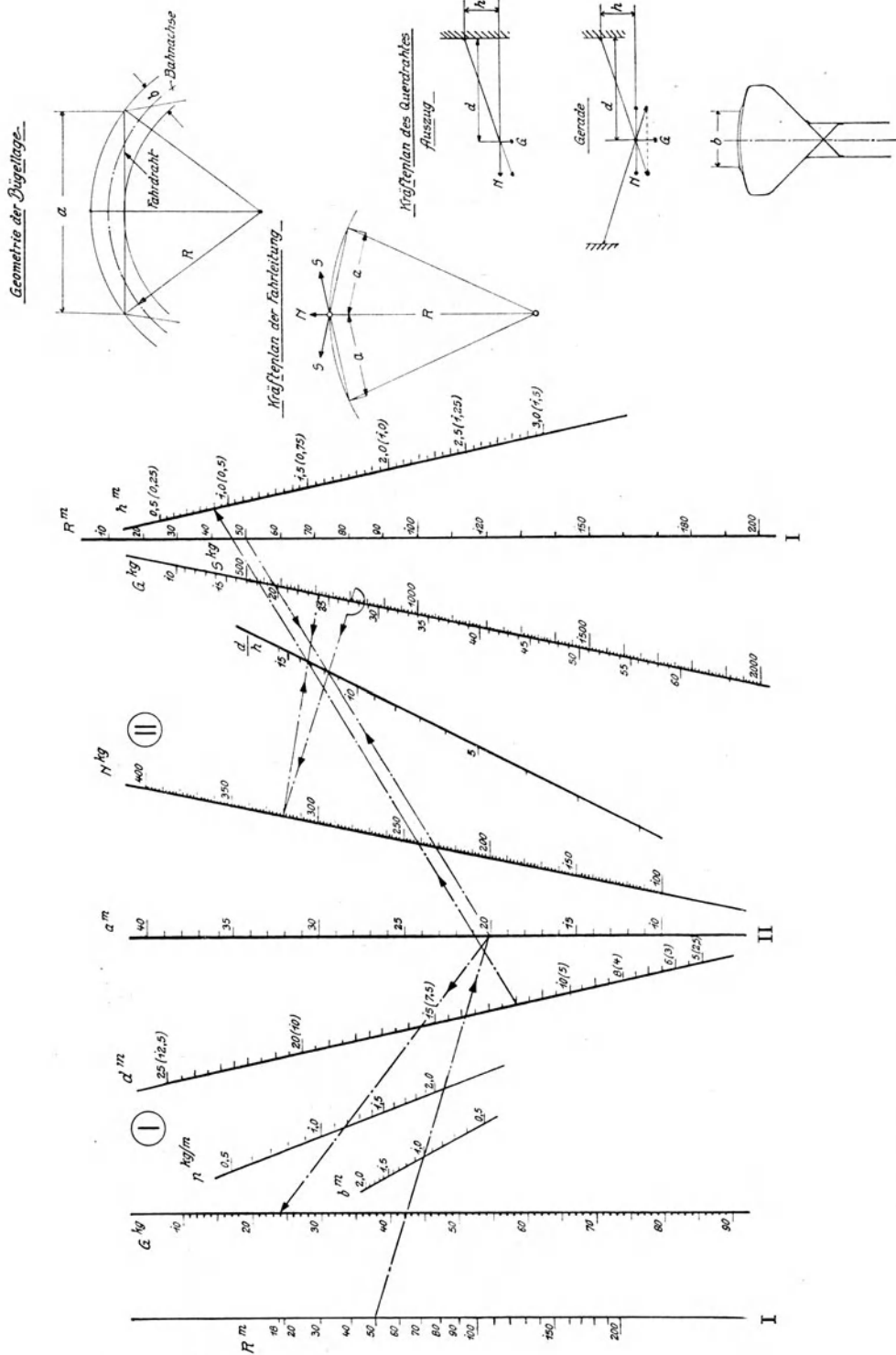


Abb. 30. Fluchtlinien-Rechentafel zur Bestimmung

a) der Austeilung der Stützpunkte im Bogen.

b) der Höhenlage der Befestigung der Queraufhängungen einer Straßenbahnfahrlängung.

Beispiel: $R = 50$, $b = 1,0$, $a \approx 20$, $p = 1,8$, $G = 24$, $\frac{h}{d} = 13,3$, $S = 800$, $N = 320$, $h = 0,9$, $d = 12$.

$N = 250$ 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, so braucht man im ersten Fall zwei Abzüge, gegebenenfalls zwei Maste, im zweiten Fall dagegen deren vier.

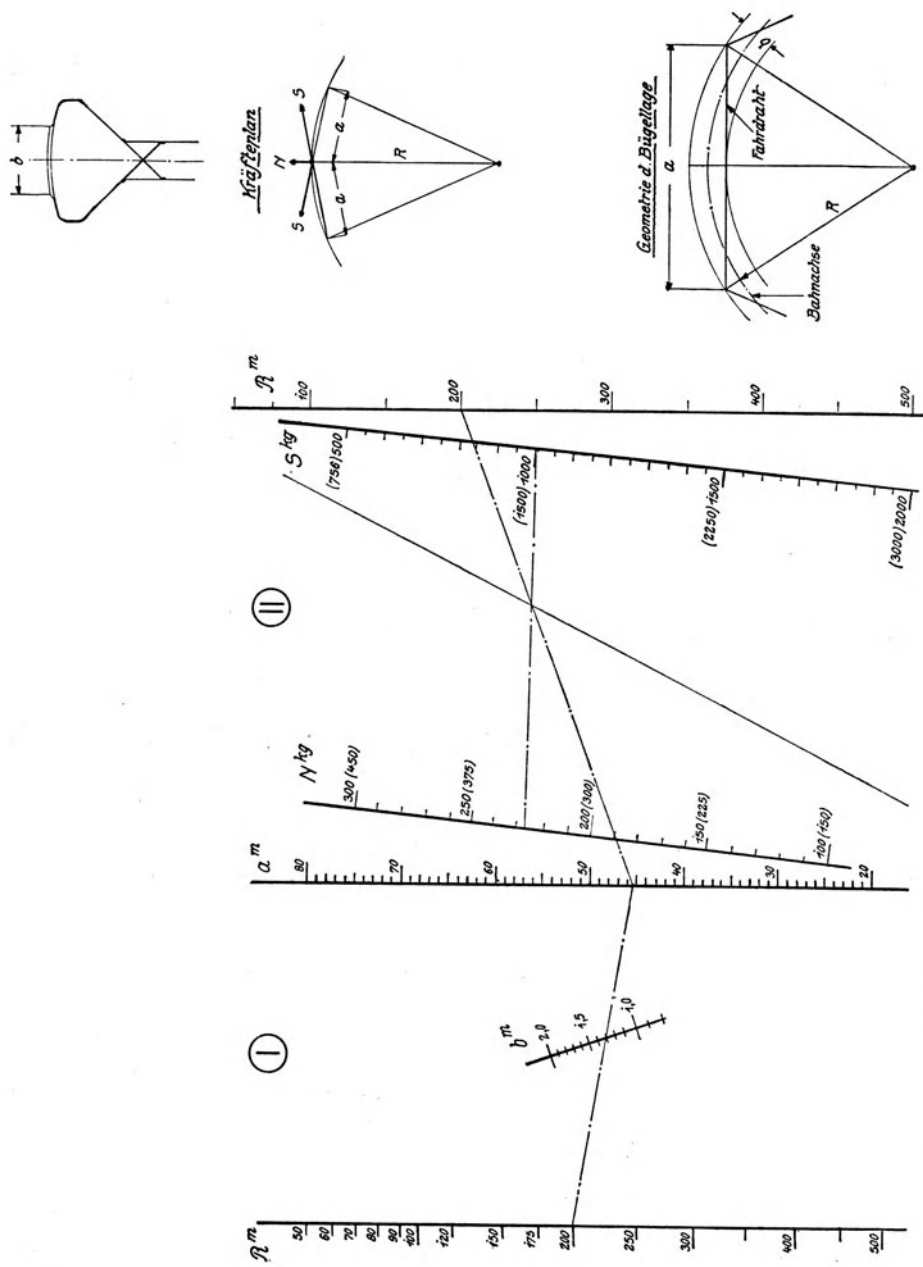


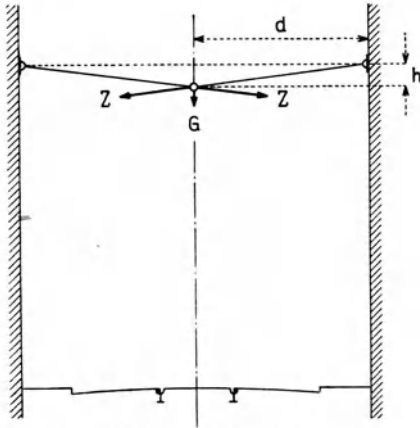
Abb. 31. Rechentafel zur Bestimmung
 a) der Mastteilung (a) aus der Bügelbreite (b),
 b) des Kurvenzuges (N) aus der Mastteilung (a) in Abhängigkeit vom Krümmungshalbmesser (R) und dem Drahtzug (S) für eine Vollbahnleitung.
 Beispiel: $R = 200$, $b = 1,3$, $S = 1000$, $a \approx 45$, $N = 228$.

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 an festen Stützpunkten — 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 Seilpolygons und zugehörigen Kraftecks der Kräfteplan Abb. 32.

Zur Begrenzung der Draht- und Mastbeanspruchung pflegt man den Querdrähten einen Durchhang von $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{15}$ zu geben.

Bei diesen geringen Durchhängen darf für die Zugkraftberechnung die schiefe Drahtlänge gleich der wagrechten Entfernung genommen werden. In diesem Falle (Abb. 32) ist



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

Der Wert des Drahtgewichtes G 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 $\frac{1}{10}$ Durchhang im ersten Fall $Z \approx 275$ kg und mit $\frac{1}{5}$ 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.

Abb. 32. Kräfteplan der Queraufhängung in gerader Strecke.

Im Bogen (Abb. 30) wird der Spanndraht für einen seitlichen Auszug durch die Summenkraft der in wagrechter Richtung wirkenden Mittelkräfte 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.

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

Dient der Auszug unter einem als Tragdraht (Abb. 33), so zerlegt sich die Mittelkraft von Drahtspannung und Leitungsgewicht in die beiden Richtungen des Tragdrahtes.

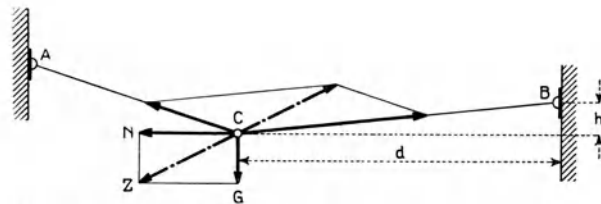


Abb. 33. Kräfteplan der Queraufhängung im Bogen.

Die Richtung der beiden Querdrähte kann innerhalb gewisser Grenzen frei gewählt werden; die gewählten Richtungen sind bestimmend 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 , so 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“ in der Regel mit 250 kg beansprucht werden dürfen. Mauerrosetten erhalten vier Steinschrauben, die bis 200 mm einzulassen sind und vertragen Züge von 250 bzw. 500 kg (äußerst 1000 kg).

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

Die Kräfte, welche die die Leitung tragenden Maste beanspruchen, können in auf die Mastrichtung senkrechte, also in wagrechter Ebene wirkende Kräfte zerlegt werden und in solche, die in senkrechter Richtung wirken. Für die Berechnung des gesamten Biegemomentes 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 auf.

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

In wagrechter Richtung wirken: der Winddruck auf die Leitungen und den Mast, weiters der Kurvenzug aller Leitungen.

Dem hieraus folgenden Gesamtmoment, bezogen auf den Mastfuß, hält die Materialspannung σ des Mastes im gefährlichen Querschnitt das Gleichgewicht; das heißt:

$$M = W\sigma_b;$$

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

Hier bezeichnet M das Gesamtmoment in kg/cm
 W das Widerstandsmoment cm³
 und σ_b die Biegebeanspruchung in kg/cm².

Die Beanspruchung des Gestänges durch die Fahrleitung kann im allgemeinen in so mäßigen Grenzen gehalten werden, daß vom Standpunkt der Festigkeit Holz- und Eisenmaste ausreichen. Eisenmaste werden nur an stärker beanspruchten Punkten nötig. Bei dieser Sachlage sind für die Wahl des Baustoffes die Betriebskosten und ästhetische Gesichtspunkte entscheidend.

Als Holz- und Eisenmaste kommen in der Regel nur unbearbeitete Stämme mit kreisrundem Querschnitt und einer Verjüngung 0,5 bis 1,0 cm, im Mittel 0,7 je m Mastlänge, in Frage. Der gefährliche Querschnitt tritt am Mastfuß auf.

Der Durchmesser D des Mastes ist dann bestimmt durch die Gleichung

$$D = 2,17 \sqrt{\frac{M}{\sigma_b}} \dots \dots \text{cm}$$

Die Vorschriften des V.d.E. und des Wiener E.V. lassen folgende Biegebeanspruchungen zu

Holzart	σ_b kg/cm ²
Imprägnierte, widerstandsfähige Hölzer (Lärche) . . .	110
Nicht imprägnierte Weichhölzer	70

Die Schweizer Bundesvorschriften gestatten eine Beanspruchung von $\frac{1}{4}$ der Bruchfestigkeit.

Der Hauptnachteil der Holz- und Eisenmaste ist deren Gefährdung durch Fäulnis am Mastfuß. Diesem Nachteil begegnet die Verbundart, bei welcher der Holz- oder Eisenmast an einbetonierte Eisenträger (alte Schienen) angeschellt wird. Die freie Bieglänge der Maste ist bei dieser Bauart entsprechend der Einspannlänge um 1 bis 2 m verringert.

Die eisernen Maste sind je nach der gewählten Bauart als einfache Träger oder Fachwerkskonstruktionen zu behandeln. In beiden Fällen ist ihre Beanspruchung nach den Regeln der Festigkeitslehre auf Biegung und Knickung zu berechnen.

Die höchstzulässige Zug- und Druckbeanspruchung beträgt für

Flußeisen	15,0 kg/cm ²
Mannesmann-Rohrmaste	20,0 "
Als Scherbeanspruchung der Niete sind zulässig	12,0 "
desgl. für Schrauben	7,5 "
Der Lochleibungsdruck der Niete sei höchstens	24,0 "
derjenige von Schrauben	15,0 "

Im allgemeinen scheint es technisch begründet, die Maste mit $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ ihrer Bruchlast zu beanspruchen.

Die Knicksicherheit wähle man nach Tetmayer 2fach, nach Euler 3fach.

Die in neuerer Zeit für Freileitungsmaste, in der Hauptsache jedoch nur für Tragmaste verwendeten Betonmaste sind für Fahrleitungen bisher wenig verwendet worden.

Der Winddruck ist mit 125 kg/m² senkrecht getroffener Fläche einzusetzen. Für runde Querschnitte gilt die Verminderungszahl 0,5.

Die Tragwerksfundierungen sind bezüglich der eintretenden Bodenpressung und auf Standsicherheit zu untersuchen.

Die spezifische Belastung des Erdreiches soll im allgemeinen an keiner Stelle des Fundamentes eine größere Pressung als 25 kg/cm² aufweisen.

Unter besonderen Verhältnissen soll diese Beanspruchung wie folgt bemessen werden:

Beschaffenheit des Bodens	Zulässige Belastung kg/cm ²
Feiner festgelagerter Sand	3 bis 5
Festgelagerter scharfer Sand	4 " 7
Festgelagerter Kies	5 " 8
Gesunder Kies	7 " 15

Bei Berechnung der Standsicherheit von Masten hatte man früher ungeprüft angenommen, daß dem Kippmoment der Beanspruchung des Mastes außer dem senkrechten Gewicht die Pressung des Erdreiches widersteht und der höchste Wert derselben auf der Erdoberfläche auftritt. Diese Annahme stimmt nicht mit der Wirklichkeit überein, denn das Erdreich kann ohne Stützung an dieser Stelle keinen Widerstand ausüben. Die diesbezüglich bestehenden Verhältnisse sind durch Dörr und Frölich einläßlich untersucht worden, auf welche Werke hier verwiesen sei.

B.

V. Der Leitungsbau.

1. Der Zweck der Fahrleitung.

- Arns: Die Entwicklung der Stromführungseinrichtungen elektrischer Bahnen. EKB 1912, H. 32.
 Braun: Die unterirdische Stromführung für elektrische Bahnen. ETZ 1898, H. 38.
 Bussebaum: Umbau der Oberleitung von Rollen- auf Schleifbügelbetrieb. EKB 1920, H. 26.
 Choisy: La ligne de contact de la ligne du Gotthard des CFF. SETZ 1923, Nr. 27.
 Edler: Die technische und wirtschaftliche Bedeutung der Bronze für Hochspannungsleitungen. Eu.M 1923, H. 21.
 Ertel: Handbuch für den Bau und die Unterhaltung der Oberleitung elektrischer Bahnen. Leipzig: Jänecke 1907.
 Grünholz: Hochspannungsleitungen im gebirgigen Gelände. Eu.M 1923, H. 28.
 Hixson: Contact conductors and collectors for electric railways. Proc. 1915.
 Rziha u. Seidener: Starkstromtechnik. Berlin: W. Ernst & Sohn 1912.
 Poschenrieder: Oberleitungen elektrischer Bahnen. München: Oldenbourg 1904.
 Seefehlner: Berichte über das amerikanische Eisenbahnwesen. EKB 1916, H. 16.

Winterhalter: Der Umbau von Rollenkontakt auf Bügelkontakt bei der städt. Straßenbahn Zürich. SBZ Mai 1918.

Vereinheitlichungsarbeiten des Verbands D.Str.u.K.B. und Privateisenbahnen. VT 1922, Nr. 3.
Erfahrungen mit Hochspannungsleitungen im Gebirgsland. ETZ 1923, H. 25.

Speise- und Fernleitungen dienen rein elektrischen Aufgaben; bei deren Entwurf und Bau sind die elektrotechnischen Gesichtspunkte richtunggebend. Mechanische Fragen spielen nur insofern mit, als die für die Betriebssicherheit notwendige mechanische Festigkeit gewahrt werden muß. Sie 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; ihre gleichzeitige Eignung zur elektrischen Kraftübertragung tritt oft an Bedeutung zurück.

Die Fahrleitung ist durch diese Aufgabe in ihrer Anordnung vorweg gekennzeichnet; sie ist nicht freizügig, sondern der Bahnachse folgend außerhalb des Lichttraumprofils derartig anzuordnen, daß die klaglose Stromabnahme von dem auf dem Bahnkörper in Bewegung befindlichen Fahrzeug bei jeder Geschwindigkeit gesichert ist.

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 — nicht verzichtet. Die Hin- und Rückleitung ist daher im Wesen ganz verschieden geartet und verlangt demzufolge 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 Kupfer- oder Bronzedrähte mit Querschnitten nicht unter 50 qmm und nicht über 120 qmm.

Entsprechend den verhältnismäßig kleinen Berührungsflächen derartiger Fahrleitungen mit dem Stromabnehmer ist die von einem Fahrdraht 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 insoweit 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 Fahrdrahtes voll ausgenützt werden. Diesem Zwecke dient die selbsttragende Fahrleitung. Der Fahrdraht wird mit der höchstzulässigen mechanischen Zugbeanspruchung über diejenige Spannweite gespannt, bei welcher ein für die klaglose Stromabnahme noch zulässiger Durchhang entsteht, der insbesondere auf Grund der mäßigen Fahrgeschwindigkeiten toleriert werden kann. 35, äußerst 38 m haben sich als praktische Grenzwerte 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.

2. bei hohen Leistungen, demnach hohen Spannungen und gegebenenfalls 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 Durch-

hanges würde bei selbsttragenden Leitungen von den in Betracht kommenden Baustoffen unzulässige Beanspruchungen und außerdem sehr widerstandsfähige Stützpunkte verlangen.

Die Fahrleitung mit Längsaufhängung (Vielfachaufhängung), bei welcher der Fahrdraht 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 praktisch mit 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. „Stromschiene“ 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.

* * * Die Große Berliner Straßenbahn und ihre Nebenbahnen. Berlin: Springer 1911.

Berling: Stahl-Aluminium-Seile. ZVDI 1922, Bd. 66, H. 7 u. H. 11.

Guggenheim: Mitteilungen über die Eigenschaften von Fahrleitungen EKB 1912, H. 18. (Phonoelectric Draht.)

Le: Erfahrungen der italienischen Staatseisenbahnen mit Drehstrom-Fahrleitungen. ETZ 1918, H. 12.

Moellendorf: Modernisierung der Elemente zur Stromabnahme bei elektrischen Bahnen. ETZ 1913, H. 48.

Die selbsttragende Fahrleitung für Straßenbahnen stellt die wohlfeilste Anordnung für die gebräuchlichen Mittelspannungen bis etwa 800 V dar, indem die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Fahrdrahtes voll ausgenützt 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/mm² Bruchfestigkeit in Betracht.

Der Hartkupferdraht wird mit 97 % Leitfähigkeit des reinen Kupfers (spez. Widerstand 1,75 Mikrohm/cm) und 38 kg/qmm Bruchfestigkeit hergestellt. Neuerdings gelangte ein Cadmium-Kupferdraht mit sehr großer Dehnung zur Einführung.

Die im Kriege verwendeten Ersatzstoffe sind unbedingt minderwertig; sie nützen sich selbst stark ab und verursachen einen großen Verschleiß der Stromabnehmer.

Der Fahrdraht 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 vereinzelt Fällen vor. Bei Bahnen, die den „technischen Vereinbarungen“ unterliegen, ist die Freihaltung des Lichtraumprofils zu beachten, so zwar, daß der Fahrdraht selbst in seiner tiefsten Lage noch außerhalb des Lichtraumprofils bleibt.

Querschnittsformen. (Abb. 34.) Der Fahrdraht hatte ursprünglich kreisrunden Querschnitt und wurde in die „Ösen“ eingelötet. Die Lötösen waren wegen ihres geringen Querschnittes besonders für Rollenstromabnehmer erwünscht. Mit Einführung des Schleifbügels kamen Klemmösen auf, bei denen das lästige Lötens vermieden wird. Für Klemmösen ist eine Querschnittsform des Fahrdrahtes erwünscht, die für das Klemmen besser geeignet ist als die kreisrunde Querschnittform. Es haben sich zu diesem Zwecke Fahrdrahtformen mit zwei seitlichen Rillen oder Achterquerschnitt ein-

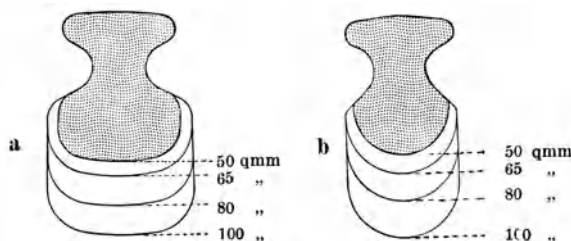


Abb. 34. Regelquerschnitte für den Fahrdraht:
a Schleifbügelbetrieb,
b Rollenbetrieb.

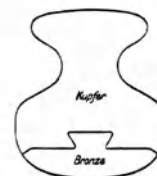


Abb. 35. Fahrdraht aus Kupfer
mit eingesetzter Schleiffläche
aus harter Bronze.

geführt. Für Vollbahnen ist man von den in Abb. 34 dargestellten Querschnittsformen wegen deren großen dem Wind gebotenen Fläche abgekommen und auf Drähte mit kreisförmigem Querschnitt mit zwei seitlichen Einkerbungen für die Drahthalter übergegangen. 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. 35).

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.

Dieser 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 Mikrohm/cm (2,5 fache des Kupfers) bei 20° C angegeben.

Es ist naheliegend, Löt- und Verbindungsstellen im Fahrdraht tunlichst zu vermeiden. Tatsächlich können bis einschließlich 100 qmm Querschnitt Längen von 400 m in ungelöteten 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 dieser oft nur in geringen Längen von 40 bis 60 m 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. Andererseits 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. Ferner erreicht man im Bedarfsfalle auch die Verdoppelung des elektrisch notwendigen Querschnittes.

Findet man vom Standpunkt des Spannungsabfalles mit je einem Fahrdraht für jedes der beiden etwa vorhandenen Gleise das Auslangen, benötigt jedoch vom Standpunkt der klaglosen Stromabnahme Doppeldraht, so 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 ein Weich-Eisendraht, der lediglich die Bügelführung und die Zuführung des nötigen Lampen-, Steuer- oder Heizstromes zu besorgen hat.

Das Klemmwerk. An der Befestigungsstelle des Fahrdrahtes 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 Fahrdraht und

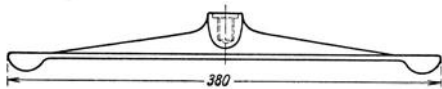


Abb. 36. Lötöse für Rollenstromabnehmer-Betrieb.



Abb. 37. Kurze Fahrdrahtklemme für Bügelbetrieb (SSW).

eine Stromunterbrechung; beides macht den Stützpunkt zur gefährlichen Stelle. Stützpunkte müssen so gebaut sein, daß dieser Mangel möglichst gemildert wird, andererseits soll die freie Beweglichkeit des Fahrdrahtes nicht behindert sein. In dieser Hinsicht ist es wichtig, den Stützpunkt so leicht als möglich zu gestalten, damit der Stromabnehmer diesen in demselben Maße anheben kann wie die Fahrleitung, was eine Vorbedingung für die gleichmäßige Abnutzung des Arbeitsdrahtes ist.

Der Knick in der Fahrleitung wird durch möglichst lange und federnde Ösen gemildert. In dieser Hinsicht waren die für Rollenstromabnehmer verwendeten Lötösen (Abb. 36) von etwa 38 cm Länge vorzüglich geeignet; sie waren aber vergleichsweise sehr teuer, weil sie aus Rotguß oder Messing hergestellt werden mußten.

In Schleifbügel-Oberleitungen hat sich die Verwendung verhältnismäßig kurzer Klemmösen erhalten (Abb. 37).

Den theoretisch erkannten Anforderungen, daß bei Temperaturänderungen ein Längsausgleich der Leitung mit verschiedenen Spannweiten nötig wird, entspricht die sehr verbreitete frei bewegliche Öse, die mit zwei auf einem Längsbalken verschieb-



Abb. 38. Fahrdraht-Klemmöse für gerade Strecke mit losen Klemmstücken (AEG).

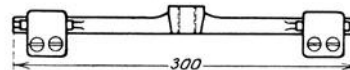


Abb. 39. Öse mit freibeweglichen Klemmstücken für gerade Strecke.

baren und auch nach oben ein freies Spiel aufweisenden Klemmen (Abb. 38 u. 39) versehen ist. Der Stromabnehmer hat bei dieser Anordnung nur das geringfügige Gewicht der einen Klemmbacke anzuheben.

Die Klemmbacken können gegossen, geschmiedet oder gepreßt werden. Temperguß ist am meisten gebräuchlich; nur dort, wo Verrostungen zu befürchten sind, verwendet man Messing (gepreßt oder gegossen) oder man verzinkt oder verbleit die Klemmen.

Um die aus Eisen erzeugten Ösen jederzeit leicht lösen zu können, empfiehlt es sich, wenn Schlitzschrauben mit versenktem Kopf verwendet werden (für Rolle), (Abb. 40 u. 41) diese, bzw. bei Kopfschrauben die Muttern, aus Messing herzustellen.

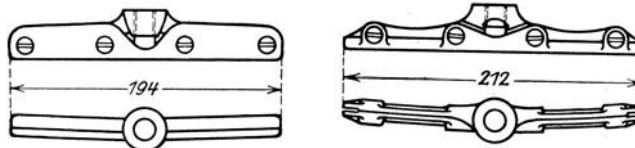


Abb. 40. Klemmösen für Kurve (Rollenbetrieb).

Desgleichen sind aus Messing diejenigen Klemmösen herzustellen, die zur Stromzuführung dienen (Speiseösen).

In Kurven können die erwähnten frei beweglichen Ösen nicht verwendet werden, weil sie sich entsprechend dem Seitenzug schief einstellen würden. Zu diesem Zwecke dienen besondere Ösen (Abb. 40), 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 Abteilungsisolatoren müssen so eingerichtet sein, daß die ununterbrochene Führung der Stromabnehmer gesichert ist und die Isolation für die volle Fahrdratspannung auch für den Fall ausreicht, daß der volle Strom eines Fahrzeuges unterbrochen werden muß. Neuere Bauarten sind daher mit besonderen Funkenziehern ausgerüstet (Abb. 42).

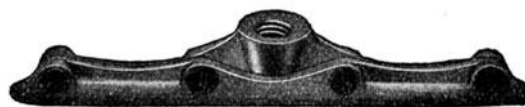


Abb. 41. Fahrdrat-Klemmöse für Kurven (AEG).

Die mechanische Widerstandsfähigkeit der Streckenisolatoren war ursprünglich ein wunder Punkt der Fahrleitungsanlage; man hat daher stets beiderseits der Abteilungsisolatoren 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. 43) 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.

Da insbesondere die Weichen für Rollenstromabnehmer vielfach zu Störungen Anlaß geben, vermeidet man diese bei eingleisigen Anlagen tunlichst durch Verlegung je eines Fahrdrattes für jede Fahrtrichtung.

Die Isolatorhalter und die Isolatoren. Für die Fahrleitung von Straßenbahnen ist eine doppelte Isolation vorgeschrieben.

Das Hauptgewicht ist darauf zu legen, daß die Isolation derartig unterteilt werde, daß die Beschädigung eines Teilisolators auf den anderen nicht übergreifen kann. Weiters muß jede Teilisolation für sich der vollen Betriebsspannung standhalten können.

Die geltenden Vorschriften enthalten keine Bestimmung über den Sicherheitsgrad der Isolation. Es ist jedoch sachlich begründet, jede Teilisolation mit zweifacher Sicherheit ausulegen, so daß insgesamt eine vierfache Sicherheit erzielt wird.

Jeder Teilisolator muß demnach so gebaut sein, daß bei der doppelten Betriebsspannung weder ein Durchschlag noch ein Überschlag eintritt.

Die bei Straßenbahnen üblichen Mittelspannungen von höchstens 800 V gestatten die Anwendung von Hartgummi zur Herstellung der Isolation. Dieser Baustoff wird deshalb anderen vorgezogen, weil er sich bei genügender Wetterbeständigkeit mit ge-

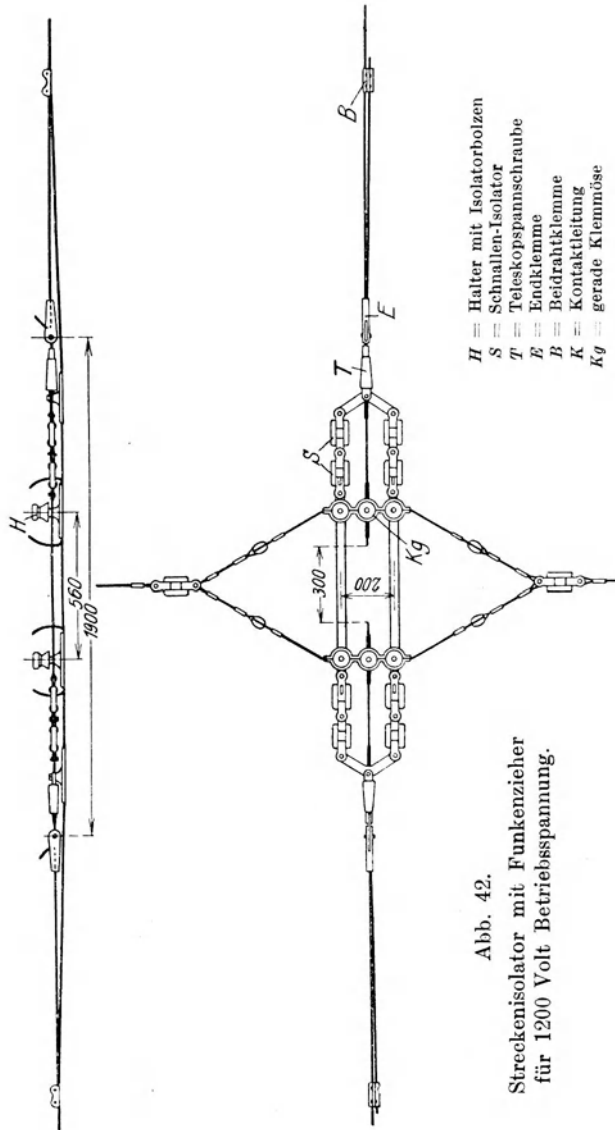


Abb. 42.
Streckenisolator mit Funkenzieher
für 1200 Volt Betriebsspannung.

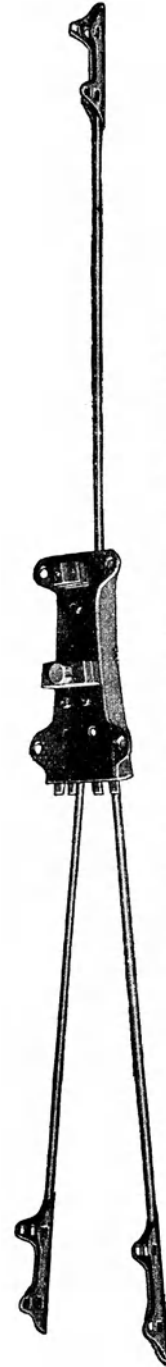


Abb. 43. Schmiedeeiserne Fahrdratweiche für Rollenbetrieb (AEG).

ringen Dimensionen in zweckmäßige Formen bringen läßt und sich insbesondere zur Umprägung von Eisenkörpern eignet.

Es ist die Regel, zur ersten Isolation (gerechnet vom Fahrdrat) mit Hartgummi umpreßte Bolzen (Abb. 44) zu verwenden, die in geeignete Halter eingesetzt werden.

Die ursprüngliche, derzeit in Amerika immer noch bevorzugte Bauart sieht zweiteilige Isolatorkörper (Abb. 45 u. 46) — 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.

Europäische Bahnen ziehen jene Bauarten vor, bei welcher ein Isolatorbolzen in einen allseitig geschlossenen Halter (Abb. 47) eingesetzt wird, so daß der Hartgummi vor Wind und Nässe geschützt ist.

Die AEG baut diese Halter einteilig mit von oben eingesetzten Bolzen (Abb. 47);

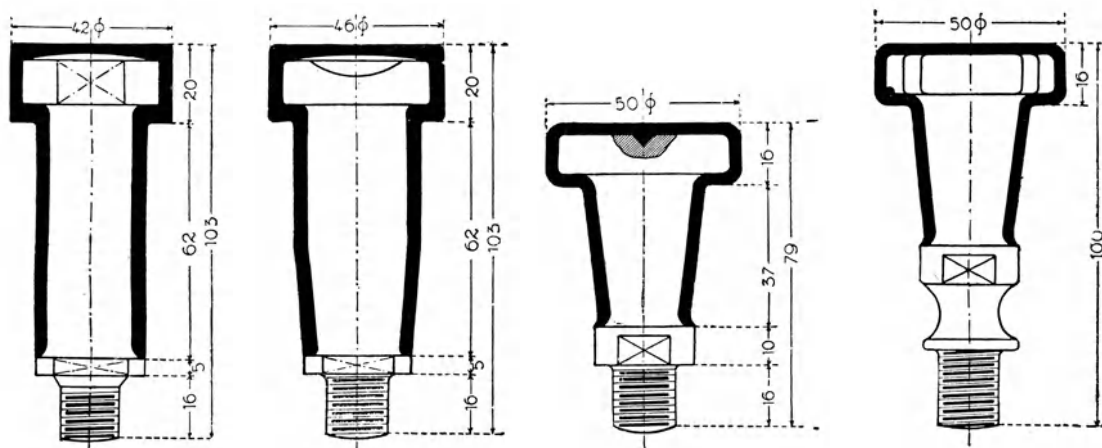


Abb. 44. Regelformen für Fahrdraht-Isolatorbolzen.

die obere Öffnung wird mit einem mit Tropfkanten versehenen Deckel verschraubt; das unten herausragende Ende des Isolierbolzens trägt einen Vierkant und Gewinde

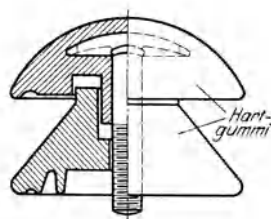


Abb. 45. Fahrdraht-Isolator:
Kappe und Konus.



Abb. 46. Fahrdraht-Isolator:
Kappe und Konus.

zum Einschrauben in die Fahrdrahtöse. Die Isolatorhalter der SSW sind zweiteilig, der Isolierbolzen wird streng eingepaßt, hierauf die zwei Teile fest vernietet bzw. verschraubt (Abb. 48).

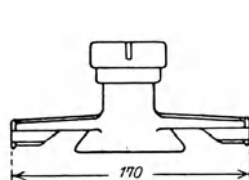


Abb. 47 a.

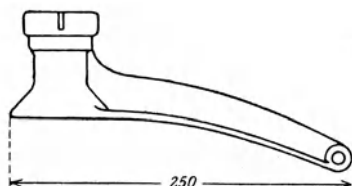


Abb. 47 b.

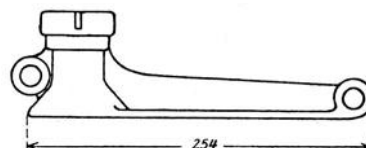


Abb. 47 c.

Fahrdraht-Isolatorhalter für Bügelbetrieb: a für gerade Strecke, b für halbe Züge, c für Kurven (AEG).

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 des Kurvenzuges eingehalten werden 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 gegen-



Abb. 48. Regelformen der SSW für Isolatorhalter.

einander isolierte Kettenglieder, gebräuchlich, die aber daran kranken, daß der Hartgummi vollständig frei liegt (Abb. 49). In zahlreichen Betrieben ist man auf Porzellan-spannkugeln übergegangen (Abb. 50 bis 53).

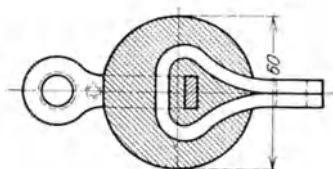


Abb. 49. Spannisolator aus Hartgummi.

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; doch läßt er sich meist gerade bei diesen nur schwer durchführen, weil die Weichen und Kreuzungen nicht isoliert hergestellt werden. Die Betriebssicherheit der Anlage wird jedoch dadurch nicht beeinträchtigt, daß die erste Isolation nicht unmittelbar an der Öse sitzt. Es hat sich eine Anordnung (Abb. 54 u. 55) gut bewährt, bei welcher zwei Porzellananker in die Queraufhängung eingeschaltet werden, der eine

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; doch läßt er sich meist gerade bei diesen nur schwer durchführen, weil die Weichen und Kreuzungen nicht isoliert hergestellt werden. Die Betriebssicherheit der Anlage wird jedoch dadurch nicht beeinträchtigt, daß die erste Isolation nicht unmittelbar an der Öse sitzt. Es hat sich eine Anordnung (Abb. 54 u. 55) gut bewährt, bei welcher zwei Porzellananker in die Queraufhängung eingeschaltet werden, der eine



Abb. 50. Porzellan-Spannkugel mit Drahtschlaufen (AEG).

möglichst nahe dem Fahrdrabt, der andere nächst dem Stützpunkt. In einer Queraufhängung sind dann 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. 51. Porzellan-Kettengliedisolator mit Seilschlaufen.

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 Materials Rechnung tragen.

Der starke Schwund, dem der Scherben im Ofen unterworfen ist, verlangt die Vermeidung von unvermittelten Querschnittsänderungen. Porzellan darf vernünftigerweise nur auf Druck, niemals aber auf Zug oder Scherung beansprucht werden. Gestaltet

man die Isolatoren diesen Grundsätzen entsprechend, so kann man ihnen jede Aufgabe anvertrauen.



Abb. 52. Porzellan-Kettenglied-Abspannisolator. (West.)

Größe	Prüfspannung		Überschlag		Bruchlast kg
	trocken kV.	naß	naß	naß	
1		10	13		7250
2	20	15	19		7250
3		15	20		10500

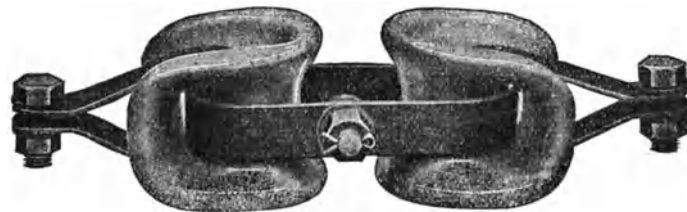


Abb. 53. Doppelter Kettenglied-Abspannisolator für 3000 V (AEG).

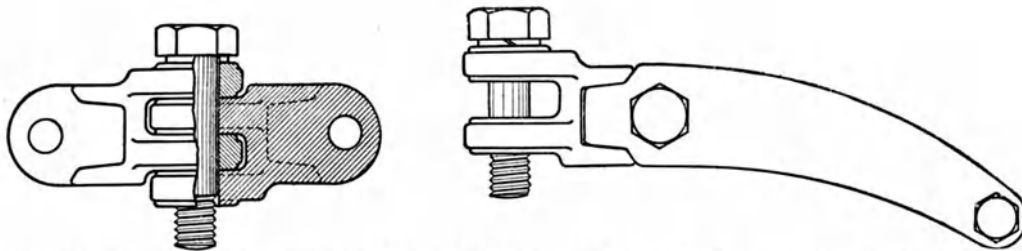


Abb. 54. Fahrdrathalter mit unisoliertem Bolzen. a) für gerade Strecke, b) für Kurven (AEG).

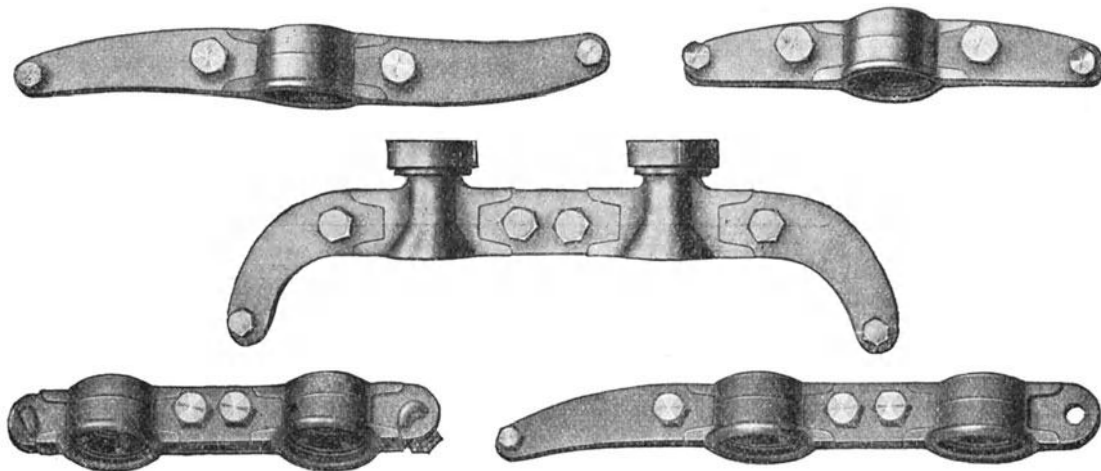


Abb. 55. Zusammenstellbare Fahrdrathalter für isolierte und unisolierte Bolzen für einen oder mehrere Drähte (AEG).

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 höchstens 150 bzw. 250 kg aus;

hieraus folgt, daß man insbesondere bei schweren Fahrdrabtquerschnitten die Kurven-
teilung kleiner nehmen, d. h. die Anzahl der Stützpunkte bzw. Auszüge über dasjenige
Maß vermehren muß, das vom Standpunkt der sicheren Stromabnahme ausreichen
würde.

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 vor-
gesehen werden. Im anderen Fall befestigt man die beiden Ösen am Querstück, das
am Spanndraht aufgehängt ist und ordnet die Isolatoren in letzterem an.

In den Abb. 47, 48, 54 und 55 sind verschiedene Typen von Isolatorhaltern dar-
gestellt.

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. 55).

Das Tragwerk und die Stützpunkte.

- Donath: Die Berechnung der Isolatorstützen. ETZ 1920, H. 41.
 Edler: Berechnung der Holzmaste für elektrische Freileitungen. E.u.M 1919, H. 28.
 Edler: Berechnung einfacher Abspannmaste und Eckmaste aus Holz. BSEV 1912, Nr. 1.
 Feuer: Berechnung gegliederter eiserner Gestänge für Freileitungen. ETZ 1920, H. 37.
 Häusler: Festigkeitsversuche an Holzgestängen. BSEV 1923, Nr. 6.
 Heinemeyer: Formeln für die Durchbiegung von Gittermasten. ETZ 1921, H. 30. — Ref. E.u.M
 1922, H. 7.
 Kallir: Hochspannungsleitungen mit eisernen Masten. E.u.M 1906, H. 43.
 Kallir: Über Hochspannungsfreileitungen. ZOIAV 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. EKB 1916, H. 8. —
 E.u.M 1915, H. 26.
 Kyser: Der mechanische Bau von Hochspannungsfreileitungen. EKB 1909, H. 27; 1910, H. 8.
 Loebner: Leitungsverbindungen und Leitungsverbinder. ETZ 1917, H. 32.
 Moll: Festigkeit der hölzernen Leitungsmaste. E.u.M 1922, H. 12. — ETZ 1921, H. 49.
 Neumann: Berechnung von hölzernen Einfach- und Doppelmasten mit Stützisolatoren. ETZ 1920,
 H. 21. — Ref. E.u.M 1920, H. 41.
 Nieß: Das Uppenbornkraftwerk. EKB 1908, H. 19.
 Otto: Durchbiegung von Leitungsmasten. ETZ 1905, H. 16.
 Seehase: Ein neuer Hochspannungsmast. ETZ 1913, H. 17.
 Steigwald: Eisenbetonmaste. VT 1921, Nr. 24.
 Vaupel: Holzmaste hoher Lebensdauer für Freileitungen. ETZ 1923, H. 9.
 Wahn: Der verankerte und verstreute Leitungsständer. ETZ 1920, H. 50.
 Wentzel: Über Tragkonstruktionen der Fahrleitung elektrisch betriebener Vollbahnen in bautechnischer
 und betriebstechnischer Hinsicht. GA 1921, Nr. 1065 und 1084.

Die gleichmäßige Geschmeidigkeit der Fahrleitung ist eine der wesentlichen Voraus-
setzungen für die klaglose Stromabnahme und gleichmäßige Abnutzung der Fahr-
leitung. Je leichter die Fahrdralthalter, um so vollkommener kann diese Bedingung
erfüllt werden. Voraussetzung ist, daß die Isolatorhalter nicht starr an den Stütz-
punkten befestigt, sondern elastisch aufgehängt sind, so daß sie unter dem Einfluß des
Stromabnehmers jeder Lagenänderung des Fahrdrabtes folgen können. Zu diesem Zweck
werden die Halter auf Stahldrähten aufgehängt, die mit Durchhang gespannt sind.

Es können Fälle vorkommen, wo es nicht möglich ist, die Stützpunkte mit der
größten Spannweite von 35 m aufzustellen. Man hilft sich dann mit der in Abb. 28
dargestellten Brückenkonstruktion. Dem Tragseil oder Tragdraht wird eine derartige
Spannung gegeben, daß die Stützpunkte des Fahrdrabtes bei der mittleren Temperatur
oder bei der vorgeschriebenen Höchsttemperatur die gewünschte Höhenlage erhalten.

Die gleiche Anordnung ist auch das Mittel, um bei den Rollenfahrleitungen in Krümmungen Stützpunkte zu sparen und den Fahrdraht 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 Rosetten, die mit vier Steinschrauben befestigt werden, nötig.

Diese Rosetten werden für Zugkräfte bis 500 bis 600, äußerst 1000 kg, gebaut. In allen Fällen wird gesundes tragfähiges Mauerwerk vorausgesetzt.

Die Stromabnehmer selbst schwingen, andererseits versetzen sie auch den Fahrdraht 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. 56) 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 vorgenommene 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, die nachgiebig sind, 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 un bebaut ist, sind zur Anbringung der Leitung eigene Stützpunkte zu schaffen. Außerhalb des Stadtgebietes und für leichte Fahrleitungsanlagen (Gesamtquerschnitt aller Leitungen höchstens 300 qmm) sind Holzmasten (Abb. 57) die billigste Ausführung.

In bezug auf die Kosten der Instandhaltung sind sie meist teurer als Eisenmasten, da ihre Lebensdauer beschränkt ist. Im Durchschnitt kann man mit höchstens 10 Jahren

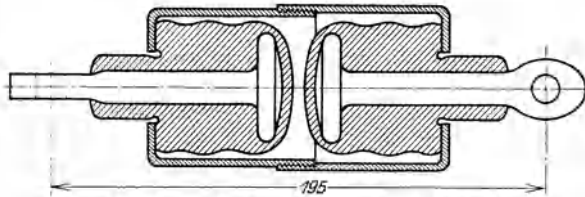


Abb. 56. Längsschnitt durch einen Schalldämpfer mit Gummipuffer. Gew. 1,2 kg.

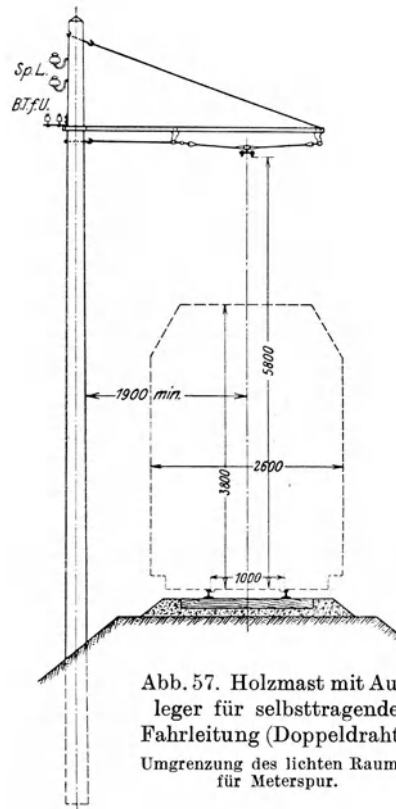


Abb. 57. Holzmast mit Ausleger für selbsttragende Fahrleitung (Doppeldraht). Umgrenzung des lichten Raumes für Meterspur.

rechnen. Eisenmaste haben zumindest die drei- bis vierfache Lebensdauer, verlangen aber sorgfältige Instandhaltung des Anstriches.

Der Zerstörung ist derjenige Teil des Holzmastes ausgesetzt, der in den Boden eingelassen und sich in der Nähe der Oberfläche befindet, weil dort der Feuchtigkeitsgrad am meisten wechselt. Diesem Schaden trachtet man mit Asphalt- und Teerumhüllungen vorzubeugen; der Erfolg ist zweifelhaft, weil das Holz unter hermetischem Verschuß erstickt und auch auf diese Art seine Festigkeit einbüßt.

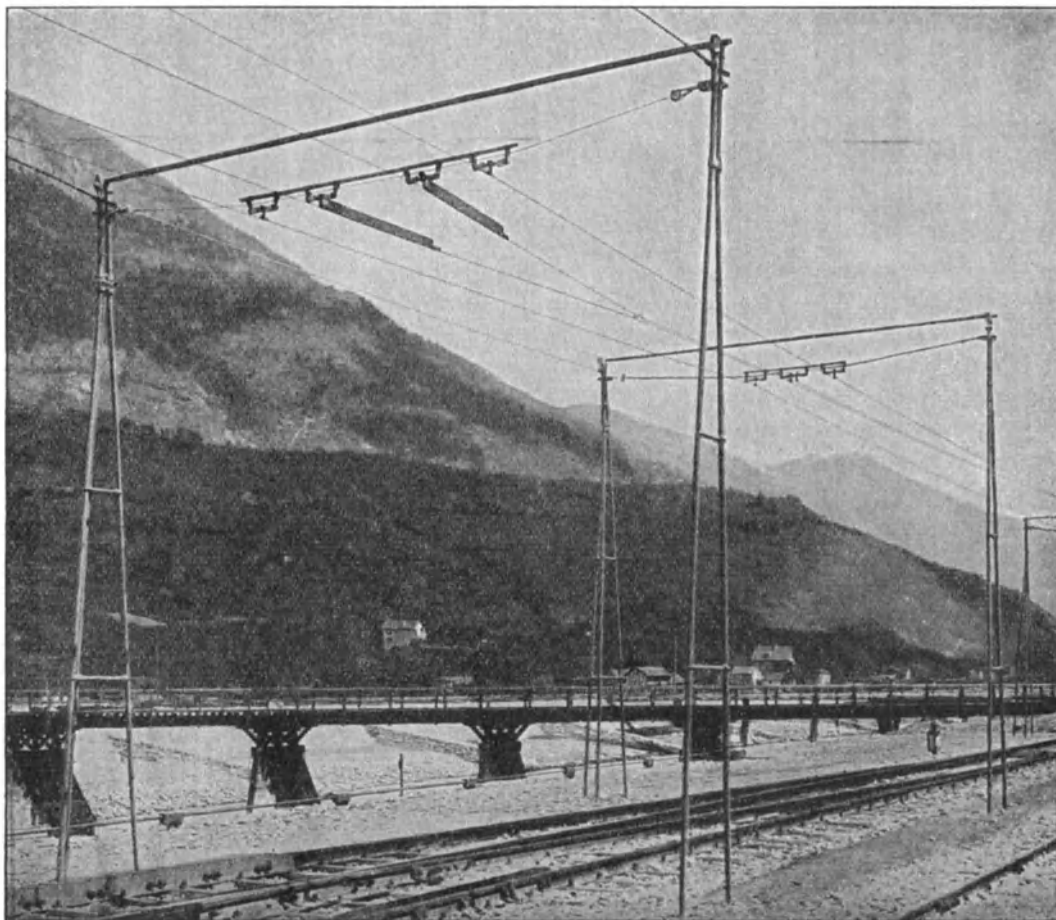


Abb. 58. Selbsttragende Drehstromfahrleitung mit aus Rohren zusammengesetzten Masten. (B.B.C.)

Die sog. Verbundbauart sieht für Holzmaste besondere Füße aus Formeisen oder Sockel aus Beton vor. Diese Ausführungen sind zweckentsprechend; ihr Preis steht zwischen demjenigen der Holz- und Eisenmaste.

Für mäßige Kräfte und nicht zu lange Maste können breitflanschtige 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.

Für einfache Stützpunkte hat sich die Type mit zwei U-Eisen als Regelbauart eingeführt. Die gegeneinander geneigten angeordneten Formeisen können durch Gitterbänder

oder durch auf die Längsachse senkrechte Binder verbunden werden. Die letztere Bauart, mit nach außen liegenden Flanschen, ermöglicht eine maschinelle Vernietung, ist daher besser und billiger.

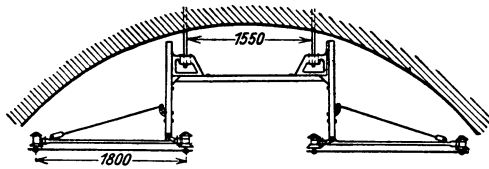


Abb. 59. Anordnung der Fahrleitung im Mont Cenis- und Giovi-Tunnel. Drehstrom 3300 V.

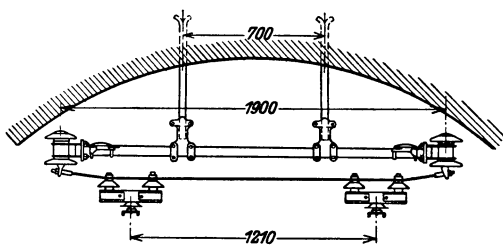


Abb. 60. Anordnung der Fahrleitung im Mont Cenis- und Giovi-Tunnel. Drehstrom 3300 V.

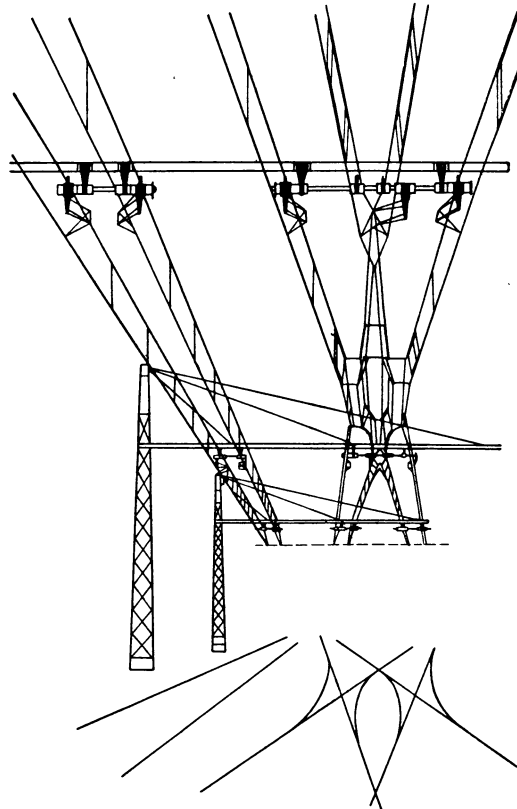


Abb 61. Ansicht der Drehstromfahrleitung mit Längsaufhängung in einer englischen Weiche (Italien. Staatsb.).

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.

In vereinzelt Fällen (Simplon) sind zusammengesetzte Rohrmaste (Abb. 58) zur Verwendung gekommen. Sie sind durch gefällige Formen und geringes Gewicht gekennzeichnet.

Diesbezüglich stehen sie 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.

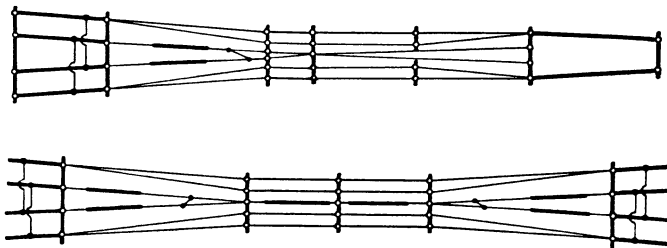


Abb. 62. Lageplan einer Drehstromfahrleitung in einer englischen Weiche (Italien. Staatsb.).

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

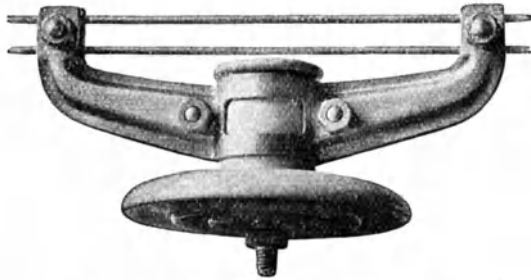


Abb. 63. Porzellan-Isolator mit Halter für eine Drehstrom-Fahrleitung, 3300 V (BBC).

Joch 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.

Fahrleitungen für Drehstrombahnen. Drehstrombahnen verwenden wegen der 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. 59 bis 62). Die meist vorhandenen Tunnels verhindern die sonst wünschenswerte Auseinanderlegung der beiden Fahrleitungen. Die Entfernung der beiden Leitungen der mit 3000 V 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.

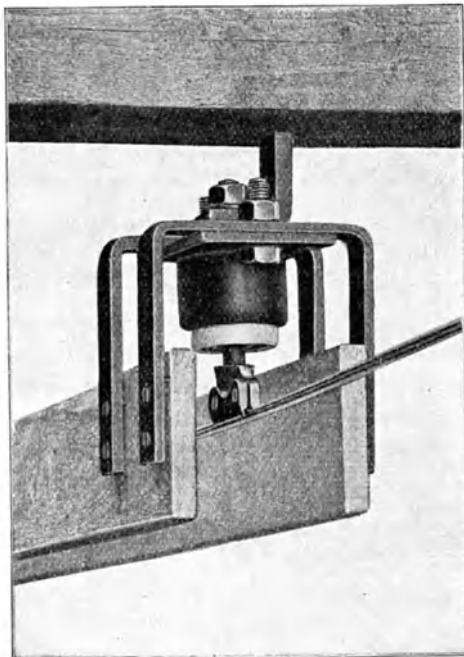


Abb. 64. Anordnung der Fahrleitung mit seitlichem Schutz im Stollen.

Die ursprünglich angewendete Hartgummi-Isolation wurde durchweg verlassen; man ist auch hier auf Porzellan übergegangen (Abb. 63). Zur strengen Einhaltung der Drahtentfernungen sind die Isolatorhalter am Stützpunkt als feste Rahmen ausgebildet, die ihrerseits elastisch aufgehängt und noch einmal isoliert sind (Abb. 59).

Die schwierigsten Stellen bilden die Weichen, die nur einpolig befahren werden und bei denen eine Überbrückung durch den Stromabnehmer unzulässig ist (Abb. 62).

Fahrleitungen im Stollen und im Tunnel. Die beschränkten Raumverhältnisse in unterirdischem Betrieb — Stollen und Tunnel — verlangen eine besondere Ausgestaltung der Fahrleitung.

In Grubenbetrieben wird es oft nötig, die Fahrleitung bis etwa 1,80 m herabzusenken. Bei dieser geringen Höhe kann die Belegschaft mit dem Fahrdraht in Berührung kommen. Um die hiermit verbundene Gefahr zu verringern, wird die Betriebsspannung bis auf 110 bis 220 V 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, die in niedrigen Stollen verwendet wird, ist nur mit Rollenstromabnehmer befahrbar. Die Isolatoren werden unmittelbar an die Zimmerung befestigt, es ist daher, abgesehen von dem geringen Spiel in den freibeweglichen Ösen, keine elastische Aufhängung durchführbar (Abb. 64).

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 keine Verminderung erfahren.

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 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 befestigen.

3. Fahrleitungen mit Vielfachaufhängung.

Allgemeine Bauregeln.

Aluminium-Kettenaufhängung. EKB 1919, H. 20.

Amberg: Overhead Contact Systems, Constructions 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. 1920, Bd. 85, Nr. 2199—2200. — Ref. E.u.M. 1920, H. 43.

Kuntze: Neue Fahrdrahtaufhängung der mit 10000 V Wechselstrom betriebenen Strecke der New York-, New Haven- and Hartford-Bahn. EKB 1912, H. 1.

Lebenbaum: The contact system of the Southern Pacific Co. Portl. Div. Proc. 1915, H. 7.

Leboucher: Note sur les lignes coténares pour prise de courant aérienne destinées à l'électrification des voies d'intérêt générale. RGC 1921, Bd. 10, Nr. 5.

Reishaus: Vielfach-Aufhängung für die Oberleitungen elektrischer Bahnen, Bauart „SSW“. EKB 1920, H. 18.

Schwarzkopff: Neuere amerikanische Ausführungen von Oberleitungen für Vollbahnen. EKB 1915, H. 4.

Seefehlner: Hochspannungsleitungsanlagen für elektrische Bahnen. ETZ 1913, H. 6.

Usbeck: Über Unterteilung der Fahrleitungen bei elektrischen Hauptbahnen. ETZ 1920, H. 25.

Westphal: Fahrleitung mit Vielfachaufhängung für Vollbahnen der Bergmann-EWAG. EKB 1919, H. 33.

Die Kettenaufhängungen der AEG. Mitteil. für Bahnbetriebe 1914, Nr. 12.

Einfachdraht für elektrische Bahnen. EKB 1915. ETZ 1915, S. 229.

Neue Stromzuführungsanlage für elektrische Vollbahnen. ETZ 1904, H. 15.

Stahl-Aluminium-Seile. ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 7.

Beschreibung ausgeführter Anlagen:

Amerika.

Törpisch: Die elektrischen Bahnen der Vereinigten Staaten Nordamerikas. GA 1907, Nr. 726.

Zehme: Die elektrischen Hauptbahnen in den Vereinigten Staaten. GA 1909, Nr. 768.

Cascade Tunnel Electrification. ERJ 1909.

Chicago, Lake Shore & South Bond Ry. Seven years of operating experience. ERJ 1915, Nov.-Ref. EKB 1916, H. 15.

Electrification of the Hoosac Tunnel. ERJ Juli 1911.

Murray: Electrification Analysed and its practical Application to trunk Line Electrification. Proc. 1911.

— BIEKV Bd. VIII, 1912. — ERJ, Mai 1912, Apr. 1910, Aug. 1907.

Pennsylvania Rr. Philadelphia—Paoli Electrification. ERJ Apr. 1916, Jan. 1916, Nov. 1916.

Zogbaum: Construction, maintenance and cost of overhead contact systems. Proc. 1915, Nr. 7.

Deutschland.

Freund: Der elektrische Betrieb auf der Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf III. Kraftwerk und Fahrleitung. ETZ 1919, H. 52. — ZVDI 1908, S. 1581.

Usbeck: Die Fahrleitung der AEG auf der Strecke Dessau—Bitterfeld.

Heyden: Die elektrische Zugförderung auf der Strecke Dessau—Bitterfeld. ETZ 1911, H. 25.

Westphal: Die Fahrleitungsanlage der Mittenwaldbahn. EKB 1922, H. 4.

England.

Singlephase Electrification of the London, Brighton & South Coast Ry. ERJ Mai 1911.

Midlandbahn, ETZ 1909 H. 39. — ERJ Juli 1907, H. 7.

Frankreich.

Elektrisierung der französischen Midi Eisenbahngesellschaft. BIEKV 1914, Nr. 6. — ERJ Juli 1914.

Holland.

Rotterdam—Haag—Scheveningen. ERJ Apr. 1916, Jan. 1916, Nov. 1915.

Norwegen.

Rjukanbahn. EKB 1912, H. 34.

Österreich.

Mittenwaldbahn. ETZ 1914, H. 23 — EKB 1913, H. 6. — ETZ 1912, H. 39. — EKB 1922, H. 4.

Schweiz.

Cramer: Die Fahrdrableitung der Gotthardbahn. ETZ 1922, H. 20.

Lang: Von der Elektrifizierung der Rhätischen Bahn. SBZ Mai 1920.

Die theoretischen und praktischen Gesichtspunkte, die für eine Führung der Fahrleitung in ungebrochener, zur Bahnachse paralleler Linie sprechen, sind schon in früheren Abschnitten behandelt worden. Dieses Ziel kann grundsätzlich durch Aufhängung des Fahrdrahtes in verhältnismäßig kurzen Entfernungen — 5 bis 6 m — erreicht werden. Voraussetzung für eine gute Stromabnahme, die in langer Lebensdauer des Stromabnahmeapparates und geringer Abnutzung des Fahrdrahtes zum Ausdruck kommt, ist, daß die dynamischen Eigenschaften der Fahrleitung grundsätzlich in der ganzen Länge des Drahtes dieselben seien. Mit anderen Worten, die Fahrleitung kann mit einem streng starren System ausgeführt werden 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 praktisch auch auf 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.

Eine wesentliche Voraussetzung für diese Bauart ist, daß der Stromabnehmer außer dem Fahrdraht und den möglichst leicht gehaltenen Klemmvorrichtungen keine anderen Gewichte anzuheben hat.

Die senkrechten Aufhängungen des Fahrdrahtes sollen grundsätzlich ein freies Spiel nach oben zulassen (Abb. 65). 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, also bandförmige Schlaufen oder Klemmen mit Spiel in senkrechter Richtung, wie sie bei den frei beweglichen Ösen angewendet werden.

Außer der Geschmeidigkeit der Fahrleitung ist von besonderer Wichtigkeit, daß das mit der Vielfachaufhängung erstrebte Ziel, die Führung der Leitung in gestreckter Linie, auch wirklich erreicht wird.



Abb. 65.
Fahrdrahtklemme mit
lockerem Hänger.

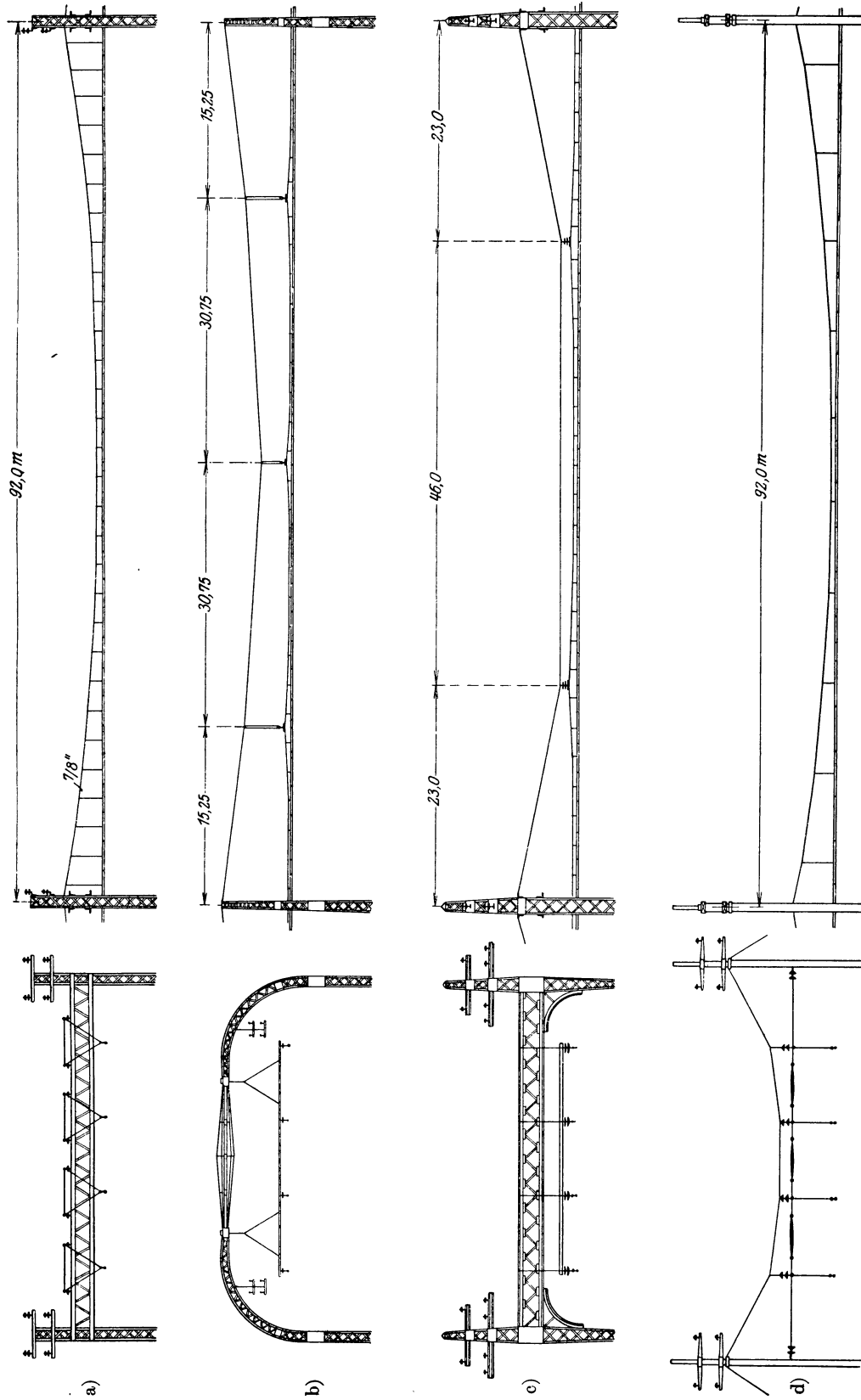


Abb. 66. Fahrleitungsanordnungen für Vielfach- (Längs-) Aufhängung der New Haven-Bahn. a) Doppelkettenwerk mit geordnetem Tragsseil, zwei Tragsseile für vier Geleise; b) Verbundkettenwerk mit geordnetem Tragsseil, zwei Tragsseile für vier Geleise; c) wie vor, jedoch ein Tragsseil für jede Fahrleitung; d) Einfachkettenwerk.

Wenn das Tragseil zunächst auf den einzelnen Stützpunkten unverrückbar befestigt gedacht wird, ist es klar, daß die durchhanglose Lage des auf dem Seil mit Aufhängungen bestimmter Länge befestigten Fahrdrahtes 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 Fahrdraht hochgezogen werden: Der Durchhang wird negativ; die tiefste Stelle der Fahr-

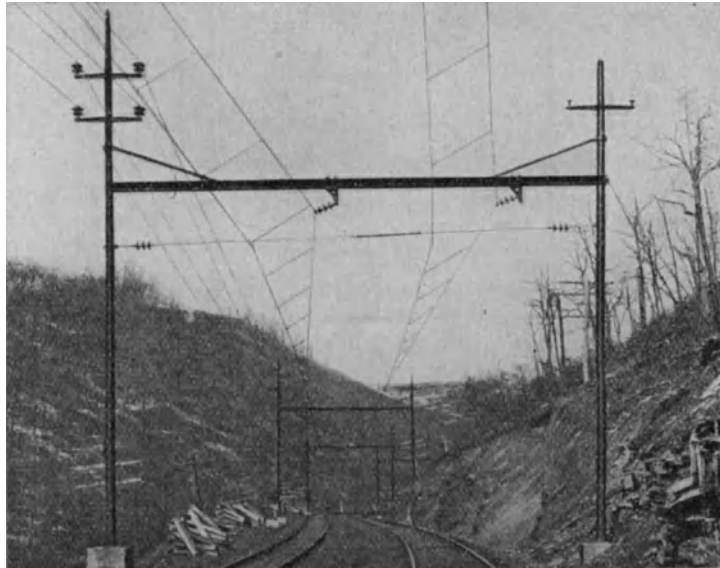


Abb. 67. Einfachkettenwerk auf Jochen in Kurven, selbsttätig nachgespannt.
(Norfolk- und Western-Bahn, 11 000 V, West.)

leitung befindet sich beim Stützpunkt. Über ein gewisses Maß darf dieser negative Durchhang nicht wachsen, weil sonst die seitlichen Abstützung hochgezogen werden und an den vorbeifahrenden Bügeln anschlagen. Bei Zunahme der Temperatur wird der Fahrdraht etwas durchsacken.

Außer diesem sich auf die ganze Spannweite verteilenden Durchhang entstehen auch von Aufhängung zu Aufhängung Einsenkungen des Fahrdrahtes. Um diese an sich niedrig zu halten, darf der Fahrdraht nicht ohne nennenswerte Zugspannung verlegt werden.

Die entwickelten Systeme (Abb. 66 bis 76) schätzen die schädlichen Folgen dieser Erscheinungen verschiedentlich ein.

Die Amerikaner verlegen Tragseil und Fahrdraht mit entsprechenden Zugspannungen fest und überlassen die Leitung sich selbst (Abb. 67 und 68).

Die europäischen Bahnen sorgen in den meisten Fällen für eine selbsttätige Nachspannung durch Gewichte.

Die einen spannen nur das Tragseil nach, indem sie der Durchhangänderung innerhalb der Spannweite Bedeutung zumessen. Bei der anderen Bauart wird nur der Fahrdraht gespannt, 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.

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, Fahrdraht und Kette in gleicher Weise nachzuspannen (Abb. 69).

Dieses System läßt sich trotz Verschiedenheit der stofflichen Eigenschaften von Tragseil (meist Stahl) und Fahrdraht (Kupfer) einwandfrei verwirklichen, weil sich

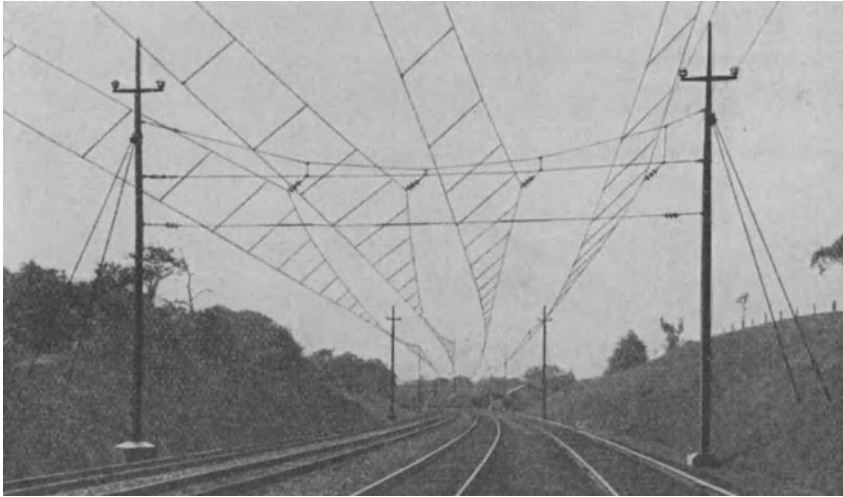


Abb. 68. Einfachkettenwerk mit Queraufhängung. (Philadelphia-Paoli, 11 000 V, West.)

zufolge der Änderung der elastischen Dehnungen die Unterschiede der Streckung ausgleichen.

Zur Festlegung der Lage der Fahrleitung in wagrechter Richtung sind Kette und Fahrdraht durch seitliche Abstützung zu fassen; dabei ist dafür zu sorgen, daß die beiden Systeme gegenseitig die notwendige freie Beweglichkeit nicht stören.

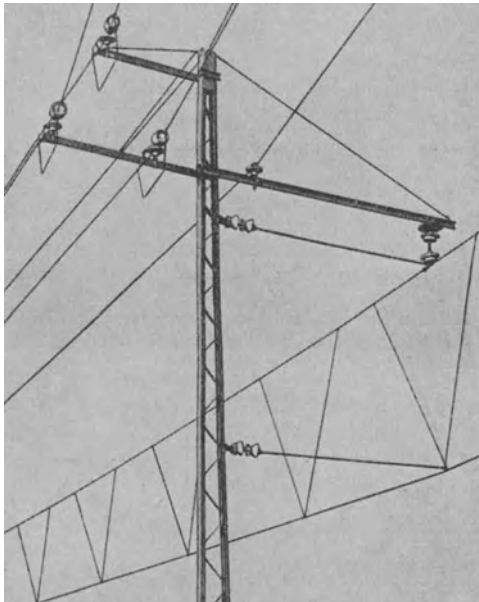


Abb. 69. Einfachkettenwerk mit durchlaufendem Tragseil. Fahrdraht und Kette nachgespannt. (Wien-Preßburg, 15 000 V, AEGU.)

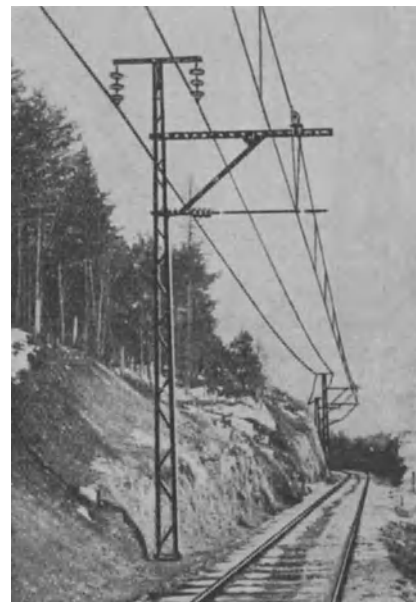


Abb. 70. Einfachkettenwerk auf Armauslegern mit auf den Stützpunkten unterbrochenem Tragseil. (Mittenwaldbahn, 15 000 V, AEGU.)

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.

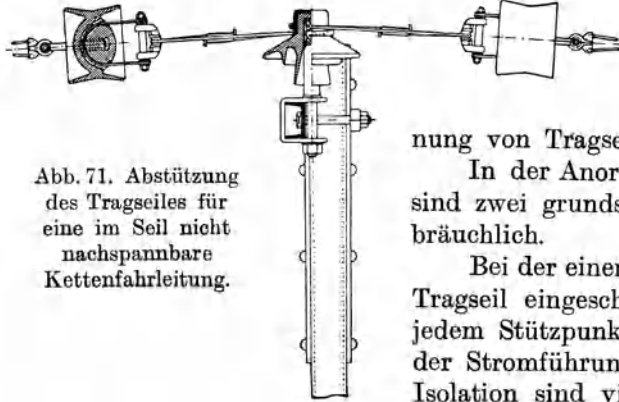


Abb. 71. Abstützung des Tragseiles für eine im Seil nicht nachspannbare Kettenfahrleitung.

Das Einfachkettenwerk besteht aus Tragseil, Hängedrähten und Fahrdrabt und kann mit oder ohne selbsttätiger Nachspannung von Tragseil und Fahrdrabt ausgeführt werden.

In der Anordnung der Kette — des Tragseiles — sind zwei grundsätzlich verschiedene Anordnungen gebräuchlich.

Bei der einen Ausführung wird die Isolation in das Tragseil eingeschaltet (Abb. 70, 71), d. h. es wird bei jedem Stützpunkt unterbrochen und nimmt daher an der Stromführung kaum teil. Zur Erzielung doppelter Isolation sind vier, äußerst drei Isolatoren pro Festpunkt nötig. Diese Bauart ist für Anlagen gewählt

worden, bei welchen auf selbsttätige Nachspannung vorweg verzichtet wurde. (Stubaitalbah, 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 sich, die Mastentfernung über die angegebenen Maße zu steigern, weil Bügelentgleisungen bei starkem Wind und gegebenenfalls schlaffen Leitungen unvermeidlich sind.

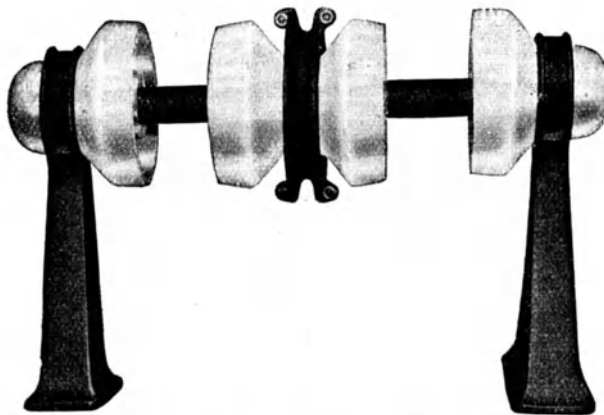


Abb. 72. Tragseil-Isolator für 15 000 V (AEG).

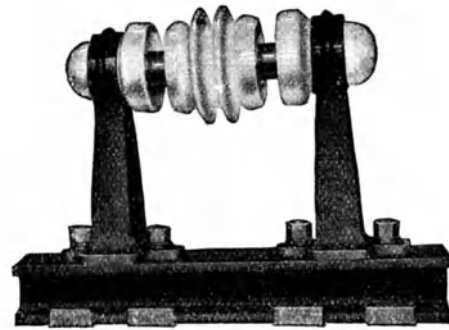


Abb. 73. Tragseil-Isolator für 3000 V (AEG).

Bei der zweiten Anordnung, die unter einem auch die Nachspannung des Tragseiles ermöglicht, wird dieses nicht unterbrochen, sondern ungeteilt auf geeignet gestaltete Isolatoren aufgelegt oder aufgehängt. Bei Systemen mit Nachspannung bildet eine drehbare Rolle (Abb. 69) den Stützpunkt für das Seil.

Mit festen Seilstützpunkten ist z. B. das Einfachkettenwerk der Norfolk- und Westernbahn (Abb. 67), sowie der Linie Philadelphia—Paoli (Abb. 68) der Pennsylvaniabahn ausgeführt. Das Kettenwerk der bei diesen Bahnen ausgeführten Bauart bringt gleichzeitig auch den Fahrdrabt im Bogen in die richtige Lage über der Gleisachse; es befindet sich nicht in senkrechter Ebene oberhalb des Fahrdrabtes, die Hängedrähte stellen sich vielmehr als fächerförmige Strahlen in die Richtung der jeweiligen Mittel-

kraft 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 wagrechter 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 gefaßt (Abb. 72, 73, 74), die ihrerseits am Ausleger stehen oder hängen. Diese Bauart erfordert sehr genaue Arbeit, sonst entstehen Klemmungen in

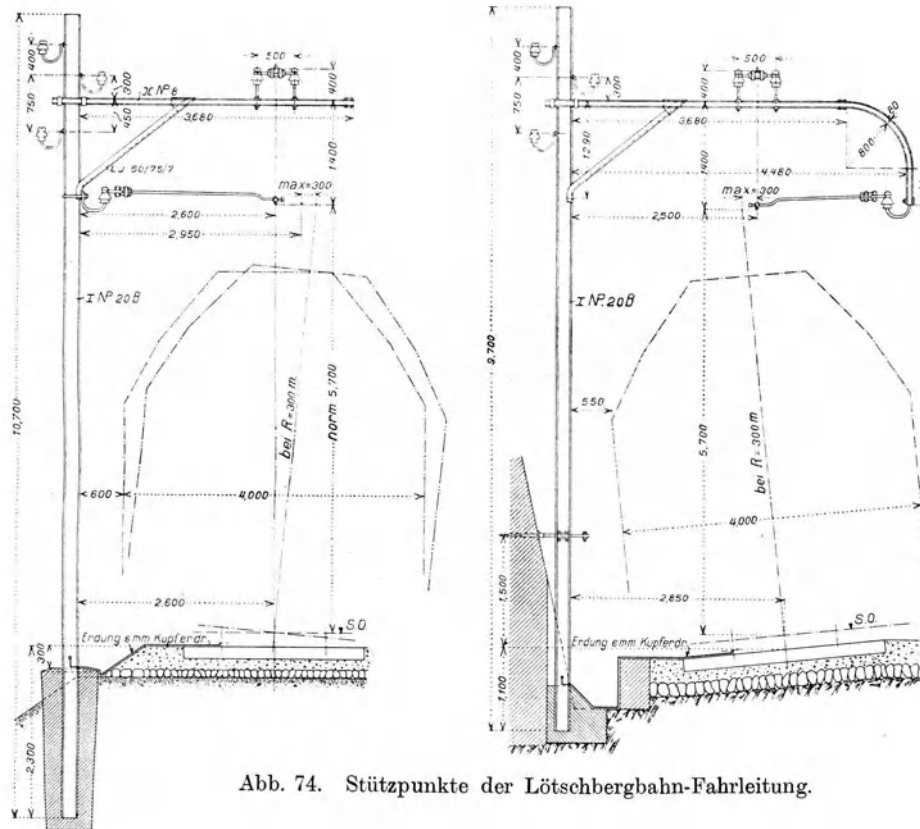


Abb. 74. Stützpunkte der Lötschbergbahn-Fahrleitung.

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 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, voneinander 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.

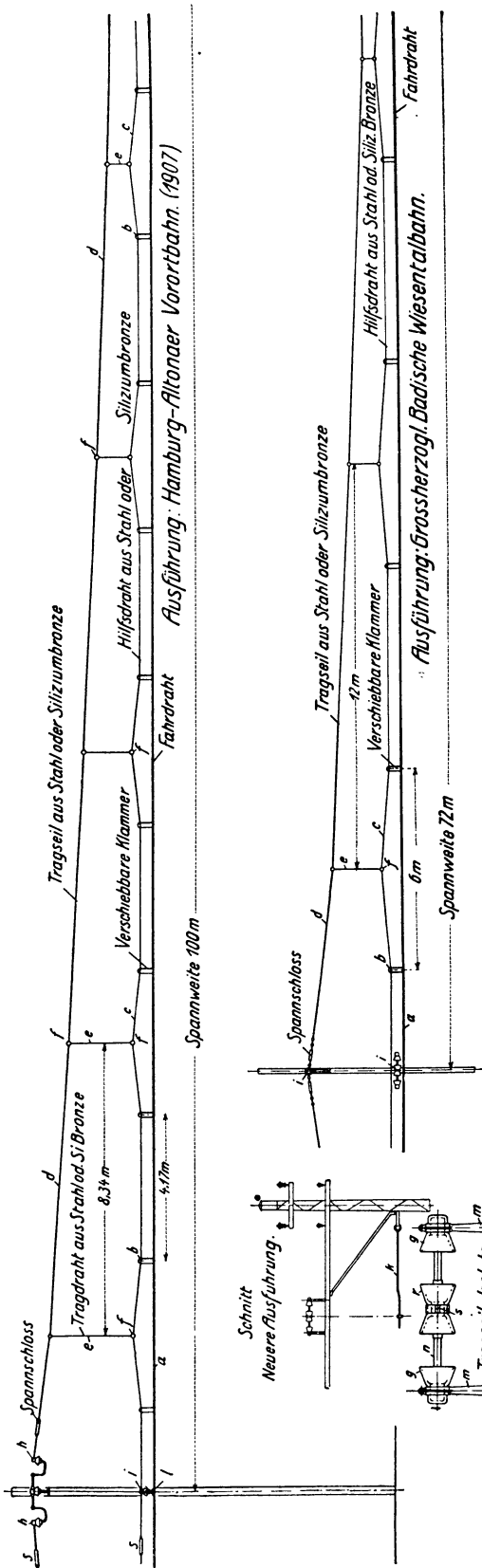


Abb. 75. Verbundkettenwerk für selbsttätige Nachspannung des Fahrdrahtes, Bauart SSW. Fahrleitung für 15000 V Betriebsspannung.

Das Verbundkettenwerk. Mit diesem Namen wird eine Gruppe von Anordnungen bezeichnet, bei welchen drei, gegebenenfalls vier Drahtsysteme vorhanden sind: das mit Durchhang verlegte Tragsseil, daran hängt ein in gerader Bahn gespannter Hilfsdraht oder ein Hilfsseil; an diesem ist mittels Klemmen, die kurze Längs- und Höhenverschiebungen zulassen, der eigentliche vom Stromabnehmer bestrichene Fahrdraht befestigt. Der letztere wird bei den Ausführungen der Siemens-Schuckert-Werke nachgespannt (Abb. 75 und 76). In bezug auf die Größe der anwendbaren Spannweiten, seitliche Abstützung und Größe des Durchhanges gilt das diesbezüglich früher Gesagte. Varianten dieser Anordnung wurden bei der New Haven-Bahn ausgeführt (Abb. 77). Auf den Masten ruht ein schweres Tragsseil; dieses ist geerdet und mit großem Durchhang (1883 mm) verlegt und trägt in Entfernungen von etwa je 30 m ein Hilfsseil. Dieses Tragsseil 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 Leitungsdraht, unterhalb welchem noch ein stählerner Fahrdraht von 100 qmm aufgehängt ist. In mehrgleisigen Strecken sind die Isolatoren gegeneinander mit Formeisenquerträgern abgestützt. Die gesamte Bauhöhe des Kettenwerks 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 Fahrdrahtes 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 — Gießen 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 be-

triebene Versuchsstrecke (Berlin—Johannisthal—Spindlersfeld) hatte zwei Tragdrähte. Ein senkrechter Schnitt durch den Fahrdraht 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 Fahrdrachtes 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. 78). Fahrdraht und zwei Hilfsdrähte sind zu 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 Würgebunde an die Halter und Stützpunkte angeschlossen. Die Würgebunde sind mit geeigneten Dreheisen hergestellte einwandfreie Behelfe, wenn 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 Würgebund jedenfalls einwandfrei und betriebssicher; bei 5- und 6-mm-Stahlröhren neigen die Bunde gerne zur Verrostung, weil sich die Verzinkung bei den scharfen Biegungen gerne löst.

Für größere Drahtdurchmesser empfiehlt es sich, den Draht mit einem Radius von mindestens 25 mm zu einer Öse zu biegen, das freie Ende durch ein flach

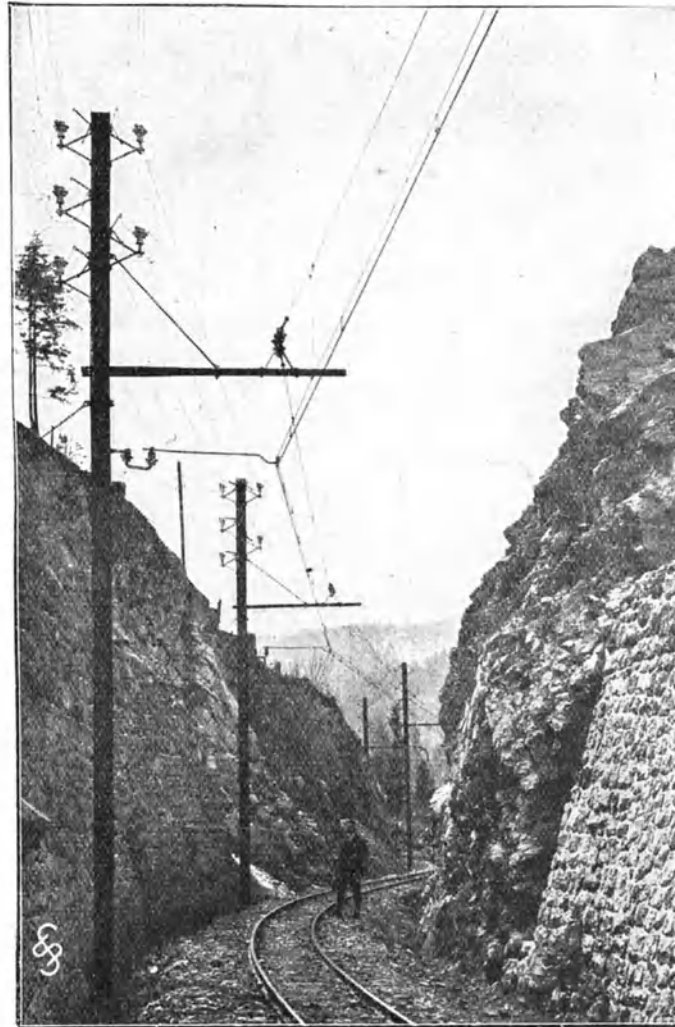


Abb. 76. Fahrleitung mit Verbundkettenwerk der Mariazeller Bahn. Wechselstrom 6000 V (OSSW).

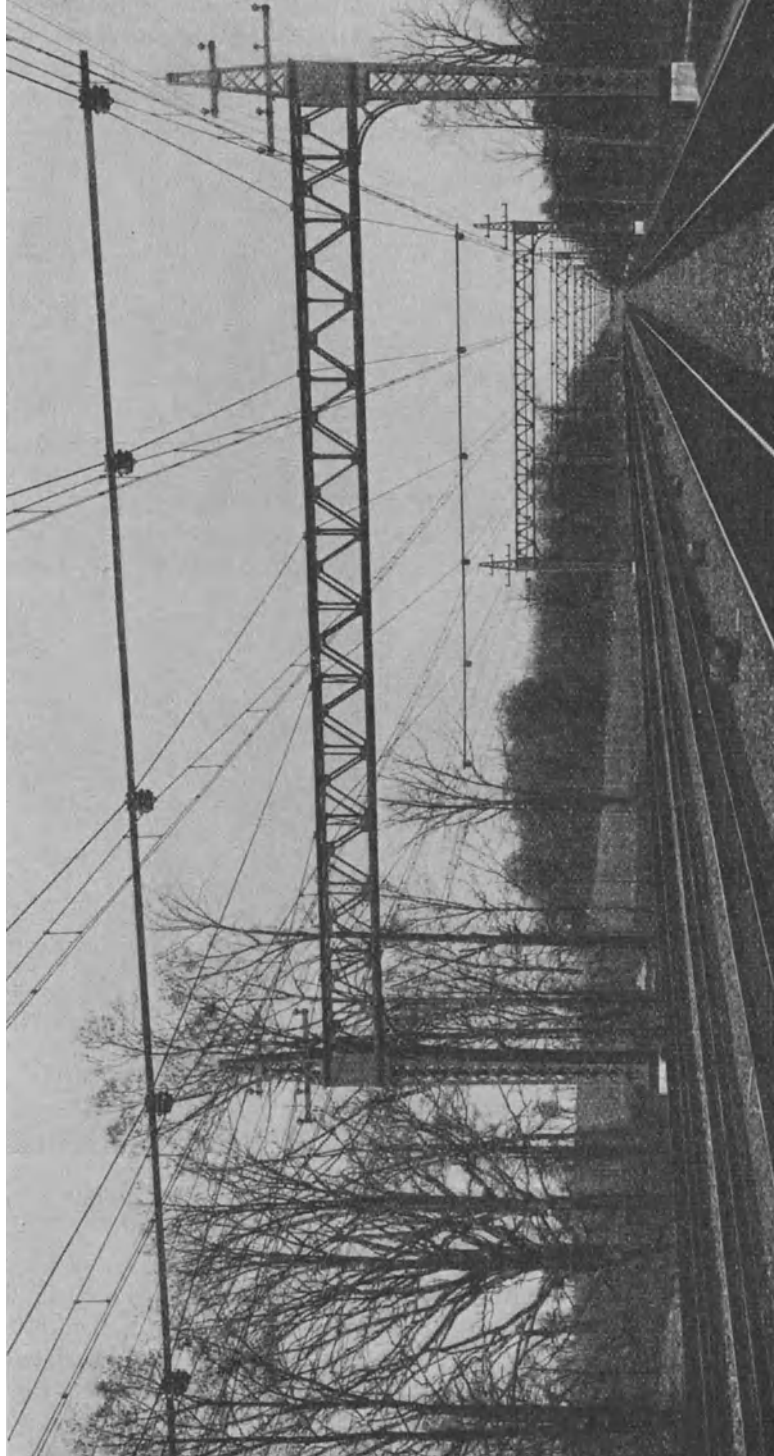


Abb. 77. Fahrleitung mit Verbundkettenwerk der New Haven-Bahn.

gebogenes, nahtloses Stahl- oder Bronzerohr zu ziehen und sodann zurückzubiegen (Abb. 79).

Die Festigkeit dieser Drahtverbindung ist auch ohne Lötung ausgezeichnet, ihre Herstellung außerordentlich einfach und gefährdet niemals den Draht.

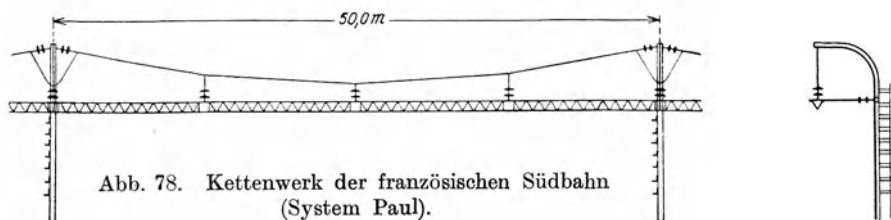


Abb. 78. Kettenwerk der französischen Südbahn (System Paul).

Die Gefahr der Beschädigung besteht bei den Seilverbindungen in noch höherem Maße; es ist daher beim Entwurf der Seilverbinder diesem Übelstand ein ganz besonderes Augenmerk zuzuwenden.

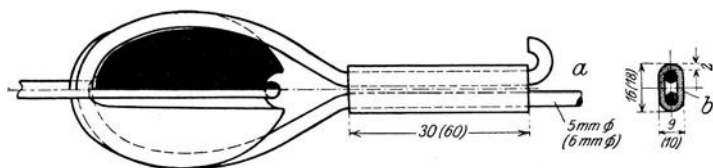


Abb. 79. Drahtbund für Spannkugelfestigung mit nahtlosem Rohr.



Abb. 80. Seilschloß.

Für kleinere Kräfte sind Niet- und Klemmverbinder (Abb. 51) ausreichend; diese verlangen jedoch, daß das freie Seilende abgebunden und verlötet wird.

Für größere Kräfte sind konische Kuppelköpfe (Abb. 80), wie sie bei Drahtseilbahnen gebräuchlich sind, geeignet. Sie werden in der Weise hergestellt, daß die

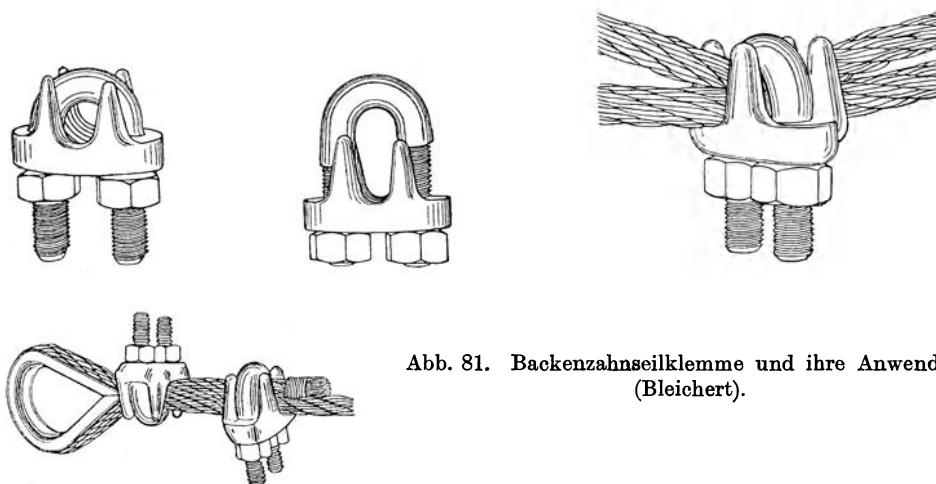


Abb. 81. Backenzahnseilklemme und ihre Anwendung (Bleichert).

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 Seilklemme nach dem System der Bleichertschen Backenzahnklemme stellt ebenfalls eine das Seil nicht verletzende Verbindung dar (Abb. 81).

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 geregelt werden kann; Verquetschungen des Tragseiles sind infolgedessen unvermeidlich.

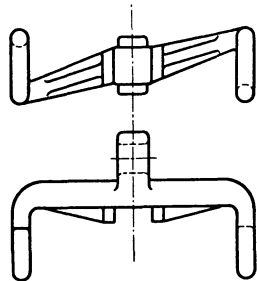


Abb. 82. Selbstspannende Seilklemme (AEGU).

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. 82 wird das Tragseil in einem leichten Knick durchgeführt; der durch den Knick verursachte Richtungswechsel in der Seilführung erzeugt die gewünschte Sperrkraft.

Zur Verbindung der Isolatorschlaufen, Seilkauschen und dergleichen eignen sich selbstsperrende Hakenschlösser, durch welche jegliche Schraubenverbindungen überflüssig werden (Abb. 83).

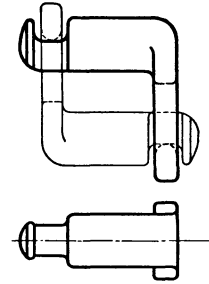


Abb. 83. Hakenschloß zur Verbindung von Bandschlaufen (AEGU).

Die Isolatoren:

- Altmann: Nouveaux isolateurs pour hautes tensions. LE 1920.
 Benischke: Versuche mit Hänge- und Stützisolatoren für sehr hohe Spannungen. ETZ 1910, H. 45.
 Brecht: Die Entwicklung der Wirksamkeit der amerikanischen Hochspannungsisolatoren. Eu.M 1913, H. 46.
 Buske: Tragketten aus Hängeisolatoren verschiedener Type. ETZ 1921, H. 19.
 Gastelnuovo: Neuer Hochspannungs-Hängeisolator. EW 1921, Bd. 77, S. 498. — ETZ 1921, H. 13.
 Gerstmeyer: Freileitungsisolatoren. EKB 1909, H. 19.
 Kock: Hochspannungsisolatoren für Freileitungen. Leipzig: Verl. Hachmeister & Thal 1921.
 Perrochet: Des isolateurs pour très haute tension. BSEV 1921, Nr. 11.
 Petersen: Hochspannungstechnik. Stuttgart: Enke 1911.
 Porzellanfabrik Hermsdorf, S.A.: Neuerungen an Hochspannungs-Freileitungsisolatoren. Eu.M 1919, H. 33.
 Rosenthal-Bucksath: Ein neuer Hängeisolator. ETZ 1921, H. 46. — 1922, H. 15. — Scheid: Bemerkungen hierzu. ETZ 1922, S. 1323.
 Rosenthal: Betriebserfahrungen an Hängeisolatoren. BSEV 1922, Nr. 1.
 Schendell: Isolatoren für Freileitungsnetze. Mitteil. Vereinig. Elektrizitätswerke. 1918, Nr. 22. Ref. Eu.M 1919, H. 11.
 Schmidt-Grubers: Maste und Isolatoren bei modernen Hochspannungsleitungen. Ref. Eu.M 1917, H. 41.
 Seefehner: Die Hängeisolatoren und die Sicherheit von Hochspannungsleitungen. Eu.M 1913, H. 8.
 Sothmann: Comparativ tests on high tension insulators. Proc. Dec. 1912. Ref. ETZ 1913, H. 18.
 Weicker: Über Hänge- und Abspannisolatoren. ETZ 1909, H. 26.
 Weicker: Betrachtungen über Hängeisolatoren. ETZ 1911, H. 50.
 Weicker: Bedeutung und Bau von Hängeisolatoren. ETZ 1911, H. 50.
 Weicker: Bedeutung und Bau von Hängeisolatoren. Helios 1911.
 Weicker: Neuere Gesichtspunkte zur Beurteilung von Hängeisolatoren. ETZ 1921, H. 51.
 Neuer verbesserter Kappenisolator. ETZ 1921, 17. Nov. Ref. ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 7.
 Italienische Normen für Hochspannungsisolatoren. Eta. 1921, Nr. 9. Ref. ETZ 1921, H. 48.
 Erfahrungen der italienischen Staatsbahnen mit Drehstromfahrleitungen. ETZ 1918, H. 12.

Fahrleitungen mit Vielfachaufhängung haben nur für höhere (über 1000 V) und hohe Spannungen eine Berechtigung; ausnahmsweise vielleicht auch 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 vereinzelt Fällen verwendet, wo man sich mit der einfachen Isolation nicht zufrieden geben wollte oder konnte. Seit der Stubaitalbahn (1904, 2500 V Wechselstrom. Abb. 84) beherrscht das Porzellan dieses Gebiet ausschließlich. Voraussetzung hierfür ist eine Formgebung, bei der das Porzellan nur auf Druck und niemals auf Zug, Biegung, Scherung oder gar Torsion beansprucht wird.

Die üblichen Porzellanglocken können diesen Anforderungen entsprechen, es ist nur nötig, die Stütze so tief in den Kopf einzulassen, daß der am Bund angreifende Seitenzug noch reichlich innerhalb der eingesetzten Länge der Stütze liegt. Glockenisolatoren können bis Spannungen von etwa 15 bis 20000 V aus einem Stück mit mechanisch widerstandsfähigen und zuverlässigen Bauformen hergestellt werden. Der Glockenisolator ist daher bei vielen Anordnungen zumindest als die eine Teilisolation anzutreffen (Abb. 71) und zwar, je nachdem ob eine Anordnung mit senkrechter oder wagrechter 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 Isolatorbruches kann das an der Kappe befestigte Tragseil nicht herabfallen.

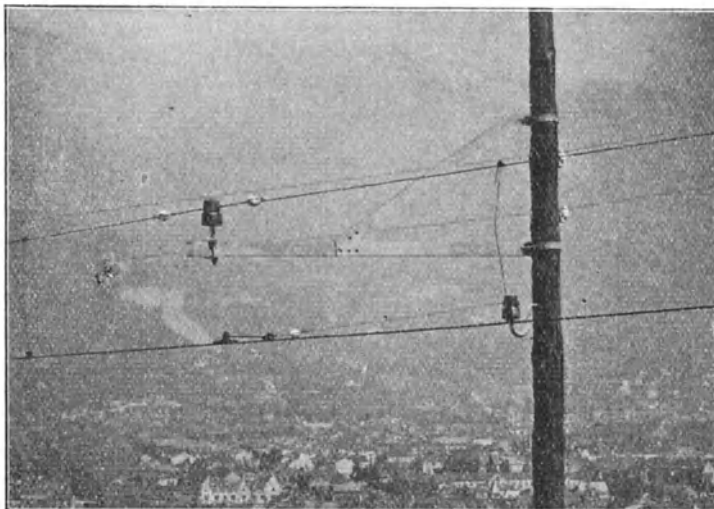


Abb. 84. Stütz- und Abspannisolator der Fahrleitung mit Einfachkettenwerk der Stubaitalbahn. 2500 V Betriebsspannung (AEGU).

Die Glockenisolatoren sind auch zu zweit in Reihe in das Tragseil oder in die Auszüge eingeschaltet worden. Diese Anordnung ist, wie ein Blick auf Abb. 75 lehrt, nicht bruchsicher, außerdem sind die Isolatoren sehr ungünstig beansprucht.

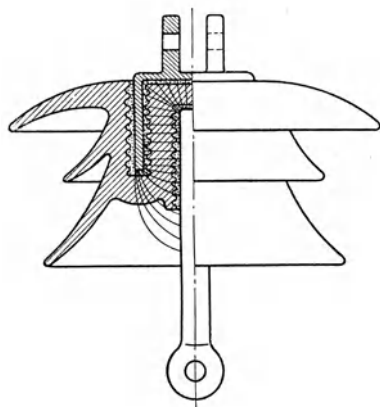


Abb. 85. Abspannisolator mit eingekitteter Kappe und eingekittetem Bolzen (Bauart P. F. Hermsdorf).

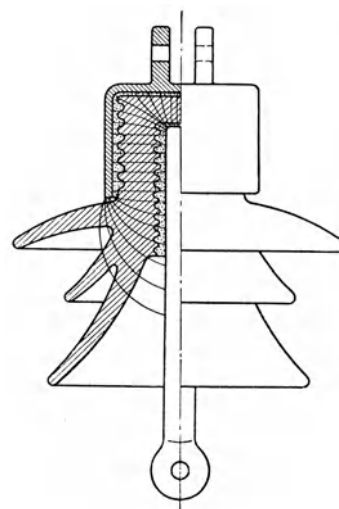


Abb. 86. Hängeisolator der Deltaform mit aufgekitteter Kappe und eingekittetem Bolzen (Bauart P. F. Hermsdorf).

Obwohl es grundsätzlich abzulehnen ist, einer oft nicht wetterbeständigen und in ihrem Gefüge willkürlichen Abweichungen unterworfenen Masse die Sicherheit der ganzen Fahrdrähtanlage anzuvertrauen (Abb. 85 und 86), hat man namentlich in Amerika das ganze Kettenwerk auf Glocken aufgehängt (Abb. 87), bei welchen das Bindemittel zwischen Isolator und Armaturen auf Scherung 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 vorgesehen ist. Die verwendeten Isolatoren haben beträchtliche Abmessungen und 5,9 kg Gewicht; sie werden mit 100 kV geprüft (Abb. 88).

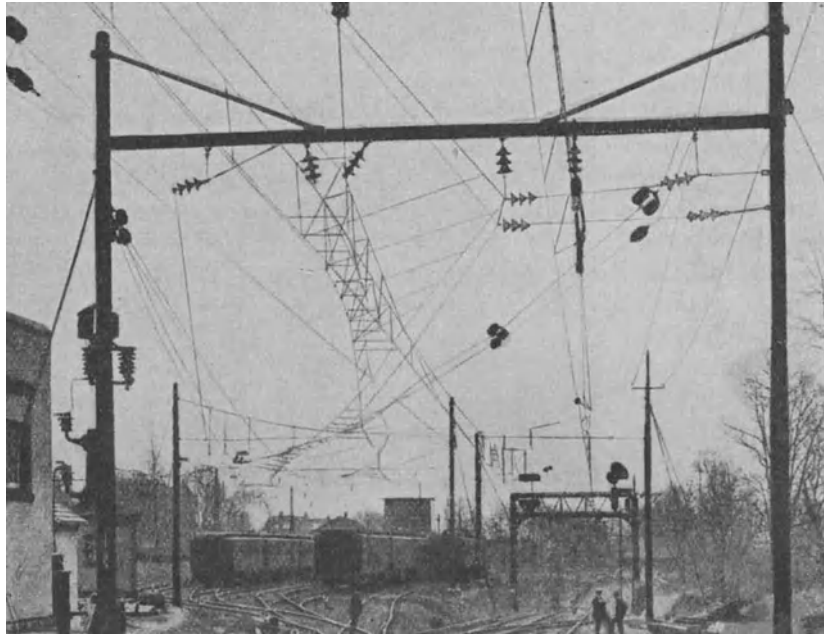


Abb. 87. Kettenwerk einer Bahnhofsanlage mit Hängeisolatoren mit aufgekitteten Kappen. 11000 V (West).

Die Glockenform erscheint bei einer anderen Anordnung mit wagrechter Achse beibehalten. Zwei Glockenisolatoren mit breitem, zur Anbringung einer Schelle ge-

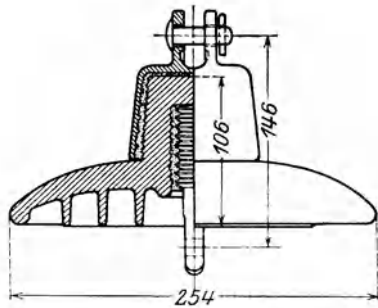


Abb. 88. Hängeisolator mit aufgekitteter Kappe und eingekittetem Bolzen. New Haven-Bahn, 11 000 V, Gew. 5,9 kg. (West.)

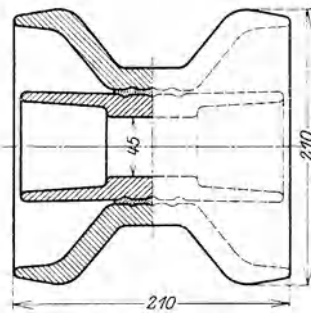


Abb. 89. Kelchisolator für Anordnung mit wagrechter Achse. Preuß. Staatsb., 15 000 V.

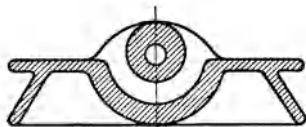


Abb. 90. Schnitt durch den Hewlett-Kettengliedhängeisolator.

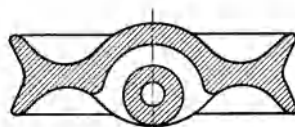


Abb. 91. Schnitt durch den Hewlett-Kettengliedabspannisolator.



Abb. 92. Hewlett-Hängeisolatorkette.

eigenem Bund sitzen an den beiden Enden einer meist aus Gasrohr hergestellten Achse, die durch einen sog. Doppelkelchisolator, der in ihrer Mitte sitzt, gezogen ist (Abb. 89). Der Kelchisolator entsteht aus der Glocke durch symmetrische Verdoppelung des Schirmes und Durchbohrung. Bei sorgfältiger Ausführung ist diese Anordnung einwandfrei; ferner 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 löst, bruchsicher.

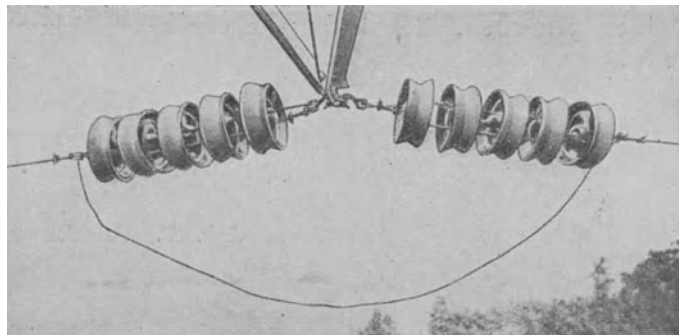


Abb. 93. Hewlett-Abspannisolator-kette.

Vollständig bruchsichere Anordnungen lassen sich mit Kettenglied-Isolatoren herstellen. Diese entstehen aus den Spannkugeln durch isolierte Verkleidung der gekreuzten Kanäle. Mechanisch beansprucht — und zwar ausschließlich auf Druck — ist bei dieser Bauart nur der von den gekreuzten Kanälen umschlossene Kern. Diese Type ist von den Amerikanern für Hochvoltleitungen entwickelt worden. Durch Hintereinanderschaltung 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 von 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 für Mehrfachisolatoren



Abb. 94. Dreiteiliger Kettenglied-Hängeisolator für 50 bis 60 kV (AEGU).

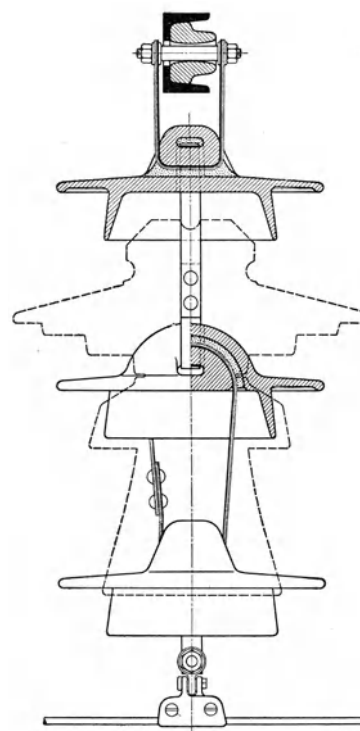


Abb. 95. Vergleichende Darstellung der senkrechten Baulänge einer Hängeisolation für 60 kV gegenübergestellt einem Stützisolator für 50 kV (AEGU).

Glocken mit aufgesetzten Kappen und eingekitteten Bolzen vor. Die Ergebnisse der ersten Ausführungen mit Kettengliedisolatoren waren unbefriedigend. Versagt hat aber nicht die Kettengliedanordnung, sondern die elektrisch ganz unzulängliche Formgebung (Abb. 90 bis 93) 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 Durchrosten der Hängeseile, wozu noch der Umstand beitrug, daß die Isolatoren um diese Seile als Achsen pendelten, die hierbei die Glasur abscheuerten, somit auch den Isolator beschädigten.

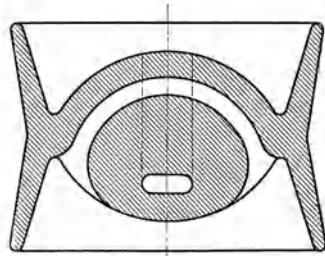


Abb. 96. Kettenglied-Abspannisolator für 8000 kg Bruchlast, 36 kV Überschlagnspannung bei Regen. (AEGU-Rosenthal.)

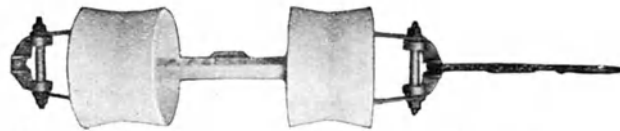


Abb. 97. Verankerungsisolation für eine 15 kV-Fahrleitung. (AEGU.)

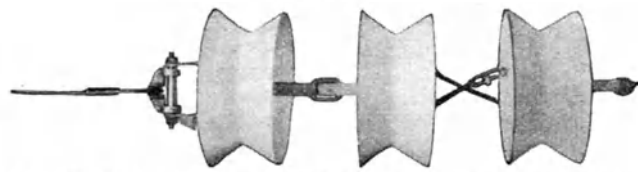


Abb. 98. Dreiteiliger Kettenglied-Abspannisolator für 50–60 kV. (AEGU.)

Die vom Verfasser angegebenen Bauarten sind von diesen Mängeln frei. Sowohl die für gerade Strecken verwendeten Hängeglocken (Abb. 94, 95) als die Abspannisolatoren (Abb. 96, 97, 98) sind nach den für Standisolatoren bewährten Regeln 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 Masse gegen Eindringen von Wasser verschlossen.

Die konstruktiv einwandfreie Formgebung der in Abb. 96 dargestellten Kettengliedisolatoren kommt in der hohen Bruchlast und den verhältnismäßig geringen Abweichungen der Bruchfestigkeiten zahlreicher Proben vom Mittelwert zum Ausdruck.

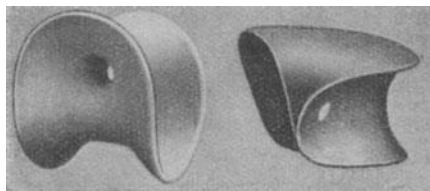


Abb. 99. Kettengliedisolator, System Mailon. (Franz. Südbahn, 4 Einheiten, 12 kV.)

Der Hängeisolator (Abb. 94) mit 85 kV Überschlagnspannung in trockenem und 46 kV in nassem Zustand (schiefer Regen) besitzt eine mittlere Bruchfestigkeit von 4257 kg bei einem Eigengewicht von nur 3,1 kg.

Der Abspannisolator (Abb. 98) mit 250 mm Durchmesser verträgt 4200 kg bei 81 bzw. 45 kV und hat 4,4 kg Gewicht.

Besonders bemerkenswert ist die Leistung des Abspannisolatoren (Abb. 96), der bei 65 bzw. 47 kV Überschlagnspannung 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.

Die dargestellten Typen sind sämtlich für die Regelspannung von Vollbahnen von rund 15000 V bestimmt. Für niedrigere Spannungen kommen entsprechend kleiner bemessene Formen in Betracht.

Streckentrennung, Schal-
tung, Blitzschutz. Die an die Viel-
fachaufhängung zu stellende Haupt-
forderung, die gleichmäßige Ge-
schmeidigkeit der Leitung zu wahren,
läßt sich insbesondere schwer bei der
Anordnung von Streckentrennungen
erfüllen. Ursprünglich hat man in
Nachahmung der bei Straßenbah-
nen üblichen Bauarten besondere
Streckenisolatoren in die Leitung
eingebaut. Diese Anordnungen be-
friedigen ohne Ausnahme nicht, weil
sie stets ein beträchtliches Gewicht
aufweisen, daher zu Stößen in der
Leitung Anlaß geben (Abb. 100 u.
101). Neuzeitliche Bauarten ver-
zichten auf besondere Isolatoren und
sehen eine isolierte Nebeneinander-
führung der beiden zu trennenden
Leitungen vor. Bei den Strecken-
trennungen dieser Art läßt sich ohne
Aufstellung mehrerer sonst nicht nö-
tiger Stützpunkte nicht vermeiden,
daß der Stromabnehmer die beiden
voneinander zu trennenden Streck-
kenteile verbindet, indem er die
Streckentrennung überbrückt. Ist
der abgetrennte Streckenteil ge-
erdet, so entsteht ein Kurzschluß.
Diesem Übelstand kann durch Ein-
legung eines isolierten Leitungsstückes,
dessen Länge größer sein muß als die
Entfernung zweier in einem Zug vor-
kommender parallel geschalteter
Stromabnehmer, ab-
geholfen werden.

Streckentrennungen sind grundsätzlich vor
und hinter jedem Bahnhof vorzusehen
und eine Umgehungsleitung hat dafür
zu sorgen, daß die ununterbrochene
Stromzufuhr der Strecke auch bei
abgeschaltetem Bahnhof gewahrt
bleibt (Abb. 102 u. 103). Je nach
den Anforderungen des Betriebes
wird eine Unterteilung der Leitungs-
anlage der Bahnhöfe vorzusehen
sein, wobei als Grundsatz gilt,
daß, ebenso wie die Weichenstraßen
von einer dem Betriebsamt zugäng-
lichen Stelle bedient werden, auch
die Schalter für die einzelnen
Gebiete des Bahnhofes von einer
Stelle zu betätigen sind.

Als Schalter sind in der Mehrzahl
der Fälle Freiluftschalter mit
Funkenlöschhörnern in Verwendung,
die in angemessener Höhe auf den
Masten montiert werden. Das Ge-
stänge der Schalter ist versper-
rbar einzurichten und mit geeig-
neten Lichtsignalen, in

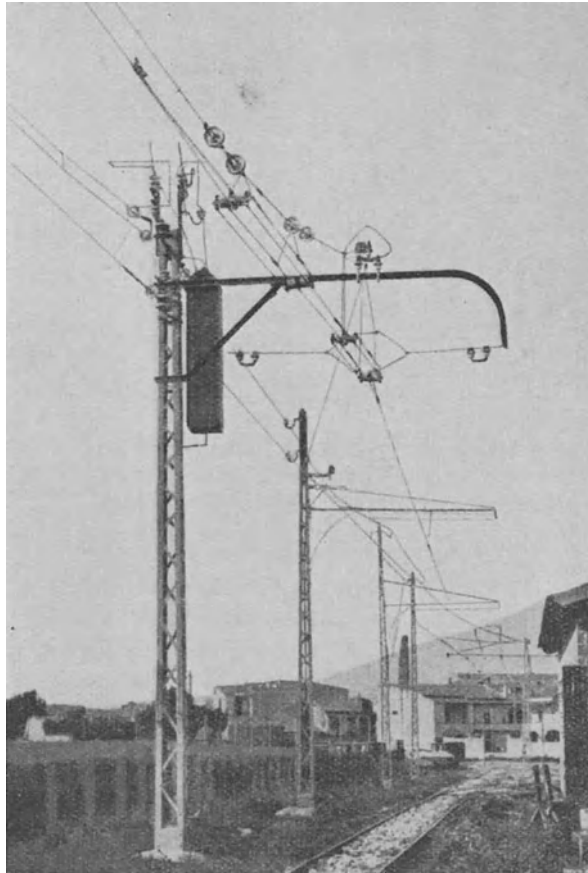


Abb. 100. Streckentrennung, 6000 V. Neapel-Piedimonte.

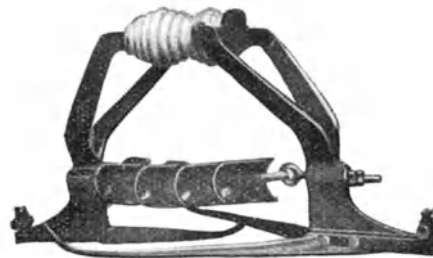
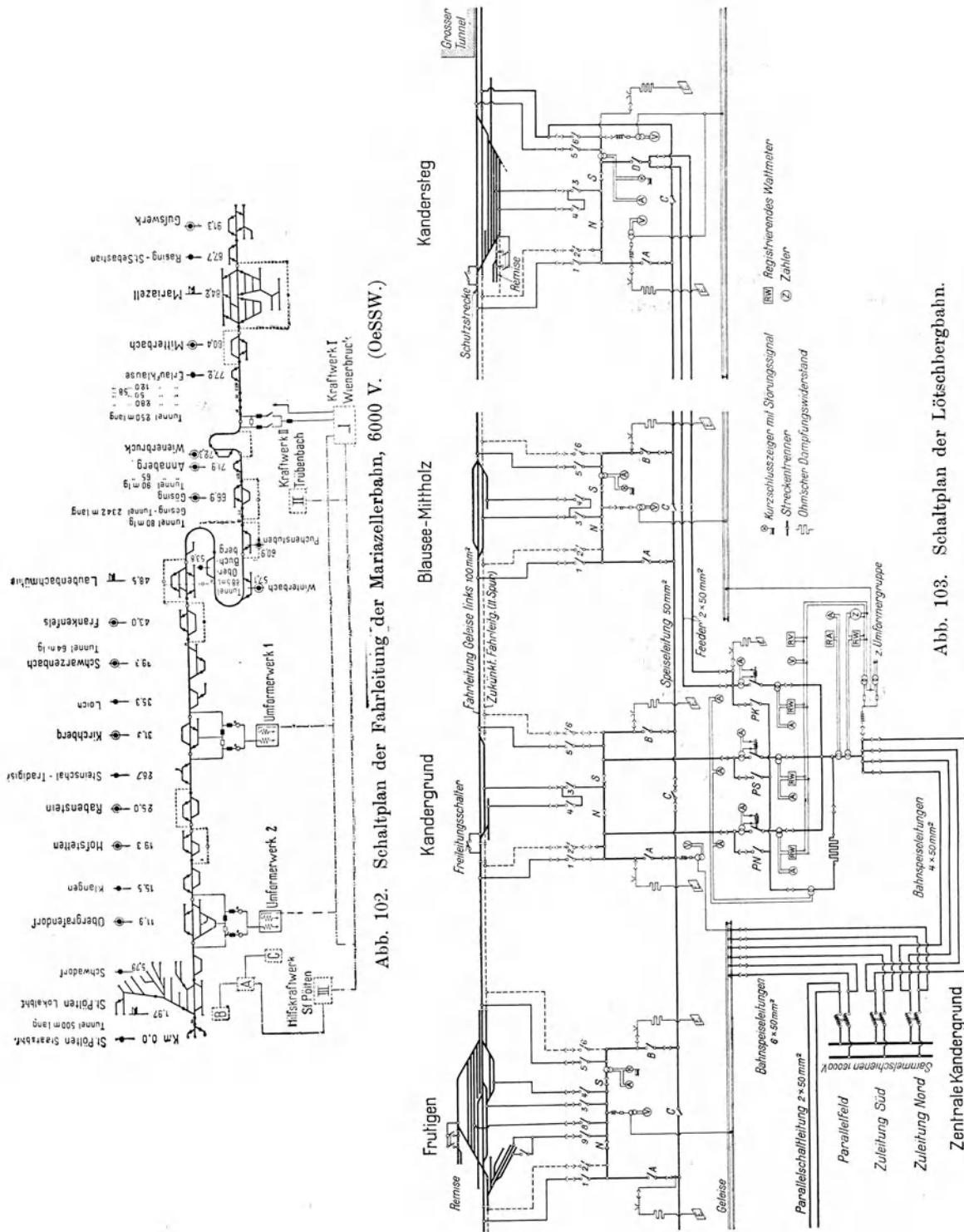


Abb. 101. Streckentrenner, 12 kV.
Franz. Südbahn.



besonderen Fällen (Schuppengleisen) mit akustischen Signalen, zu kuppeln, damit der elektrische Zustand einer Leitung am Signal sofort zu erkennen ist.

Blitzschutzeinrichtungen sind vielfach die Quelle von Überspannungen; man unterläßt es daher, solche, außer in den Transformatorstationen, vorzusehen.

4. Fahrleitung mit Stromschiene.

- Stromzuführungsschienen für 2400 V. ERJ Bd. 44, S. 376. — Ref. ETZ 1916, H. 31.
 Stromschiene und Fahrleitung auf der West-Jersey- und Seashore-Bahn. Proc. 1915, Bd. 34, S. 1237. — Ref. ETZ 1918, H. 1.
 Types of third-rail used in railway electrification. ERJ 1919, Bd. 53, Nr. 24.
 Jones: Top contact unprotected conductor rail for 600 V traction systems. Proc. 1915, Bd. 34.
 Anordnung der III. Schiene in den V.S. von Nord-Amerika. GA Nr. 726, S. 121.
 Stromzuleitung der Great Western Railway. El. 1907.
 Die Londoner Untergrundbahn. E.R. London 4. I. 1907.
 Stromschienen für die neuen Stadtschnellbahnen von New York. ERJ Bd. 48, S. 543. — Ref. ETZ 1917, 15. II. — EKB 1915, H. 18.
 Tracy: High voltage third-rail construction. ERJ 1915, Bd. 45, Nr. 10.
 Nood contact rail installation in England. ERJ 1915, Bd. 46, Nr. 4.
 Girder and high third-rail renewals. ERJ 1915, Bd. 46, Nr. 19.
 Third-rail systems of the U. S. A. ET Nov. 1921.
 History and comments on the third-rail system. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 17.

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, so 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.

Die Querschnittsform muß schließlich eine bequeme Befestigung und einfache Verlaschung ermöglichen.

Welche Bedeutung diesen Gesichtspunkten zukommt, geht aus den amerikanischen Berichten hervor. Diesen ist zu entnehmen, daß die Stromschienen 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.

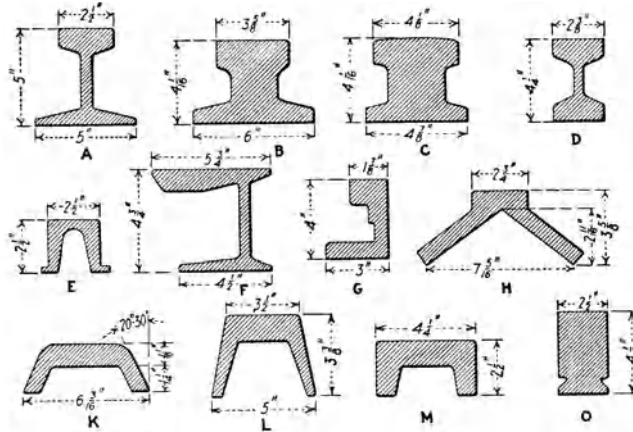


Abb. 104. Querschnittsformen von Stromschienen. (Maße Zoll engl.)

Die Vielgestaltigkeit der gebräuchlichen Querschnittsformen ist den Abb. 104 und 105 zu entnehmen, in welchen die wichtigsten Typen dargestellt sind.

Die Schienen werden mit unterer (Abb. 110) und oberer Bestreichung (Abb. 105 bis 109) 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 und der Schutz gegen Berührung nur unvollkommen ausführbar ist.

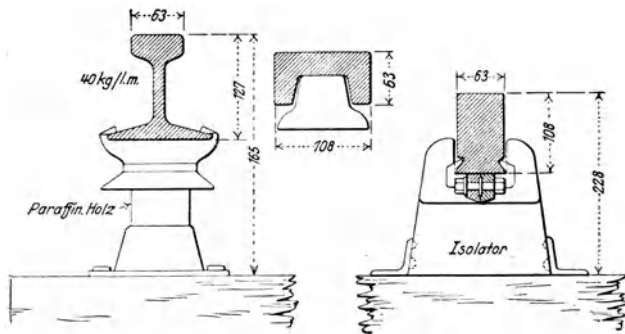


Abb. 105. Stromschienenanordnung mit oberer Bestreichung.

Die untere Stromabnahme (Abb. 110) 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 auch die Entfernung von der zunächst gelegenen Schiene (Innenkante) — die Spurweite — Einschränkungen unterworfen.

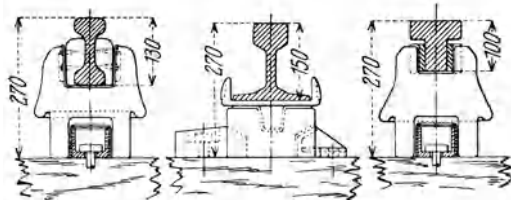


Abb. 106. Anordnungen der Stromschiene bei der Pariser Metro.

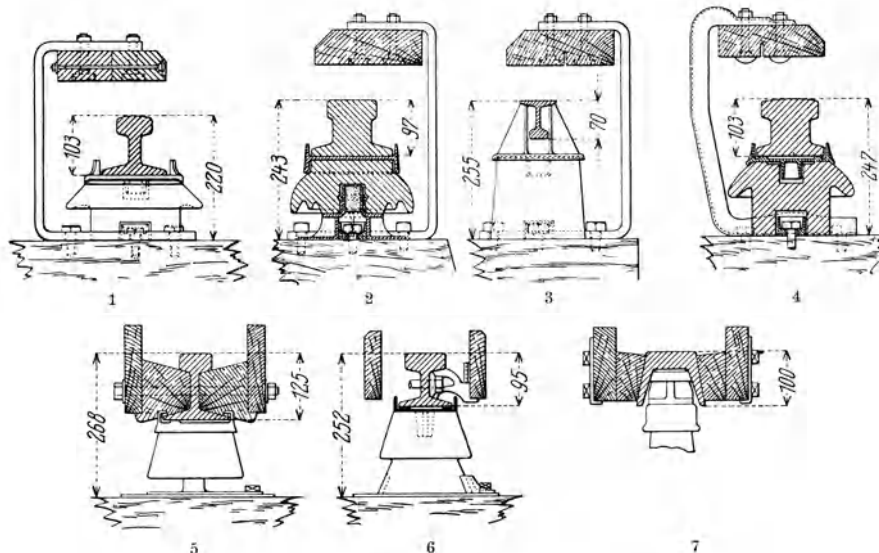


Abb. 107. Amerikanische Anordnungen der Stromschiene und des Schienenschutzes mit oberer Bestreichung. Regelspannung bis 650 V.

1. Philadelphia- und Westernbahn; 2. Pennsylvaniantunnel; 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.

Diese Stromschienspурweite findet man mit 508 bis 762 mm bemessen. Die amerikanischen Eisenbahnunternehmen trachten in diesem Belange zu einer

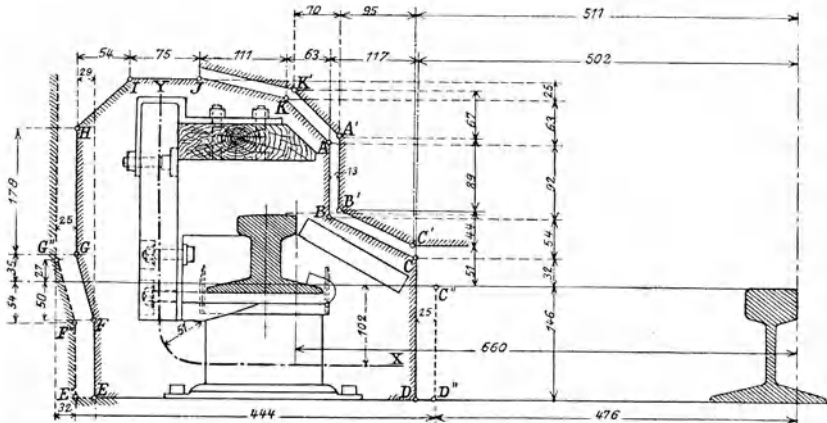


Abb. 108. Umgrenzungslinie für die Stromschiene der Long-Island-Bahn.

Einheitlichkeit zu gelangen, um die Freizügigkeit der Fahrzeuge zu wahren. Die derzeit geltenden Umgrenzungprofile sind in Abb. 108, 109 u. 110 dargestellt.

Die Stromschiene war bis vor kurzem ausschließlich für 650 V Betriebsspannung eingerichtet. In elektrischer Beziehung waren die Isolatoren ohne Schwierigkeiten herzustellen, wogegen die Anforderungen an deren mechanische Festigkeit in den Vordergrund traten. Die Isolatoren werden in Entfernungen von 3 bis 6 m angeordnet, sie haben daher nicht unbeträchtliche Gewichte zu tragen. Man verwendet zu diesem Zweck glockenförmige Körper oder entsprechend mit Fuß und

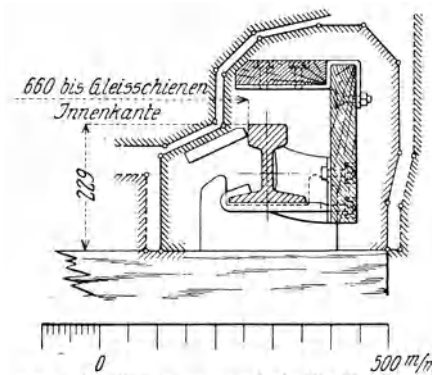


Abb. 109. Umgrenzungslinie für die Stromschiene der West Jersey- und Seashore-Bahn.

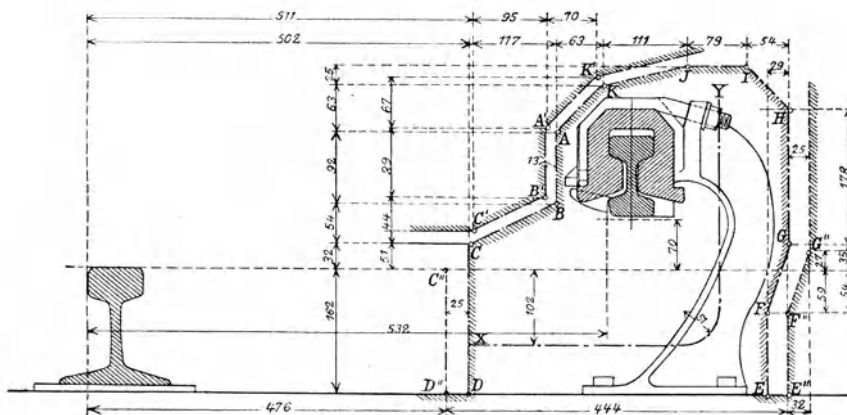


Abb. 110. Umgrenzungslinie für die Stromschiene mit unterer Bestreichung, New York-Zentralbahn.

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.

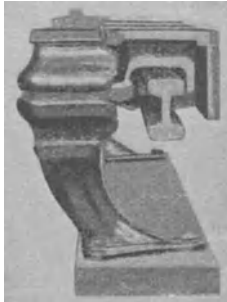


Abb. 111. Anordnung der Stromschiene für 1200 V Betriebsspannung.

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 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 Verschaltung 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 V und dann auf 2400 V gesteigert und hierfür die letztbeschriebene Anordnung der N. Y.-Zentralbahn mit unterer Stromabnahme gewählt, wobei allerdings eine hochwertige Isolation Anwendung gefunden hat, und die Schutzumhüllungen isoliert von der Stromschiene angeordnet sind (Abb. 111).

Ganz unzureichend ist der nur seitlich angebrachte Schutz der mit 2400 V betriebenen Stromschiene der Michiganbahn (Abb. 112).

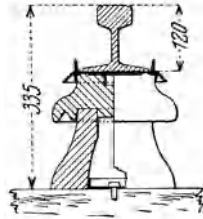
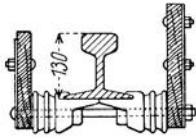


Abb. 112. Anordnung der Stromschiene und des seitlichen Schutzes der Michiganbahn, 1200 V Betriebsspannung.

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 bei den Unterbrechungen der Stromschiene der Lichtbogen auf das Fahrzeug über-

schlägt, ein gewiß nicht erwünschter Vorgang.

Die Betriebssicherheit kann im Winter unter klimatisch ungünstigen Verhältnissen nicht befriedigen.



Abb. 113. Einfahrt in die Stromschiene.

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. 113).

Die rasche Stromunterbrechung beim Ablauf 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, so bleiben die Fahrzeugmotoren angeschaltet und es entsteht bei Wiederberührung ein heftiger Stoß.

Die Stromschienen werden zur Sicherung der guten Leitfähigkeit in möglichst großen Walzlängen erzeugt; an den Stößen wird 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 $\frac{1}{8}$ erzielt wird.

Die höchste Leitfähigkeit von $\frac{1}{6}$ des Kupfers wird von Richey für eine Weicheisenschiene genannt, die nur 0,028% Kohlenstoff, Spuren von Mangan, 0,004% Phosphor, 0,005% Schwefel, 0,07% Silizium enthält.

Die Stromschiene der London and North Western-Bahn (52 kg/m) weist eine Leitfähigkeit von 1:6,5 des Kupfers auf. Dieselbe wird aus weichem Stahl folgender Zusammensetzung erzeugt: C = 0,044%, Mn = 0,139%, Si = 0,030%, P = 0,011%, δ = 0,029% und Ni = 0,255%.

Dover gibt für die in England verwendeten Stromschienen Widerstandswerte an, die den 6,4- bis 7,5fachen Wert des Kupfers erreichen.

5. Die Unterleitung. Die älteste technisch einwandfrei ausgeführte Unterleitungsanordnung für Straßenbahnen (Abb. 114) stammt von Siemens & Halske und wurde erstmalig in Budapest und dann auch in großem Umfang in Wien ausgeführt. Die eine Fahrtschiene 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 (Abb. 116) 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

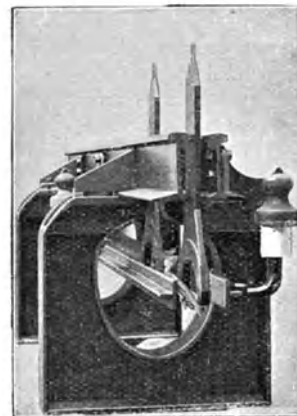


Abb. 114. Anordnung der unterirdischen Stromzuführung. (S.u.H.)

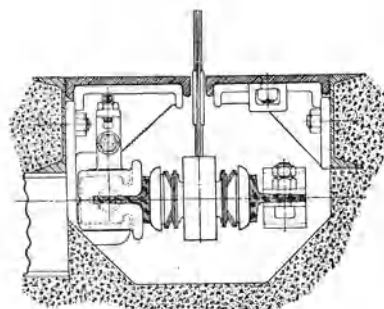


Abb. 115. Anordnung der unterirdischen Stromschiene für die Treidelokomotiven am Panamakanal.

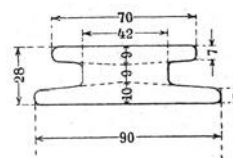


Abb. 116. Stromschiene für Unterleitung (Wien).

entsprechend baut und man sich an die Fahrleitungen als Zubehör des verkehrsreichen Städtebildes gewöhnt hat, ist dieses System verlassen worden.

6. Die Rückleitung.

Alvensleben: Einfluß der Streuströme elektrischer Grubenbahnen auf die Sicherheit des Grubenbetriebes. Eu.M 1917, H. 9.

Böhm-Raffay: Zurück durch die Erde. ENA 1904, S. 21.

Hering: Die Messung der vagabundierenden Ströme in Rohrleitungen. Proc. 1912, Nr. 6. — Ref. Eu.M 1912, H. 33.

Hermann: Einwirkung elektrischer Ströme auf Gas- und Wasserleitungsrohre in Gablonz. Journ. f. Gasbeleuchtung. Bd. 57, S. 88. — Ref. ETZ 1917, H. 1.

Rosa-Collum: Verminderung der Streustromschäden. — Technologic papers of the bureau of standards. Nr. 52. — Ref. ETZ 1918, H. 41 u. H. 25. — Eu.M 1916, H. 38 u. 40.

Die elektrischen Schienenstoßverbindungen. ETZ 1918, H. 23.

Schutz gegen Zerstörungen durch elektrische Streuströme. EN Bd. 72, S. 1012. — ETZ 1917, H. 1.

Sur les perthes de courant, qui se produisent le long des voies de tramways. RGE 1920, Nr. 6.

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 zufolge der großen Anzahl der in Reihe geschalteten Verbinder den gesamten Widerstand beträchtlich vermehrt.

Nichtsdestoweniger wird der Widerstand der Rückleitung stets nur einen Bruchteil desjenigen einer Oberleitung erreichen. Es wird daher der auf die Rückleitung entfallende Anteil des Spannungsabfalles auch nur einen geringen Teil des gesamten in der Leitung zugelassenen Spannungsverlustes darstellen.

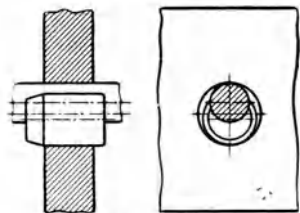


Abb. 117. Mit Rundkeil eingeklemmte Schienenstoßverbindung.

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 Spannungsfall in den Schienen gewisse, durch die Erfahrung ermittelte Werte nicht übersteigen. Dies gilt in erster Linie für Bahnen, die sich in verbaulichem Stadtgebiet befinden, für welche die Erdstromvorschriften einen Spannungsabfall von höchstens 1 V pro km und insgesamt nicht mehr als 2 bis 4 V 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 bilden und verschiedenen, sich zum Teil widersprechenden Bedingungen entsprechen.

Die Berührung zwischen Schiene und Verbinder muß dauernd vorhanden sein und darf sich insbesondere 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 darf 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 10prozentige Vermehrung kann schon als sehr gutes Ergebnis angesehen werden.

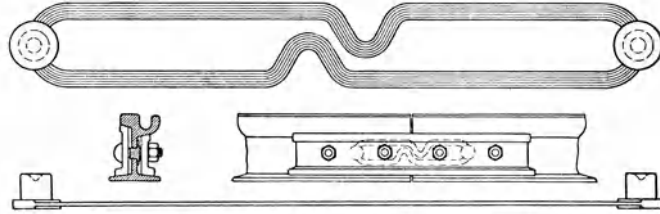


Abb. 118. Unterlaschenverbinder mit Preßköpfen.

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 restlos ideale Lösung der Aufgabe darstellt.

Für leichte Schienen — Gruben- und Industriebahnen — verwendet man als Stoßverbinder Weichkupferdrähte von nicht unter 50 qmm Querschnitt, die, der Schienen-

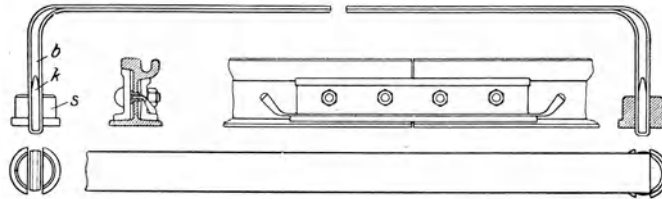


Abb. 119. Schienenstoßverbinder mit Keilbefestigung.

dehnung entsprechend S- oder \cap -förmig gebogen, neben die Laschen gelegt und mit ihren Enden mit gebohrten Rundkeilen — Channel pins — in die blankgescheuerten Steglöcher eingetrieben werden (Abb. 117).

Der freiliegende Verbinder ist Verletzungen ausgesetzt und kann auch leicht entwendet werden.

Bei Straßenbahnen werden in der Regel Schienenverbinder mit nicht weniger als 100 qmm Querschnitt verwendet.

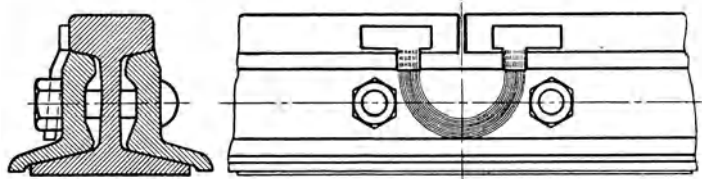


Abb. 120. An den Schienenkopf angelötete Stoßverbindung.

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. 118, 121). Die Drahtenden werden in den Kopf eingepreßt und dieser mit 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 mm lang sein müssen. Wo wegen der Laschen diese Anordnung nicht ausführbar ist, preßt man die Kontaktköpfe in konisch ausgebohrte Löcher des Schienenfußes.

Vielfach lötet man kurze Kupferbänder seitlich an den Schienenkopf oder den Schienensteg (Abb. 120, 121).

Verschweißte (Abb. 122) oder umgossene Schienenstöße bilden an sich gut leitende Stoßverbinder, man verwendet sie jedoch nicht allgemein, weil eine nicht

lösbarer Verlaschung schwierig in Stand zu halten ist. Größere Ausbreitung hat die Herstellung von angeschweißten Verbindern nach dem Goldschmithschen aluminothermischen Verfahren gewonnen, bei welchem verhältnismäßig kleine Querschnitte verschweißt werden.

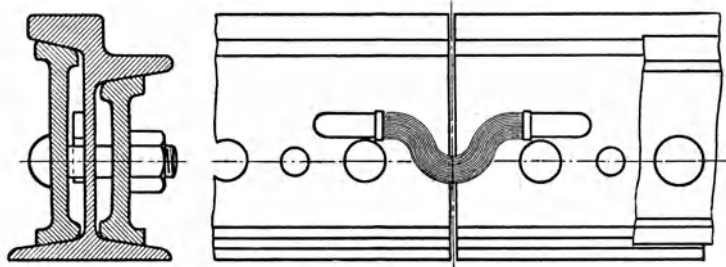


Abb. 121. Angelöteter Unterlaschenverbinder.

Der Scheinigsche Schienenschuh (Abb. 123) mit eingesetzten Zinkblechbeilagen bildet eine gute Stoßverbindung und macht Kupferverbinder entbehrlich.

Aussichtsreich und den eisenbahntechnischen Bedingungen entsprechend sind Schienenstöße, die nach dem Schoopschen Metallspritzverfahren hergestellt sind. Bei diesem Verfahren werden die von den gewöhnlichen Laschen berührten Flächen am Schienenkopf und -fuß zunächst blank geschleudert und dann mit einer nicht rostenden Metallschicht — Zink, Kupfer, Aluminium — bedeckt.

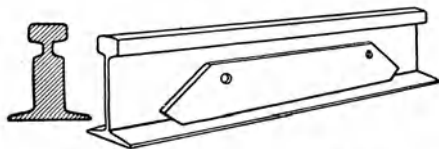


Abb. 122. Im Lichtbogen geschweißte Stoßverbindung.

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 können 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.

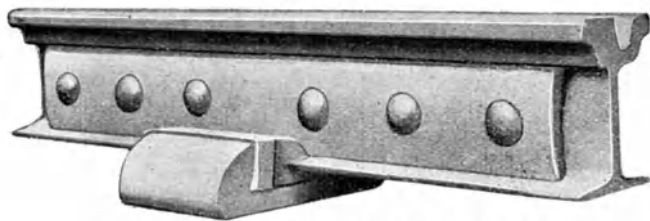


Abb. 123. Scheinigscher Schienenschuh.

Als Querverbinder kommen Kupferdrähte und Kupfer- oder Eisenseile, die mit Kontaktköpfen wie die Längsverbinder versehen sind, in Betracht.

Vom Standpunkt des Schutzes benachbarter Rohr- und Kabelleitungen gegen elektrolytische Zerstörungen ist eine möglichst isolierte Verlegung des als Rück-

leitung dienenden Oberbaues anzustreben. Betonunterlagen, gut entwässerte Sand- und Bruchsteinpacklager, hölzerne Schwellen 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 verlegt, jeder Mast mit den Schienen verbunden und diese in angemessenen Entfernungen von etwa 2 bis 5 km im Grundwasser gut geerdet.

Durch dieses Verfahren wird das Schienenpotential möglichst herabgesetzt und dessen Störungsquellen beseitigt.

Vierter Teil.

Die Fahrzeuge.

Bewegungsgesetze der Züge.

I. Die Bahnwiderstände.

- Adler: Die Entwicklung der Kugellager und ihre Verwendung bei Straßenbahnwagen. Eu.M 1917, H. 43.
- Adler: Wirtschaftliches Fahren elektrischer Bahnen. VT 1920. — Ref. ETZ 1920, H. 48.
- Baum: Schiene und Radreifen. G.A. 1916, Nr. 938.
- Bethge: Die kürzeste Zugfolge für städtische Schnellbahnen unter besonderer Berücksichtigung der Zuglänge. EKB 1913, H. 11.
- Bethge: Feldschwächung der Motoren bei Gleichstrombahnen. EKB 1918, H. 9.
- Bethge: Der Zeitrückhalt bei städtischen Schnell- und Straßenbahnen, seine Bedeutung für den Betrieb sowie für den Stromverbrauch usw. EKB 1918, H. 5.
- Boedecker: Der Bogenwiderstand steifachsiger Eisenbahnwagen. ZBEBV 1916, Nr. 52.
- Brusch und Bürke: Die Grenzen der Leistungsfähigkeit von Stadtbahnen. EKB 1913.
- Buchwald: Beziehungen zwischen Bahnkrümmung und Steigung. EKB 1912, H. 24.
- Broussoux und Demany: Entwurf von Fahrplänen elektrischer Bahnen. TM 1919, Nr. 7.
- Buchli: Führung und Lauf des Lokomotivrades im Geleise. SBZ 1923, Bd. 82, Nr. 10.
- Caesar: Bildliche Eisenbahnfahrpläne. GA 1922, Nr. 1069.
- Christiansen: Die theoretische Bedeutung der Anfahrbeschleunigung für die Leistungsfähigkeit der Stadtschnellbahnen. GA 1919, Nr. 1 bis 12.
- Ewing: Initial resistance to car motion. ERJ Nov. 1916.
- Giese: Fahrplangestaltung und Zugfolge der Straßenbahnen. VT 1921, H. 30.
- Glinski: Der Bewegungswiderstand der Eisenbahnfahrzeuge. GA 1918, Nr. 989.
- Guhl: Erfahrungen mit Kugellagern im Betriebe der Rhätischen Bahn. SBZ 1915, Bd. 65, Nr. 13.
- Hausmann: Über Radlaufflächen 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: Wälzlager und ihre Verwendung im Eisenbahnbetrieb. Fördertechn. u. Frachtverkehr 1921, H. 5.
- Hochenegg: Graphische Ermittlung des Verhältnisses des Wagengewichtes zum Treibgewicht. EKB 1909, H. 28.
- Hort: Die zweckmäßigste Bezugsvariable bei der Geschwindigkeitsregistrierung im Eisenbahnbetrieb. VT 1921, H. 1.
- Hruschka: Grundlagen der Zugförderung beim elektrischen Betriebe der k. k. öst. Staatsbahnen. EKB 1910, H. 25.
- Hruschka: Allgemeines und umkehrbares bildliches Staffelfverfahren zur wechselseitigen Ermittlung sämtlicher Zugförderungsgrößen im Bahnbetrieb. EKB 1910, H. 2.
- Hruschka: Bahntechnische Forderungen an den elektrischen Vollbahnbetrieb. Eu.M 1908, H. 23.
- Jahn: Die Beziehungen zwischen Rad und Schiene hinsichtlich des Kräftespiels und der Bewegungsverhältnisse. ZVDI 1918, S. 121.
- Jahn: Rad und Schiene. ZVDI 1918.
- Jahn: Zur Lehre vom Fahrplan. GA 1922, Nr. 1082.
- Kadrnozka: Graphische Darstellung der Bewegungsgrößen elektrisch betriebener Fahrzeuge. EB 1904, H. 21.
- Kilchenmann: Betriebserfahrungen bei der elektrischen Zugförderung am Simplon. EKB 1913, H. 21.
- Knorr: Apparat zur selbsttätigen Aufzeichnung des Fahrdiagrammes. EKB 1914, H. 16.

- Knorr: Die Lösung von Differentialgleichungen auf mechanischem Wege mittels des Fahrgraphen. EKB 1921, H. 23.
- Kreissig: Die Bemessung des Bremseffektes bei Straßenbahnwagen unter Berücksichtigung der Massenwirkung der Radkrümmung und der Bremsklotzhängung. EKB 1917.
- Kummer: Auslauf-Fahrlinien in vereinfachter und richtiger Darstellung. SBZ 1920, Bd. 76, Nr. 17.
- Kummer: Die virtuellen Längen der Eisenbahnen. SBZ 1916, Nr. 25.
- Markt: Rollwiderstand und Massenwirkung umlaufender Getriebe der Einphasenlokomotiven der Niederösterreichisch-Steirischen Alpenbahn. Eu.M 1921, H. 18. — Ref. ETZ 1922, H. 22.
- Marshall: The wind resistance on trains. Eng. 16, Mai 1919.
- Metzelin: Berechnung der Hauptabmessungen von Lokomotiven (Zugwiderstände). Hanomag Nachr. Jänner 1921, H. 87.
- Müller: Ermittlung der Fahrzeiten durch Zeichnung. ZVDI 1923, Bd. 67, Nr. 15.
- Musil: Die Leistungsfähigkeit städtischer Schnellbahnen. Organ. 1918.
- Mutzner: Die virtuellen Längen der Eisenbahnen. Zürich 1914.
- Nordmann: Die Widerstandsformeln für Eisenbahnzüge in ihrer Entwicklung. GA 1916, H. 932.
- Nußbaum: Die Lösung der Eisenbahnlagerfrage durch SKF sphärische Rollenlager. ZOIAV 1923, H. 33.
- Örley: Die maßgebende Arbeitshöhe der Eisenbahn. Organ. 1922, H. 3.
- Perry: Some service results of ball bearings. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 4.
- Petersen: Die zweckmäßigste Neigung der Eisenbahn. Berlin: Kreidel 1921. — SBZ 1920, Bd. 76, Nr. 26. — Ref. Eu.M 1921, H. 48.
- Pflug: Geschwindigkeitsmesser für Motorfahrzeuge und Lokomotiven. Berlin: Julius Springer 1908.
- Pffor: Berechnung von Zügbewegungen. München-Berlin: Oldenbourg 1919.
- Pffor: Bewegungsverhältnisse von Eisenbahnzügen. ZBV 1900, Nr. 8.
- Pffor: Einige Bewegungsberechnungen für Schnellbahnen. EKB 1916, H. 21.
- Risch: Zur Frage der virtuellen Längen. VT 1921, H. 13.
- Ruegger: Betrachtungen über die störenden Nebenbewegungen der Eisenbahnfahrzeuge mit besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Radreifen-Konzität. SBZ 1917, Bd. 69, Nr. 25.
- Rydberg: Die Bewertung des Kugellagers in eisenbahn technischer Hinsicht. GA 1920, Nr. 1022.
- Sanzin: Versuche über den Widerstand von Dampflokomotiven. ZVDI 1911, Bd. I.
- Sanzin: Indikatorversuche an Lokomotiven. ZÖIAV 1914.
- Sanzin: Die Widerstände der Eisenbahnfahrzeuge. ÖWOBD 1917, H. 35.
- Sanzin: Versuche z. Ermittlung d. Fahrwiderstandes d. Mittenwald-Lokomotive. EKB 1919, H. 11.
- Sanzin: Zügförderung auf Steilrampen. Berlin 1912.
- Sanzin: Zur Frage des Fahrwiderstandes von schmalspurigen Fahrzeugen. VT 1922, H. 26.
- Sanzin: Die Zunahme des Fahrwiderstandes durch unvollkommene Unterhaltung. VT 1921, H. 28.
- Schimppf: Schnellstraßenbahnen. ZfK. 1917, Nr. 11.
- Schmidt und Marquis: Der Einfluß der Wärme auf den Zugwiderstand. Eng. Januar 1913.
- Senörling: Kugel- und Rollenlager. VT 1920, Nr. 4.
- Schroeder: Bestimmung des Traktionswiderstandes von Fahrzeugen aus Auslauf- und Anlaufkurven. (Rhätische Bahn.) BBCM 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. EKB 1918.
- Thormann: Der Energieverbrauch der elektrischen Zügförderung auf der Berner Alpenbahn. EKB 1916, H. 25.
- Vidéky: Die neuere Entwicklung der Lager der Eisenbahnfahrzeuge. MMEK 1923, Nr. 36.
- Volkers: Die Fahrkunst bei Straßenbahnen. Berlin 1917.
- Weber: Die virtuellen Längen der Eisenbahnen. VT 1920, H. 1.
- Wichert: Über Fahrwiderstände elektrischer Lokomotiven mit Parallelkurbelgetrieben. EKB 1919, H. 32.
- Wittsack: Der Beschleunigungsvorgang beim Anfahren von Schnellbahnzügen. EB 1923, H. 3.
- Über Versuche mit Kugellagern an den Wagen der schwedischen Staatsbahnen. RGCF 1921, Bd. 24, S. 292. — Ref. ETZ 1921, H. 32.
- Wann werden Kugellager bei Straßenbahnen wirtschaftlich? EKB 1917, H. 33.
- Roller bearing tests in England. ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 16.
- La résistance à la traction en courbes d'une voiture électrique de 28 t. RGE Juni 1917.
- Widerstand in Gleiskrümmungen. Hanomag. 1921, H. 98.

Die Zugwiderstände lassen sich am klarsten auf Grund ihrer Quellen erfassen. Zur Fortbewegung eines Fahrzeuges sind zu überwinden:

1. Der Reibungswiderstand (Rollwiderstand) in gerader Bahn, in welchen man außer der rollenden Reibung des Rades auch alle Reibungsverluste der Lager und des Ge-

triebes einzubeziehen pflegt. Der Reibungswiderstand ist — unveränderte physikalische Bedingungen vorausgesetzt — dem Gewicht der Fahrzeuge verhältnisgleich.

Bei Eisenbahnfahrzeugen ist hierfür die Achslast die kennzeichnende Größe. Es ist üblich den Reibungswiderstand, wie überhaupt alle Widerstände, auf die Tonne des Lokomotiv- bzw. Zuggewichtes zu beziehen.

Mit Rücksicht darauf, daß die rechnerische Erfassung der einzelnen Teilwiderstände kaum durchführbar ist, muß man sich damit zufrieden geben, für deren Summe Erfahrungswerte einzusetzen. Diese können getrennt für die Triebfahrzeuge und die gezogene Last ermittelt werden, wobei sich zeigt, daß der Widerstand treibender Fahrzeuge unter sonst gleichen Verhältnissen stets größer ist als derjenige für gezogene Fahrzeuge.

Tatsächlich weisen z. B. kalt geschleppte Dampflokomotiven kleinere Widerstände als bei Eigenbetrieben auf. 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 Anfahrwert 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, während der Anfangswert etwa doppelt so hoch ist.

Die Temperatur der Schmiermittel beeinflusst auch nennenswert den Zugwiderstand (Abb. 124); 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, die Seitenreibung des Zuges und die Saugwirkung des letzten Wagens; obzwar mit der Fläche in Proportion, pflegt man auch diesen Widerstandswert auf das Gewicht der Fahrzeuge zu beziehen. Der Größe nach wächst dieser Widerstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit.

3. Der Hebungswiderstand (Abb. 125) entspricht der Bahnneigung. Die zu dessen Überwindung erforderliche Zugkraft Z_h (kg) ist für das Zugsgewicht Q (t)

$$Z_h = 1000 Q \sin \alpha \text{ bzw. für die Tonne } w_h = \frac{Z_h}{Q} = 1000 \sin \alpha;$$

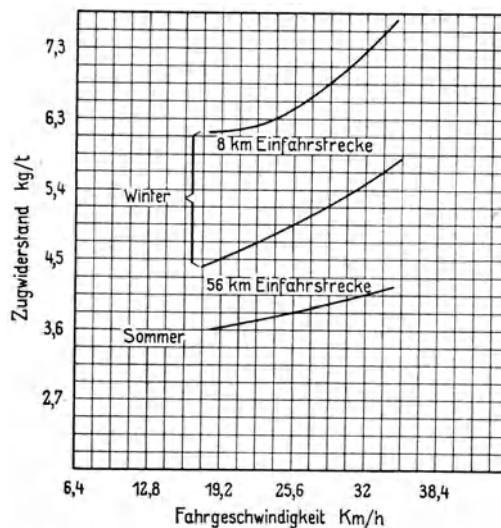


Abb. 124. Abhängigkeit des Zugwiderstandes von der Jahreszeit.

die senkrecht auf die Schienen gerichtete Teilkraft (G) der Achslast ist

$$G = Q \cos \alpha,$$

wobei für den Neigungswinkel (α) die Beziehung

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L} = \frac{h}{1000}$$

besteht.

Da $\cos \alpha$ bis zu Steigungen von $h = 131 \text{‰}$ kaum um 1‰ von der Einheit differiert, ist es zulässig, für Reibungsbahnen

$$G = Q$$

und

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha,$$

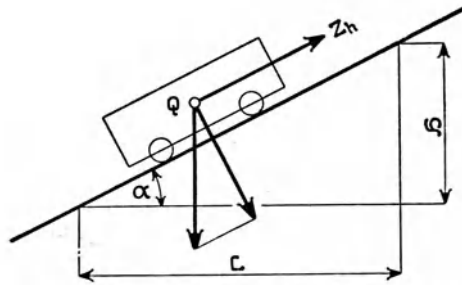


Abb. 125. Kräfteplan für ein Fahrzeug im Gefälle.

zu setzen, so daß die Steigung in ‰ die Zahl w_h des Hebungswiderstandes/Tonne darstellt.

4. Der Krümmungswiderstand wird durch das Anlaufen des Fahrzeuges an die Schienen und durch dessen Fliehkraft verursacht. Der Radstand und der Bogenhalbmesser bestimmen diesen Wert, für den bei Vollspur die Erfahrungsformel von Röckl brauchbare Ergebnisse liefert; diese lautet

für Normalspur
$$w_k = \frac{650}{R - 55},$$

für Meterspur
$$w_k = \frac{400}{R - 20},$$

für 750 mm-Spur
$$w_k = \frac{350}{R - 10} \quad \text{oder} \quad \frac{200}{R - 5}.$$

Bei Vollbahnen braucht w_k in Steigungen nicht berücksichtigt zu werden, weil es üblich ist, in Bögen die Steigung entsprechend zu ermäßigen.

Die Formeln liefern nur Überschlagswerte, weil sie die maßgebenden Größen, so insbesondere den Radstand, nicht enthalten; ferner wäre es 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, so tritt noch die Beschleunigungskraft hinzu, die durch die allgemeine Grundgleichung

$$P = \frac{1}{3,60} \frac{dv}{dt} \cdot \frac{G}{9,81} \cdot 1000$$

bestimmt ist, wo

P die Beschleunigungskraft in kg,

v die Fahrgeschwindigkeit in km/h und

Q das Gewicht der zu beschleunigenden Masse in t

bezeichnet.

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. 126.)

Der Verkehr städtischer Schnellbahnen und Straßenbahnen ist durch kurze Zugfolge und verhältnismäßig kleine Haltestellenentfernung gekennzeichnet. Unter diesen Umständen läßt sich ein ordentlicher Verkehr 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 der Haltestellenentfernung eine 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 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. 127).

Im ersten Abschnitt — der Anfahr — wird dem Fahrzeug Arbeit zugeführt, die die lebendige Kraft vermehrt und die Bahnwiderstände überwindet.

Wenn vorläufig angenommen wird, die vorgeschriebene Fahrzeit zur Zurücklegung der in Frage kommenden Strecke sei mit verschiedenen Beschleunigungen, jedoch mit derselben Höchstgeschwindigkeit zu erzielen, so ist während der Anfahr dem Zug die Arbeit

$$A = \frac{G \text{ kg}}{g} \cdot \frac{v^2 \text{ m/sek}}{2} + w \cdot \frac{G \text{ kg}}{1000} l \text{ m}$$

zuzuführen, wobei l die Länge des Anfahrweges bezeichnet. Das erste Glied ist ein für die gegebene Geschwindigkeit unveränderlicher Festwert, das zweite Glied wächst mit der Länge des Anfahrweges. Je kürzer dieser ist, um so geringer wird der mechanische Arbeitsaufwand zur Fortbewegung des Zuges.

Läßt man die Bedingung gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit fort, so 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.)

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

$$100 G \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} = 100 G p_2 l_2$$

abnimmt.

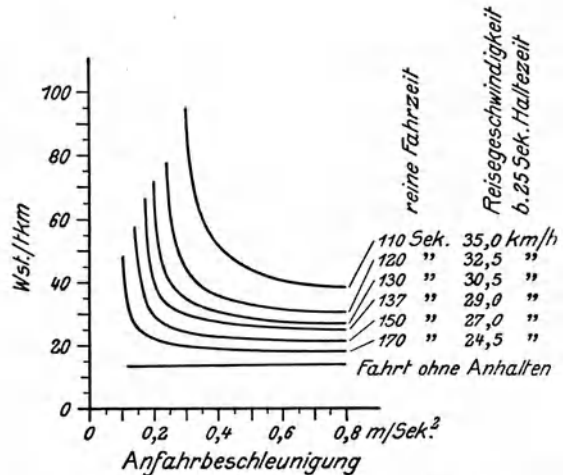


Abb. 126. Einfluß der Anfahrbeschleunigung auf den Stromverbrauch bei veränderlicher Reisegeschwindigkeit.

Da im Auslauf das der bewegten Masse innewohnende Arbeitsvermögen lediglich zur Überwindung des Rollwiderstandes aufgewendet wird, gilt auch

$$100 G \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} = G w l_3.$$

Hieraus folgt die Verzögerung im Auslauf

$$p_2 = \frac{w}{100}.$$

Wird die Beschleunigung bis zum Beginn des dritten Abschnittes — der Bremsung — fortgesetzt, so entfällt der Auslauf.

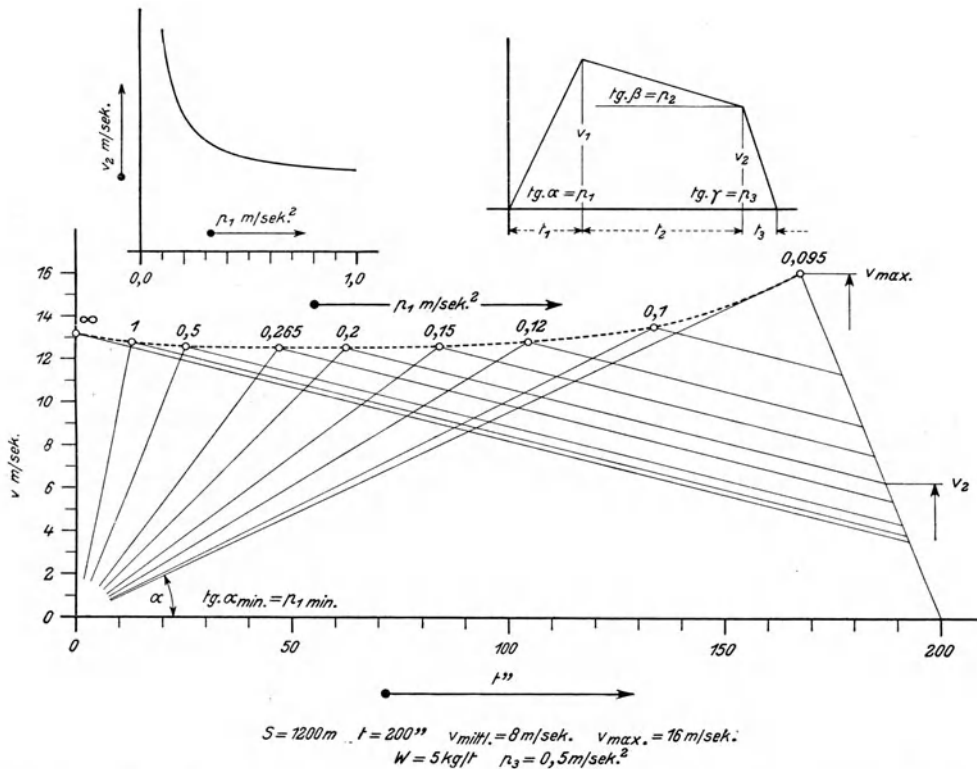


Abb. 127. Vereinfachtes Fahrdiagramm. Einfluß der Änderung der Beschleunigung auf die Höchstgeschwindigkeit bei gegebener Fahrzeit über eine bestimmte Strecke.

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 dieser wirtschaftlichen Bedeutung des Auslaufes folgt zugleich, daß, eine bestimmte Anfahrbeschleunigung und eine mittlere Fahrgeschwindigkeit als gegeben betrachtet, der spez. Stromverbrauch um so größer werden muß, je geringer der Abstand der Haltestellen ist. Dies wird ohne weiters augenfällig, wenn man sich im Bewegungsbild Abb. 127 unter Beibehaltung des Linienzuges für den An- und Auslauf und für die Größe der Verzögerung die Fahrzeit vergrößert denkt. Dann wird auch die Fläche, d. i. das Maß für den zurückgelegten Weg größer und unter einem auch die Wirtschaftlichkeit gesteigert, weil v_2 geringer geworden ist.

Carter weist für ein durchgerechnetes Beispiel nach, daß der Stromverbrauch von 67,3 Wh/tkm bei etwa 400 m Abstand der Haltestellen auf 34,2 Wh/tkm bei 1000 m und 24,5 Wh/tkm bei 1609 m Abstand sinkt.

Im dritten Zeitabschnitt wird das Fahrzeug durch eine als unveränderlich angenommene Bremskraft zum Stillstand gebracht.

Für die vorliegenden grundsätzlichen Betrachtungen wird für den Zugwiderstand, die Bremskraft und zunächst auch für die Beschleunigung mit Festwerten gerechnet, wodurch die Bewegungsbilder in geradlinige Figuren übergehen (Abb. 127).

Aus den bekannten Beziehungen zwischen Zeit, Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung folgt, unter Beachtung der in Abb. 127 benützten Symbole und der hierzu gemachten Voraussetzungen, für den zurückgelegten Weg S

$$S = \frac{v_1 t_1}{2} + \frac{v_1 + v_2}{2} t_2 + \frac{v_2 t_3}{2},$$

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. 127 ist an Hand eines Beispiels ($S = 1200$ m $v_{\text{mittl.}} = 8$ m/sek $v_{\text{max}} = 16$ m/sek) dargestellt, wie die zunehmende Beschleunigung und die Steigerung der Höchstgeschwindigkeit v_2 den Bremsverlust $\frac{m v_2^2}{2}$ 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 $v_2 \left(\frac{m v_2^2}{2} \right) = f(p_1)$ im rechtwinkligen Bezugssystem Abb. 127 zu entnehmen ist.

Die Ausrechnung obiger Gleichung hat, da sie nur für das betrachtete grundsätzliche Bewegungsbild, das tatsächlich nie vorkommt, gilt, kein Interesse. Scheidet man die krummlinig verlaufende Anfahrlinie aus einem wirklichen Bewegungsbild aus, so daß $t_1 = 0$ wird, so kann die Gleichung als Behelf dienen, um aus der gegebenen Fahrzeit bzw. der mittleren Geschwindigkeit die Auslaufzeit und damit die Bremsgeschwindigkeit und Bremsverzögerung zu berechnen, da 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. 128) aufstellen, mit deren Hilfe alle praktischen Fälle ohne Rechnung lösbar sind.

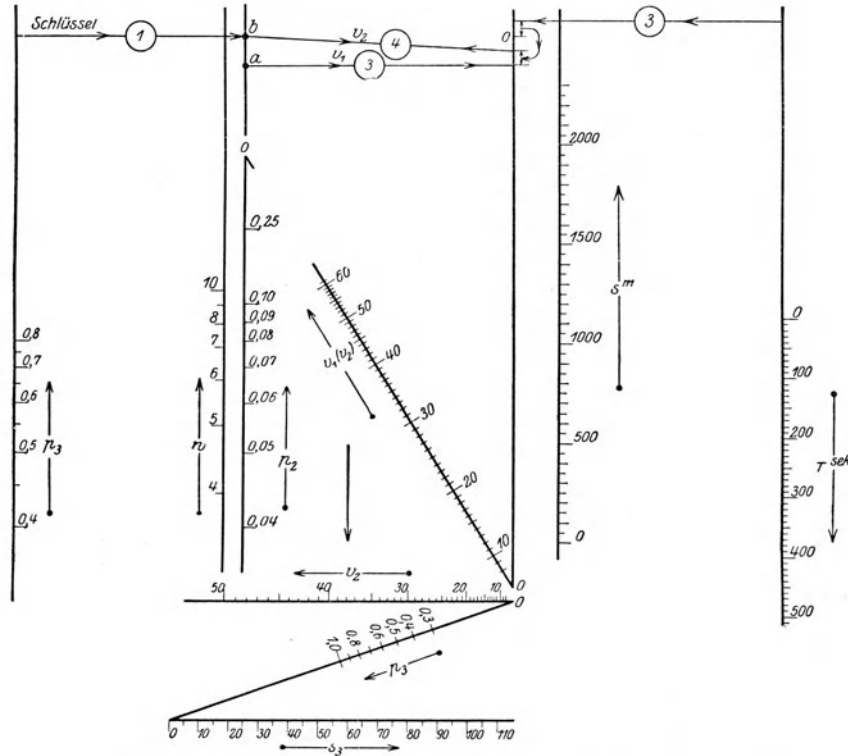


Abb. 128. Rechentafel zur Bestimmung der Auslauf- und Bremszeit.

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

$$2 S_1 = a v_1^2 + b v_2^2.$$

Addiert man beide Gleichungen, so wird

$$2 S + T = a(v_1^2 + v_1) + b(v_2^2 + v_2).$$

Zwei kollineare Systeme mit gemeinsamer Zapfenlinie eignen sich zur Ausrechnung dieser Gleichung (Abb. 128), wobei für die beiden Glieder der rechten Seite dieselben Teilnomogramme benutzt werden können.

6. Analyse der Bewegungsbilder. Der geradlinige Anstieg der Zeitgeschwindigkeitslinie setzt voraus, daß, sobald die den 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.

Das geradlinige Bewegungsbild stellt den Fall des geringsten Aufwandes an mechanischer Arbeit dar; dieser deckt sich jedoch aus mehrfachen Gründen nicht mit der günstigsten Stromwirtschaft. Das geradlinige Anfahren erfolgt unter Vorschaltung von Widerständen, wodurch Verluste entstehen. Läßt man im Bereiche höherer Geschwindig-

keiten eine Beschleunigung abnehmender Größe entsprechend der Eigencharakteristik des Motors zu, so wird der mittlere Wirkungsgrad verbessert und der Stromverbrauch verringert.

Die erstere Betriebsweise wäre auch 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 Beschleunigung gemäß der Eigencharakteristik der Triebmaschine bis zur Erreichung der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit

oder des Beharrungszustandes folgen. In diesem Zeitabschnitt hat die Geschwindigkeitslinie einen gekrümmten, tangential an die geradlinige Anfahrt und die ideelle Beharrungsgeschwindigkeit anschließenden Verlauf (Abb. 129).

Den Einfluß der Beschleunigung auf die Stromwirtschaft, Verringerung der Fahrzeit und damit Steigerung der Reisegeschwindigkeit erläutert das in Abb. 127 dargestellte Beispiel. Das Bewegungsbild gilt für gleiche Fahrzeiten in allen Fällen.

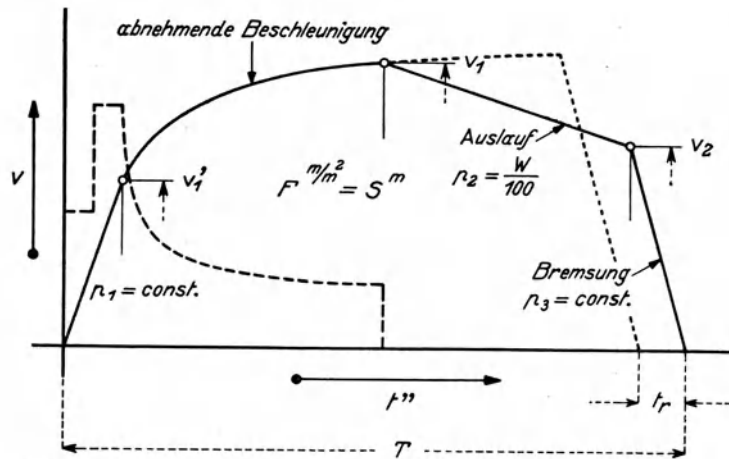


Abb. 129. Bewegungsbild entsprechend den Kennlinien eines Serienmotors mit Zeitrückhalt. Mittlere Geschwindigkeit $V = \frac{S}{T}$.

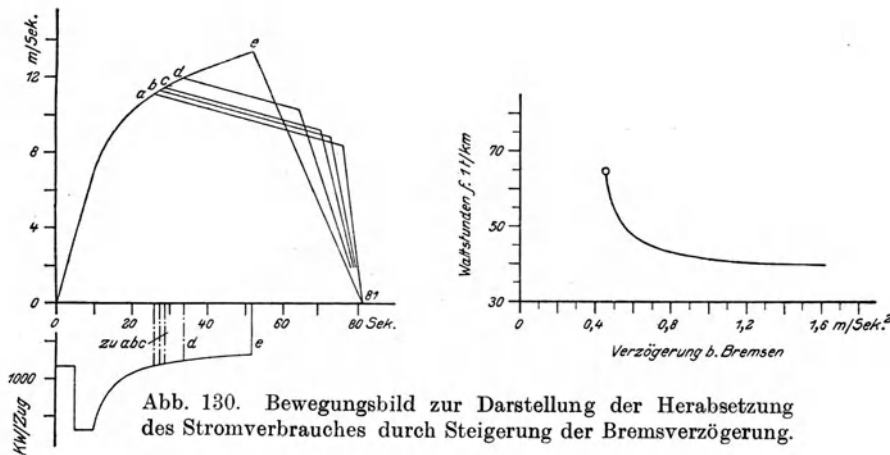


Abb. 130. Bewegungsbild zur Darstellung der Herabsetzung des Stromverbrauches durch Steigerung der Bremsverzögerung.

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 Verspätung verfügbare Zeitreserve. Die Fahrzeit ohne Auslauf entspricht der kürzesten mit den ver-

wendeten Motoren erzielbaren Fahrzeit. Die Zeitreserve nennt man Zeitrückhalt (t_r , Abb. 129). Aus seiner betrieblichen Bedeutung folgt, daß es 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.

Daß die Steigerung der Bremsverzögerung im dritten Zeitabschnitt und damit die Vergrößerung des Zeitrückhaltes den Stromverbrauch ebenso wie die Beschleunigung herabsetzt, erfährt durch Abb. 130 seine Bestätigung. Im Be-

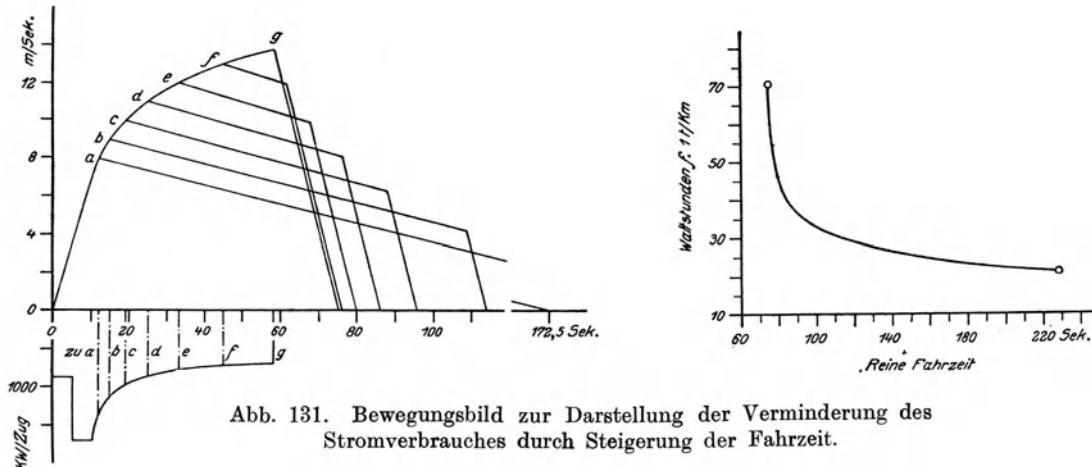


Abb. 131. Bewegungsbild zur Darstellung der Verminderung des Stromverbrauches durch Steigerung der Fahrzeit.

wegungsbild $v = f(t)$ mißt die eingeschlossene Fläche den zurückgelegten Weg, die für die verschiedenen Verzögerungen dargestellten Figuren müssen, da sie sich auf den gleichen Weg beziehen, flächengleich sein.

Die Vergrößerung der Fahrzeit verringert ebenfalls den Stromverbrauch (Abb. 131), indem die Stromzeit, wie im vorbehandelten Fall, sichtlich verringert wird.

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 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. Ihr Höchstwert wird beschränkt durch die Sicherheit der Reisenden, durch das verfügbare Reibungsgewicht und schließlich durch die Beanspruchung der Motoren.

Zunächst die letztere Begrenzung vor Augen haltend, geht aus Abb. 132 (Bethge) hervor, daß der Stromverbrauch mit Steigerung der Beschleunigung und daher bei Vergrößerung der Anfahrt-Stromstärke abnimmt. Der Motor soll beim Anfahren mit der höchstzulässigen Leistung beansprucht werden.

Die Zugkraft eines Motors läßt sich durch Vergrößerung der Zahnradübersetzung, die bei dieser Betriebsart kaum fehlen wird, vergrößern. Die durch dieses Mittel herbeigeführte Änderung der Fahrlinien ist der Abb. 133 (Pforr) zu entnehmen. Es gibt eine ausgesprochen günstigste Übersetzung, so daß deren Vergrößerung über einen gewissen Wert den Stromverbrauch wieder steigert. Bei zu groß bemessener Übersetzung wird zwar anfänglich stark beschleunigt, jedoch die Eigencharakteristik 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 zur Änderung der Übersetzung kann meist nur bei Lokomotiven in Erwägung gezogen

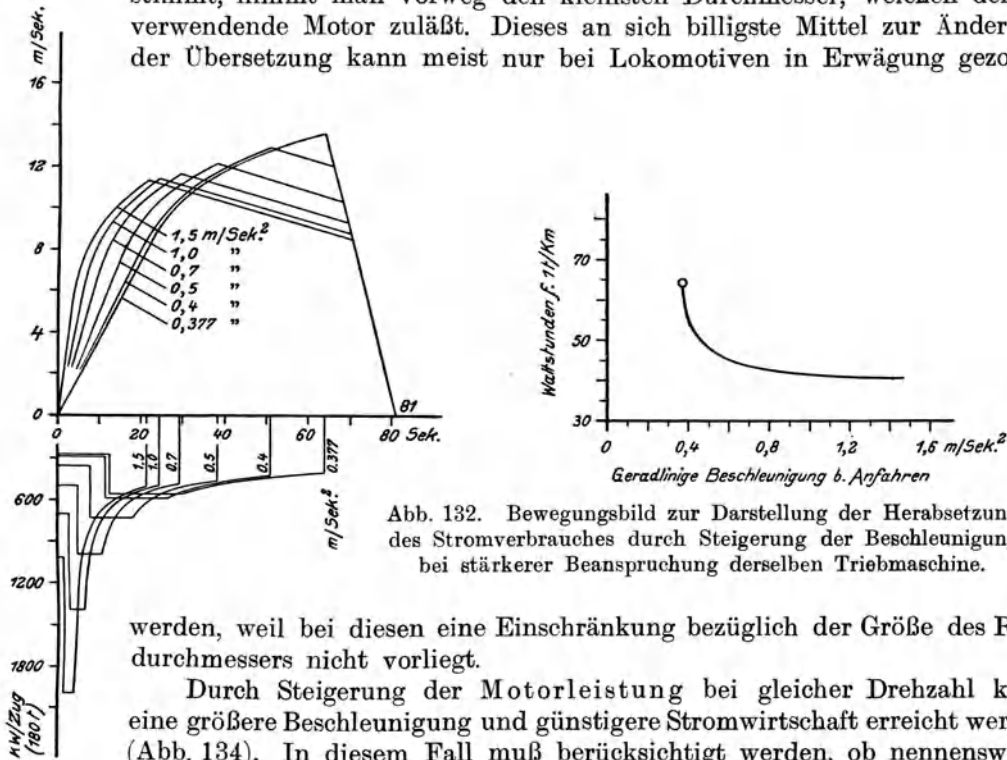


Abb. 132. Bewegungsbild zur Darstellung der Herabsetzung des Stromverbrauches durch Steigerung der Beschleunigung bei stärkerer Beanspruchung derselben Triebmaschine.

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. 134). 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, den Zug auslaufen lassen und dann wieder beschleunigen muß usf.

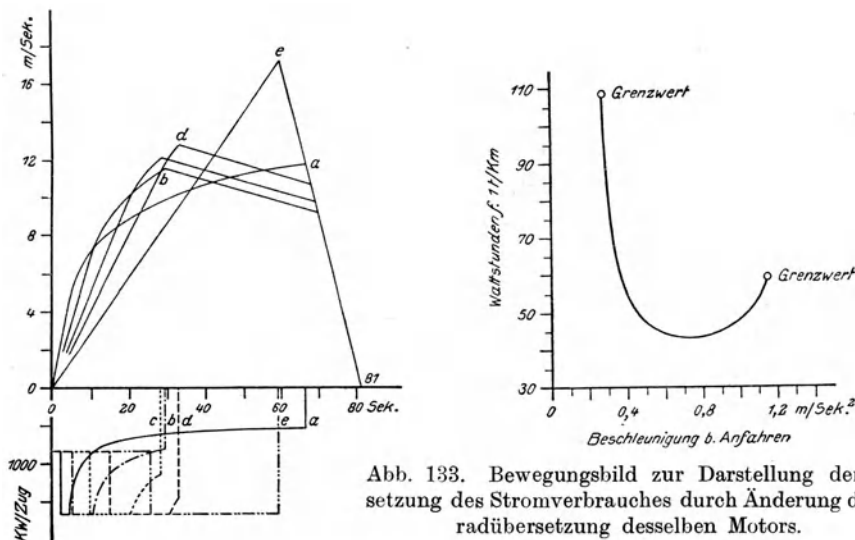
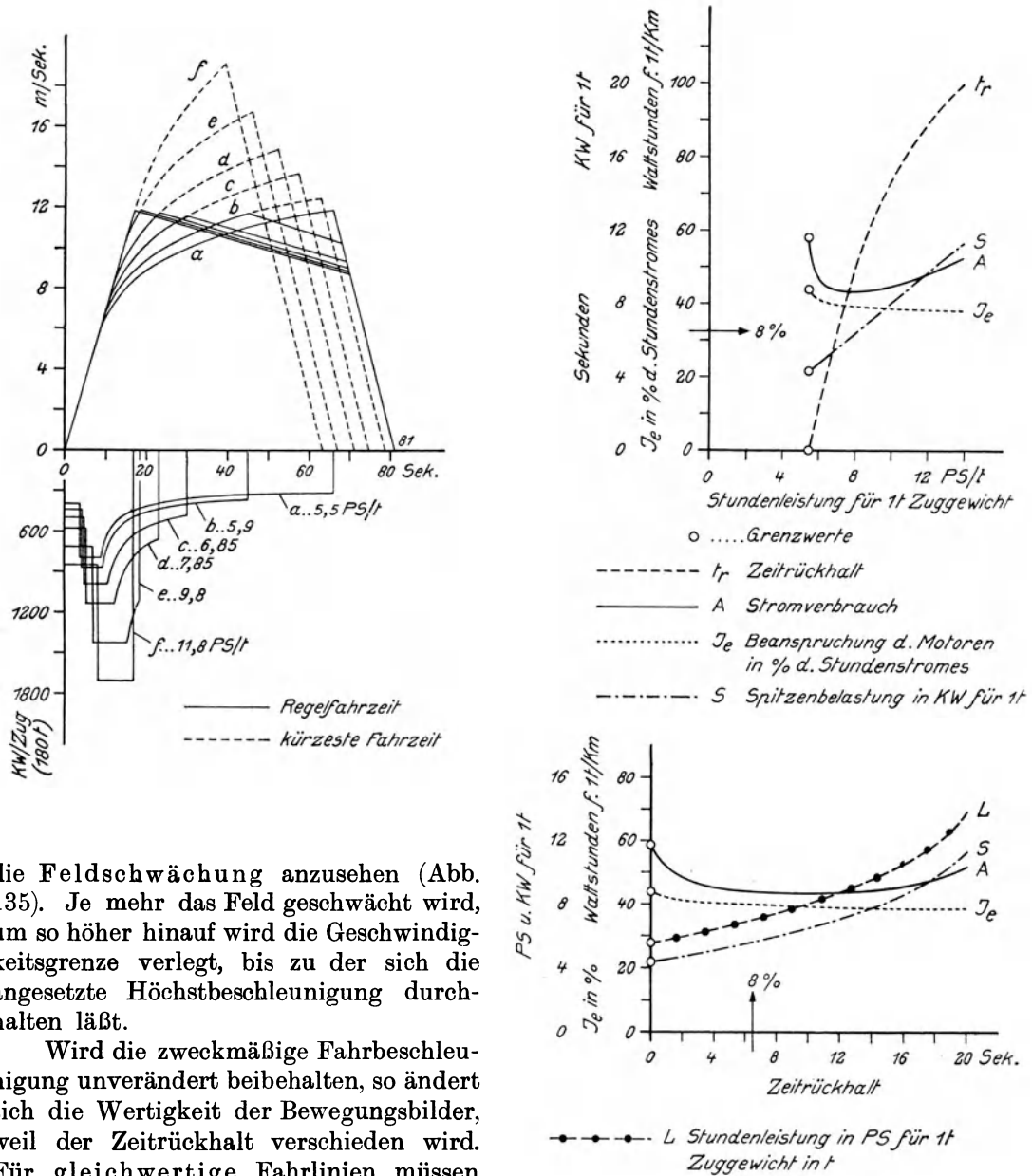


Abb. 133. Bewegungsbild zur Darstellung der Herabsetzung des Stromverbrauches durch Änderung der Zahnradübersetzung desselben Motors.

Als wirksames Mittel, die Stromwirtschaft ohne Steigerung der Beschleunigung durch Verlängerung der geradlinigen Geschwindigkeitssteigerung zu verbessern, ist



die Feldschwächung anzusehen (Abb. 135). Je mehr das Feld geschwächt wird, um so höher hinauf wird die Geschwindigkeitsgrenze verlegt, bis zu der sich die angesetzte Höchstbeschleunigung durchhalten läßt.

Wird die zweckmäßige Fahrbeschleunigung unverändert beibehalten, so 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; diese muß vielmehr mit der Feldschwächung ermäßigt werden (Abb. 136). 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. 137) zu erzielen.

Abb. 134. Bewegungsbild zur Darstellung der Herabsetzung des Stromverbrauches durch Steigerung der Leistung der Triebmaschine bei unveränderter Beibehaltung der Beschleunigung.

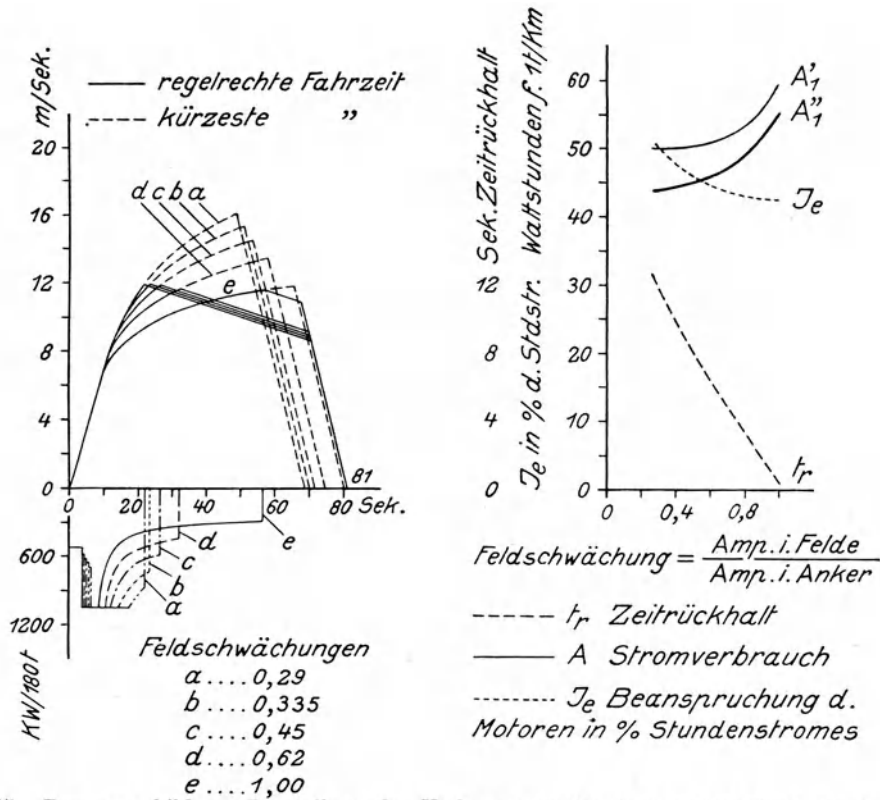


Abb. 135. Bewegungsbild zur Darstellung der Verbesserung der Stromwirtschaft durch Anwendung der Feldschwächung; Zeitrückhalt veränderlich, Beschleunigung konstant.

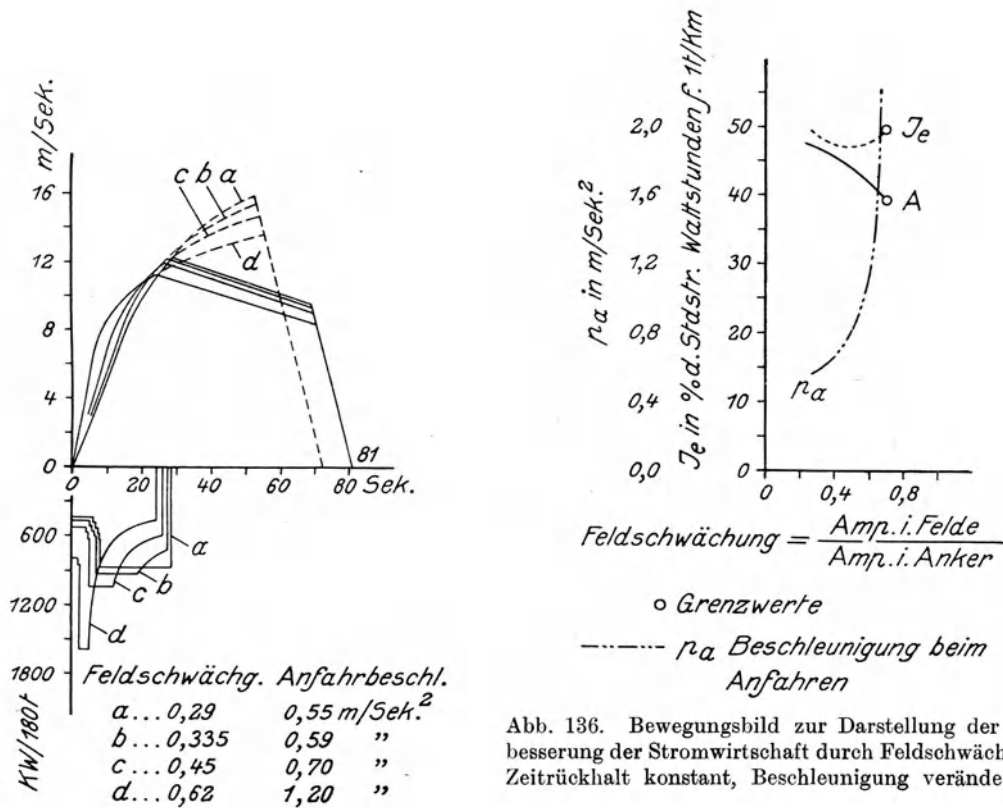


Abb. 136. Bewegungsbild zur Darstellung der Verbesserung der Stromwirtschaft durch Feldschwächung; Zeitrückhalt konstant, Beschleunigung veränderlich.

Die Feldschwächung, die aus anderen, bei der Behandlung der elektrischen Motoreigenschaften zu erläuternden 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

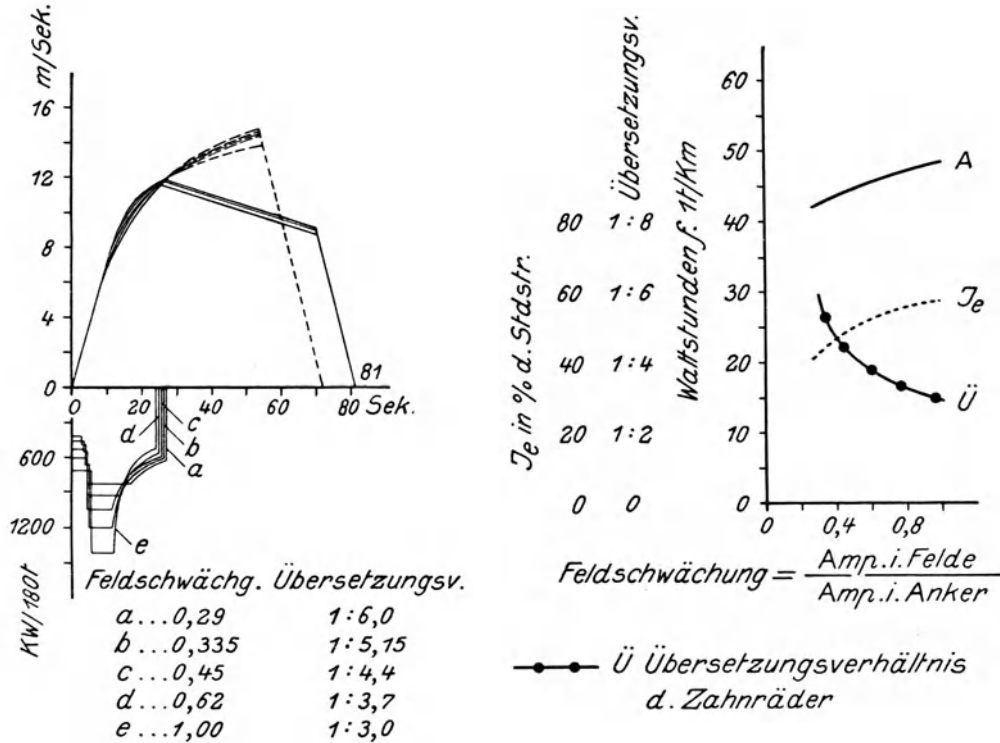


Abb. 137. Bewegungsbild zur Darstellung der Verringerung des Stromverbrauches durch Feldschwächung und Änderung der Zahnradübersetzung; Zeitrückhalt konstant.

mit stark geschwächtem Feld, in der Steigung langsam auf der Eigencharakteristik des Motors. Eine 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 bis 0,7 m/sek² 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.

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 10⁰/₀ vom Zugsgewicht in Rechnung zu stellen.

Nach amerikanischen Angaben sind folgende Zuschläge zu machen:

- für schwere Lokomotivzüge 5,0⁰/₀
- Schnellzüge 6,5⁰/₀
- schnellfahrende Motorwagen 6,5 bis 8,0⁰/₀
- langsamfahrende Motorwagen 9,0 " 15,0⁰/₀
- Stadtbahnzüge London-Brighton 13,6⁰/₀

Messungen haben für einige Lokomotiven folgende Werte ergeben:

Lötschberg-Lokomotiven	+ 37%	mit Achsfolge C + C	} Regelspur
"	+ 43%	" " 1-E-1	
Mittenwaldbahn	+ 22%	" " 1-C	} Meterspur
Rhätische Bahn	+ 38%	" " 1-D-1	
Berninabahn	+ 38%	" " C + C	} 76-cm-Spur
Mariazellerbahn	+ 27%	" " C + C	
Montreux-Glion Zahnradlokomotive . .	+ 162%	" " 2 A/2 a	} Meterspur
Rittnerbahn Zahnradlokomotive . . .	+ 600%	" " 2 A/2 a	

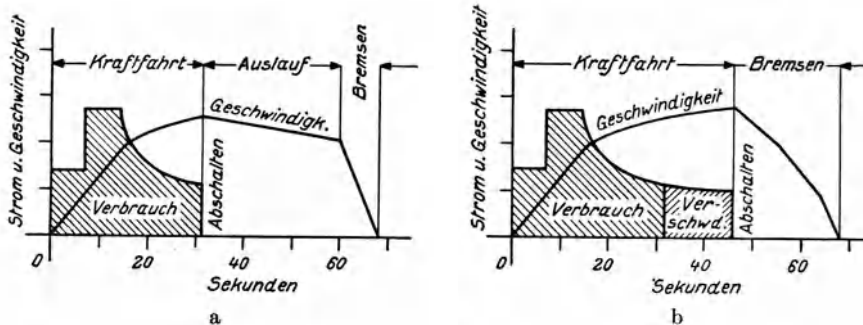


Abb. 138. Bewegungsbilder zur Erläuterung der wirtschaftlichen Fahrtechnik; a) Fahrt mit Auslauf, b) Fahrt ohne Auslauf.

Die letztere Zahl gibt die Erklärung für zahlreiche Unfälle, die auf Bergbahnen stets beim Bremsen aufgetreten sind. Man scheint bei der Berechnung der Zahnkräfte, 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.

Bei der Auslaufmethode verleiht man dem zu untersuchenden Fahrzeug oder Zug eine entsprechende Geschwindigkeit und überläßt ihn dann ohne jegliche Arbeitszufuhr sich selbst. Hierbei wird die Geschwindigkeit, die Zeit und der zurückgelegte Weg gemessen. Waren die Verhältnisse auf der Versuchsstrecke, d. h. Rollwiderstand, Steigung, Richtungs- und Windverhältnisse unveränderlich, so läßt sich aus der Beobachtungskurve der gesamte Zugwiderstand in Funktion der Geschwindigkeit auswerten.

Für Straßenbahnfahrzeuge, die mit Geschwindigkeit bis 30 km/h fahren, ist die Annahme zulässig, daß der Bahnwiderstand einen von der Geschwindigkeit unabhängigen Festwert hat.

Unter dieser Voraussetzung bestehen folgende einfache Beziehungen:

$$\frac{mv^2}{2} = Gwl,$$

- wobei G das Zuggewicht in t,
- m die Masse des Zuges in kg,
- v die Geschwindigkeit in m/sek.,
- l den Auslaufweg in m,
- w den Zugwiderstand kg/t

bezeichnet.

Ferner gilt:

$$l = \frac{vt}{2} \quad \text{und} \quad m \simeq \frac{G \cdot 1000}{10},$$

$$\frac{G \cdot 100 \cdot 4 l^2}{2 t^2} = Glw,$$

somit

$$w = \frac{200 l}{t^2},$$

d. h. man kann den Bahnwiderstand durch den Auslaufversuch ermitteln, ohne die Geschwindigkeit oder das Zuggewicht 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. 139.

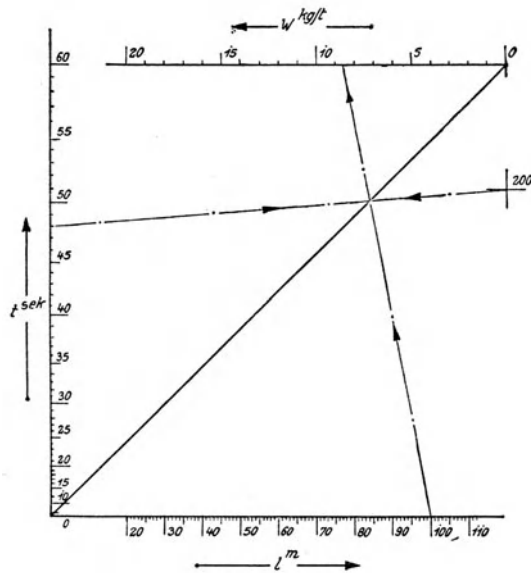


Abb. 139. Rechentafel zur Bestimmung des Rollwiderstandes (w kg/t) aus dem Auslaufweg (l m) und der Auslaufzeit (t sek).

Beispiel: $l = 100$, $t = 48$, $w = 8,6$.

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 $h^0/_{00}$ gilt die Gleichung

$$Gh + \left(\frac{G + G_1}{g} \right) 1000 \gamma = Gw.$$

G ist das Gewicht in t des Fahrzeuges, geradlinig bewegt gedacht, und G_1 das scheinbare zusätzliche, auf den Radumfang bezogene Gewicht der umlaufenden Teile.

Hieraus wird

$$w = \left(\frac{1 + \frac{G_1}{G}}{g} \right) 1000 \gamma + h.$$

Ein gutes Mittel zur raschen Beurteilung des Betriebszustandes des Fahrzeuges besteht darin, daß man nach vorheriger Feststellung des Zugwiderstandes eine Strecke mit dem Gefälle $h = w$ auswählt.

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 Vollbahnfahrzeuge mit verhältnismäßig kleinem Rollwiderstand und größerem Anteil des mit der Geschwindigkeit veränderlichen Luftwiderstandes ist die Annahme des geradlinigen Auslaufes unzulässig.

Wird auf zwei möglichst verschiedenen Gefällen 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 jedoch der gleiche; hieraus folgt:

$$\left(\frac{1 + \frac{G_1}{G}}{g}\right) 1000 \gamma_1 + h_1 = \left(\frac{1 + \frac{G_1}{G}}{g}\right) 1000 \gamma_2 + h_2,$$

daher

$$\frac{G_1}{G} = \frac{g}{1000} \frac{h_1 - h_2}{\gamma_2 - \gamma_1} - 1.$$

Bei Versuchen auf verschiedenen Neigungen mit 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 Zugsgewichtes nötig sind. Zu beachten ist, daß die Ablesungen im Beharrungszustand erfolgen.

9. Erfahrungszahlen und Formeln für die Fahrwiderstände. Die Erfahrungszahlen und Formeln für den Reibungs- und Windwiderstand sind die folgenden:

Industriebahnen	8 bis 10 kg/t	(höhere Werte unter Weg)
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. 140):

$$\text{Güterzüge} \quad w = 1,8 + 0,001 v^2$$

$$\text{Personenzüge} \quad w = 1,6 + 0,0184 v + 0,00046 v^2 \quad (\text{zweiachsige Wagen})$$

$$\text{Schnellzüge} \quad w = 1,6 + 0,00456 v + 0,000456 v^2 \quad (\text{vierachsige Wagen})$$

$$\text{Lokomotiven} \quad w = \frac{L(1,8 + 0,015 v) + R\left(a + b \frac{v}{D}\right) + 0,006 F v^2}{G}.$$

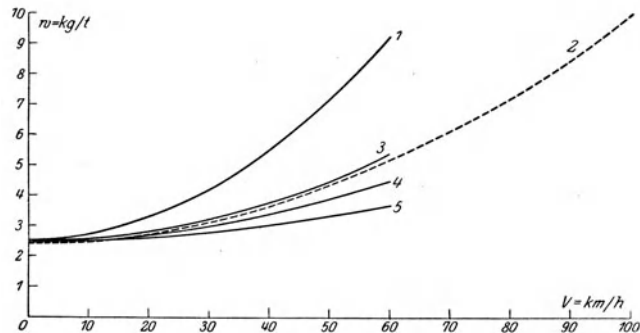


Abb. 140. Rollwiderstände von Zügen.

1. Güterzüge, offene Wagen, leer $w = 2,5 + 0,00189 v^2$
2. Personen- 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 $w = 2,5 + 0,00033 v^2$

w kg/t Widerstand von Lokomotive und Tender
 L das auf 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

$$\text{für die Achsfolgen } \begin{cases} B & 5,5 & 0,08 \\ C & 7,0 & 0,10 \\ D & 8,0 & 0,28 \\ E & 8,8 & 0,36. \end{cases}$$

In Abb. 141 sind die für eine Anzahl von elektrischen und Dampflokomotiven durch Versuchsfahrten ermittelten Kurven des Rollwiderstandes in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt.

Widerstandsformeln von:

$$\text{Frank: } w^{\text{kg/t}} = \left[2,5 + 0,0142 \left(\frac{V^2}{10} \right) \right] G^t + \frac{Fm^2}{G^t} \left(\frac{V^{\text{km/h}}}{10} \right)^2,$$

hier ist $F = 0,56$ für Personenwagen und gedeckte Güterwagen,

$F = 0,32$ „ beladene Güterwagen,

$F = 1,62$ „ leere offene Güterwagen.

$$\text{Strahl: } w^{\text{kg/t}} = 2,5 + \frac{Fm^2}{G^t} \left(\frac{V^{\text{km/h}}}{10} \right)^2.$$

$$\text{Barbier: } w^{\text{kg/t}} = 1,6 + 0,023 V^{\text{km/h}} + 0,00046 V^2$$

$$\text{Borries: } w^{\text{kg/t}} = 1,5 + 0,012 V + \left(\frac{0,3}{q^t} + 0,2 \right) \frac{V^2}{1000}$$

(q das Wagengewicht in t).

Schweizerische Bundesbahnen:

$$w^{\text{kg/t}} = 2,5 + 0,0003 V^2 + 0,054 \frac{V^2 \text{ km/h}}{G^t}.$$

Von Markt wurde für die C + C-Lokomotiven der Mariazellerbahn (76-cm-Spur) die Formel

$$w^{\text{kg/t}} = 4,0 + 0,0049 V^2$$

ermittelt.

Eine sehr ähnliche Gesetzmäßigkeit weist der Rollwiderstand der C + C-Lokomotiven der Berninabahn auf, jedoch beträgt der Anfangswert nur 3,5 kg.

Für die aus zwei Triebwagen, zwei zweiachsigen Personenwagen und einem zweiachsigen Akkumulatortender bestehenden Züge von 104 T (auf 10 Achsen) der österreichischen Bundesbahnen sind von Meixner die Rollwiderstände festgestellt worden.

Durch Ab- und Auslaufversuche, also für stromlose Fahrten, ergab sich der Rollwiderstand zu

$$w^{\text{kg/t}} = 2,22 + 0,054 V + 0,0007 V^2 \text{ km/h}.$$

Dieser Widerstandswert enthält auch die beim Auslauf von der lebendigen Kraft des Zuges überwundenen mechanischen Leerlaufverluste der Triebmaschinen.

Aus der Messung der dem Zug elektrisch zugeführten Energie errechnet sich ein Widerstandswert von

$$w^{\text{kg/t}} = 3,28 + 0,016 V + 0,0018 V^2 \text{ km/h.}$$

In diesem Wert sind die der Motorbelastung entsprechenden elektrischen und mechanischen Verluste mit inbegriffen. Zur Trennung letzterer von dem eigentlichen Fahrzeugwiderstand muß dieser Wert mit dem mittleren Nutzeffekt der Triebmaschinen multipliziert werden; dann wird für den unter Strom fahrenden Zug ein Rollwiderstand

$$w^{\text{kg/t}} = 2,46 + 0,012 V + 0,00135 V^2$$

gefunden.

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

Bemerkenswert ist der günstige Einfluß der Wälzlager auf den Rollwiderstand der Fahrzeuge. Auf der Berninabahn konnte festgestellt werden, daß die Züge dieser Schmalspurbahn keine größeren Widerstandswerte aufweisen als regelspurige Züge, was lediglich der Verwendung von Wälzlagern zuzuschreiben ist.

Durch Versuche auf der schwedischen Staatsbahn wurde der Rollwiderstand für Fahrzeuge mit Wälzlager für die Fahrt mit etwa 1,01 kg/t ermittelt, gegenüber dem an sich schon niedrigen Wert von 1,61 kg/t für Wagen mit Gleitlager.

Diese Ergebnisse sind vor allem für den Speicherbetrieb von besonderer Bedeutung. Diese Betriebsart kommt, wie später ausgeführt wird, nur für ebene oder wenig geneigte Strecken in Frage. Unter diesen Umständen bestimmt der Zugwiderstand den Stromverbrauch und damit die Reichweite des Speichers. Durch Anwendung von Wälzlagern läßt sich die Leistung eines Speichers auf ebener Strecke etwa auf das 1,5- bis 2,0 fache steigern.

Besondere Beachtung verdient der beim Anfahren vom Stillstand auftretende Widerstand. Dieser beträgt bei den Zügen mit den gebräuchlichen Gleitlagern, namentlich wenn es sich um seit längerer Zeit abgestellte Züge handelt und eine tiefe Temperatur herrscht, ein Vielfaches des nach längerer Fahrt erreichbaren Beharrungswertes, den man der Bemessung der Zugkraft der Triebfahrzeuge zugrunde zu legen pflegt. Auf

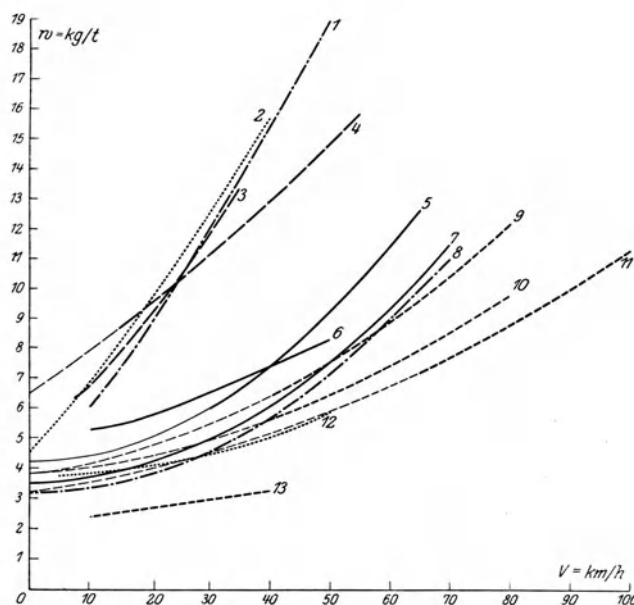


Abb. 141. Rollwiderstände von Lokomotiven.

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 17 o, 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. Löttschbergbahn, Achsfolge C + C. 7. Löttschbergbahn, Achsfolge 1-E-1.
9. Reihe 106, Ö.B.B., Df., Achsfolge 2-B. 10. Reihe 17 c, Ö.B.B. Df., Achsfolge 2-B.
11. Reihe 108, Ö.B.B., Df., Achsfolge 2-B-1. Französ. Südbahn, Achsfolge 1-3 × A-1.
13. Reihe 106, Ö.B.B., Df., Achsfolge 2-B (ohne Widerstand der Lokomotivmaschine). — (Df. = Dampflokomotive.)

diese Eigenart der Fahrzeuge sind die Schwierigkeiten beim Anfahren mit für normalen Zugwiderstand voll ausgenützten Triebgewicht zurückzuführen.

Die Fahrer helfen sich in solchen Fällen bekanntlich durch Zusammendrücken des Zuges, so daß die sich beim Anziehen streckenden Pufferfedern an der hintereinander einsetzenden Beschleunigung der einzelnen Wagen mithelfen.

Der Wert des Anfahrwiderstandes ist durch Rydberg für Wagen mit Gleitlagern mit 10 bis 19 kg/t gemessen worden, wogegen Wagen mit Wälzlager, sofern sie beladen waren etwa 1,3 kg/t, leer bis 4,1 kg/t aufwiesen. Aus diesen Versuchen wurde gefolgert, daß Züge mit Wälzlagern nur den siebenten bis zehnten Teil des Anfahrwiderstandes von solchen mit Gleitlagern aufweisen.

Glinski ermittelte den Wert der Anfahrwiderstände für Züge bestehend aus Fahrzeugen ausgerüstet mit den üblichen Gleitlagern. Derselbe wurde gefunden

für elektrische Lokomotiven	zu höchstens 30 kg/t,
„ einzelne Wagen	„ 20 „
„ Züge bestehend aus straff gekuppelten Wagen „	„ 12 „

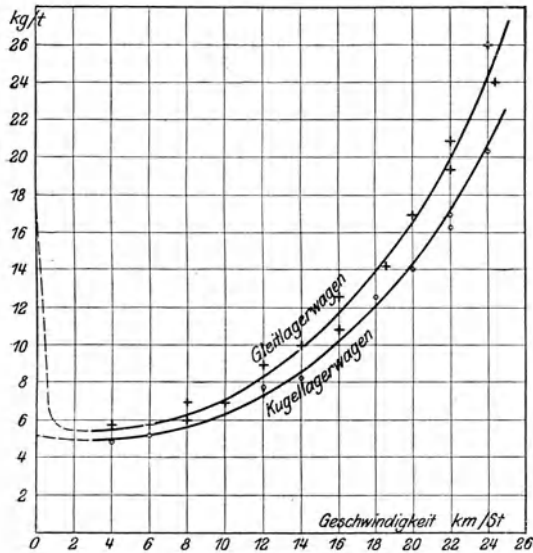


Abb. 142. Rollwiderstand von Straßenbahn-Triebwagen.

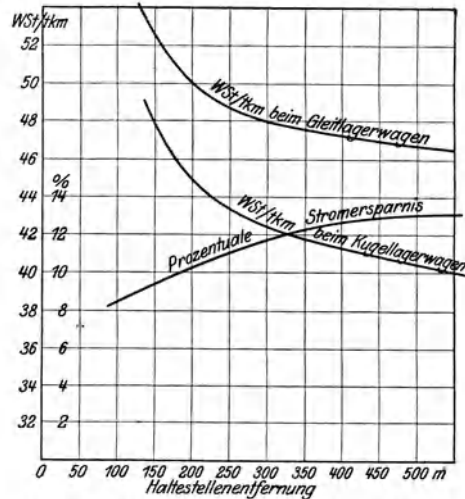


Abb. 143. Stromverbrauch im Straßenbahnbetrieb in Abhängigkeit von der Haltestellenentfernung.

In Hinblick auf diese Ergebnisse empfiehlt Glinski überall dort, wo des öfteren mit Anfahrten unter ungünstigen Verhältnissen zu rechnen ist, der Bemessung der Höchstzugkraft der Maschine einen Anfahrwiderstand von durchschnittlich 6 kg/t zugrunde zu legen.

Für die mit Kugellagern ausgerüsteten vierachsigen Wagen der Rhätischen Bahn wurden Anfahrwiderstände von rund 1,3 kg/t (leer) und 1,46 kg/t (belastet) nachgewiesen, gegenüber 4,1 bis 12,6 kg/t (leer) und 5,1 bis 14,9 kg/t (belastet) der gleichen Wagen mit Gleitlager; auch bei zweiachsigen Güterwagen mit Gleitlagern wurde der Anfahrwiderstand 5,2 bis 9,0 (leer) und 4,0 bis 13,7 mal (belastet) so groß gefunden wie für Wagen mit Kugellager.

Zur Feststellung des Rollwiderstandes von Straßenbahnfahrzeugen mit Wälzlagern hat Adler eingehende Versuche durchgeführt.

Es wurde festgestellt, daß der Anfahrwiderstand von Triebwagen mit Wälzlagern nur etwa 5,5 kg/t beträgt gegen etwa 17,5 kg/t für Wagen mit Gleitlagern (Abb. 142). Für zweiachsige Anhängewagen wurde hierfür 2,1 bzw. 8,6 kg/t ermittelt.

Durch die Herabsetzung des Rollwiderstandes wurde im Betrieb eine Stromersparnis von 8 bis 10% erzielt. Bemerkenswert sind die in Abb. 143 wiedergegebenen Ergebnisse in bezug auf die Entfernung der Haltestellen. Bei kurzen Abständen ist der Beschleunigungswiderstand vergleichsweise groß, die Verminderung des Rollwiderstandes beeinflußt daher wenig den Gesamtverbrauch, ebenso wie dies bei Vollbahnen mit andauernden großen Steigungen der Fall sein wird. Die Vorteile der Wälzlager sind eben nicht nur bzw. nicht in allen Fällen in der erzielbaren Stromersparnis zu suchen.

10. Schlußfolgerung für den Lokomotivbau. Die Sanzinschen Formeln lassen die Tatsache erkennen, daß der Eigenwiderstand der Dampflokomotiven mit der Zahl der gekuppelten Achsen nennenswert wächst. Bei Dampftrieb mußte man sich hiermit abfinden, weil eine etwa der halben Achsenzahle entsprechende Unterteilung der Dampfmaschine in zwei oder mehrere Teile kaum in Betracht kommt oder zu sehr umständlichen Bauarten (Mallet) führt.

Beim elektrischen Betrieb spricht nichts gegen eine angemessene Unterteilung der Triebkraft auf mehrere Motoren. Diese Tatsache bildet überhaupt die wirtschaftliche Grundlage des elektrischen Betriebes mit Triebwagen und für den Bahnbetrieb mit Triebwagenzügen im besonderen. In bezug auf die Bauart der Lokomotiven 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 Löttschberg-Lokomotiven wesentlich geringere Widerstandswerte ergeben, als für Dampflokomotiven derselben Achsanordnung ermittelt wurden. Der Unterschied zwischen der Achsfolge 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.

Die in bezug auf die Baustoffwirtschaft meist günstigere Bauart mit vielachsigen festen Gestell empfiehlt sich dagegen insbesondere dann, wenn günstige Richtungsverhältnisse nicht gegen diese immerhin steifere Bauart sprechen, oder die erforderliche Achszahl (5, 7) eine Gliederung nicht zuläßt.

II. Die Zugkraft am Radumfang. Die Fahrgeschwindigkeit.

Brecht: Die Ausnützung des Reibungsgewichtes bei Eisenbahnfahrzeugen. EKB 1914, H. 15.

Kummer: Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung. Berlin: Springer 1915.

Ossana: Über das Adhäsionsgewicht von Wechselstromlokomotiven. EKB 1906, H. 13.

Schimpff: Schnellstraßenbahnen. ZfV 1917, H. 11.

Seefehlner: Das Gewicht der elektrischen Vollbahnlokomotiven. Eu.M 1915, H. 1.

Seefehlner: Elektrische Vollbahnlokomotiven in Europa und Amerika. EKB 1915, H. 23 u. 31.

Wichert: Die Leistungseigenschaften der Elektrolokomotive. ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 48.

Zuidweg: Die Ausnützung des Reibungsgewichtes elektrischer Lokomotiven. ETZ 1920, H. 22.

Sul peso dei locomotori eletr. Eta. Aug. 1918, S. 333.

1. Physikalische Grundlagen. Der Reibungsschluß. Die physikalische Grundlage der Zugförderung der Eisenbahnen ist die Kraftübertragung durch Reibungsschluß zwischen Rad und Schiene. Die Voraussetzung hierfür ist eine auf die Berührungsfächen senkrechte Kraftwirkung.

Die zu diesem Berührungsdruck senkrechte, mit der Bewegungsrichtung übereinstimmende Reibungskraft ist, sofern unter der Kraftwirkung keine Veränderung des

Gefüges der Oberfläche eintritt, verhältnisgleich dem Berührungsdruk. Die auf diese Weise am Radumfang übertragbare Reibungskraft ist die physikalische Quelle der Zugförderung.

Allgemein ist

$$Z = \mu G^{kg},$$

wobei Z die tangentielle Reibungskraft in kg,
 G den senkrechten Berührungsdruk in kg
 und μ die Reibungsziffer

bezeichnet.

Letztere bedeutet physikalisch die spezifische Reibungskraft für die Einheit der Achsbelastung.

Unter Einführung der im Eisenbahnwesen für Fahrzeuggewichte gebräuchlichen Einheit, der t, wird

$$Z^{kg} = 1000 \mu G^t$$

und hieraus die spez. Zugkraft am Radumfang je t

$$z = \frac{Z}{G} = 1000 \mu.$$

Zur klaren Erfassung des physikalischen Wesens der Kraftübertragung durch Reibungsschluß ist es nötig, die Begriffe des Reibungswiderstandes und der Reibungskraft streng auseinanderzuhalten. Eine diesbezügliche Klarstellung ist wünschenswert, weil diese zwei physikalischen Größen unter Umständen übereinstimmen.

Der Reibungswiderstand ist eine Verlustkraft, die bei jeder Bewegung in Erscheinung tritt und deren Leistung, in Wärme überführt, verloren geht. Zwecks wirtschaftlicher Kraftübertragung müssen Vorkehrungen getroffen werden, um diesen Widerstand möglichst gering zu halten. Er kann bei Eisenbahnfahrzeugen auf etwa 2,0 bis 3,0 kg je t herabgedrückt werden.

Die Reibungskraft am Radumfang ist demgegenüber das nützliche Mittel zur Fortbewegung des Zuges; je größer ihr Wert vergleichsweise zum verfügbaren Treibgewicht wird, desto vorteilhafter arbeitet die Zugförderung, d. h. man kann mit einem um so kleineren Treibgewicht, und in vielen Fällen zugleich mit einem kleineren Totgewicht, das Auslangen finden.

Die Reibungskraft je t Achslast kann erfahrungsmäßig in der Regel mit etwa

$$180 \text{ bis } 200 \text{ kg}$$

ausgenützt werden. Unter günstigen Umständen sind Zugkräfte bis 300 kg/t erzielt worden.

Die Kraftübertragung zwischen Rad und Schiene erfolgt im allgemeinen nicht mit übereinstimmender Geschwindigkeit des Fahrzeuges (v) und des Radumfanges (v_u), d. h. das Rad schlüpft gegenüber der Schiene.

Von der dem Radumfang je t Achslast zugeführten Leistung

$$v_u z$$

steht demnach zur Zugförderung nur die Leistung

$$(z - w) v$$

zur Verfügung, wobei w den der Rollbewegung entgegenwirkenden Widerstand in kg/t bezeichnet.

Der Wirkungsgrad der Kraftübertragung durch Reibungsschluß ist somit

$$\eta = \frac{(z - w) v}{z \cdot v_u}.$$

Für

$$v = v_u$$

liegt der Fall des idealen Rollens vor: das Rad wälzt sich ohne Relativbewegung zur berührten Schiene auf dieser ab. Für das ideale Rollen wird z vergleichsweise groß (100 bis 300 kg/t) und der Rollwiderstand vergleichsweise klein (2 bis 5 kg/t). Für die Zugförderung auf Eisenbahnen ist die Erreichung dieses Bewegungsvorganges erstrebenswert.

Im zweiten Grenzfall ist $v = 0$, das Rad gleitet auf der Schiene und das Fahrzeug steht still; daher wird

$$\eta = 0.$$

Ebene Bahn vorausgesetzt, wird $v = 0$, weil $z = w$ ist, d. h. die Reibungskraft wird in Gänze vom Reibungswiderstand aufgezehrt.

Es liegt der Fall des idealen Gleitens vor, bei welchem eine nützliche Kraftübertragung unmöglich ist. Die Reibungskraft ist vergleichsweise klein zu derjenigen der rollenden Reibung (30 bis 140 kg/t) und in ebener Bahn gleich dem Gleitwiderstand.

Ist an der Stelle, wo das Gleiten der Triebräder eintritt, die Bahn geneigt und wird beim Umlauf der Triebräder das Fahrzeug unbeweglich erhalten, so besteht Gleichgewicht und es gilt

$$z = h + w_{\text{Gleit}}.$$

Tatsächlich wird $z \cong w_{\text{Gleit}}$, weil unter praktischen Verhältnissen die Bahnneigung $h^0/_{00}$, die auf diese Art überwunden werden kann, vergleichsweise gering sein wird.

Mit den auf Schienen laufenden Rädern ist der reine Abwälzvorgang niemals voll zu erzielen, es wird der Übertragungsverlust einen Anteil haben, der auf die Schlüpfung, den angedeuteten Geschwindigkeitsunterschied, zurückzuführen ist; eine zweite Quelle des Übertragungsverlustes bildet die Herabminderung der nutzbaren Umfangskraft durch den Eigenwiderstand.

Immerhin ergeben die praktisch erzielbaren Reibungs- und Widerstandswerte bei Eisenbahnfahrzeugen Wirkungsgrade von

$$95 \text{ bis } 99\%.$$

Für praktische Fälle wird die Schlüpfung am Radumfang wegen ihrer Geringfügigkeit nicht besonders berücksichtigt.

Die Kraftübertragung durch gleitende Reibung wird im Zugförderungswesen beim Bremsen mit Klötzen an den Radreifen oder mit Schienenbremsen verwertet, wobei die durch den Reibungsschluß entwickelte Leistung durch Umwandlung in Wärme mechanisch verloren geht, da $v = 0$ und $w = z$ wird.

Der Widerstand der gleitenden Reibung und der Reibung der Ruhe (des Rollens) läßt sich experimentell durch Bestimmung desjenigen Neigungswinkels einer schiefen Bahn ermitteln, bei welchem der betreffende Körper die ihm erteilte Geschwindigkeit unverändert beibehält oder vom Stillstand aus gerade in Bewegung gerät.

Analytisch ausgedrückt gilt im Gefälle die Gleichgewichtsbedingung

$$1000 G \sin \alpha = G \cos \alpha w;$$

hieraus folgt

$$1000 \operatorname{tg} \alpha = w.$$

Bei gut in Stand gehaltenen, auf Schienen rollenden Fahrzeugen erreicht w den Wert von 2 bis 5 kg/t, es ist daher

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,002 - 0,005$$

und

$$\alpha = 8' \text{ bis } 20'.$$

Für den Gleitwiderstand zwischen Rad und Schiene bzw. von Stahl auf Stahl sind je nach Beschaffenheit der berührenden Oberfläche Werte von 30 bis 140 kg/t ermittelt worden. Der entsprechende Neigungswinkel beträgt 5° bis 8° .

Durch diese Klarstellung der physikalischen Eigenschaften der Kraftübertragung durch Reibungsschluß bei Eisenbahn-Triebfahrzeugen erhält man Aufschluß über alle im Betrieb auftretenden Störungserscheinungen. Verwandelt sich zufolge irgendeines Zufalles die rollende Bewegung des Rades in eine gleitende, so sinkt die übertragbare Umfangskraft von 200 bis 250 kg/t plötzlich auf 30 bis 140 kg/t. In der Folge verliert der Fahrer die Herrschaft über das Triebfahrzeug bzw. den Zug, welcher unter dem Einfluß seiner lebendigen Kraft oder der Schwerkraft im Gefälle die Fahrt gegen den Willen des Fahrers fortsetzt.

2. Die Reibungsgrenze. Mit Hilfe dieser Versuchsanordnung läßt sich auch die Reibungsziffer für den Reibungsschluß zwischen Rad und Schiene ermitteln.

Es sei angenommen, ein mit dem Gewicht G^t belasteter Rollkörper bewege sich unter dem Einfluß einer Umfangskraft T^{kg} gleichmäßig bergauf oder bergab. Im ersten Falle hat die Umfangskraft den Rollwiderstand $wG \cos \alpha$ und die der Bahnneigung entsprechende Teilkraft der Achslast $1000 G \sin \alpha$ zu überwinden. Bei Talfahrt wirken diese beiden Kräfte einander entgegen.

$$T = 1000 G \sin \alpha \pm G \cos \alpha w.$$

Für den angenommenen Grenzfall der vollen Ausnützung der Reibung ist

$$T = 1000 G \cos \alpha \mu,$$

somit

$$1000 \mu = \operatorname{tg} \alpha \pm w.$$

Da $\operatorname{tg} \alpha = h^0/100$, die Bahnneigung, und $1000 \mu = z$, die spez. Reibungskraft je t, ist, folgt

$$h = z \mp w.$$

Diese Gleichung besagt, daß die Neigungsgrenze für den Reibungsbetrieb der Eisenbahnen lediglich durch die vorliegenden physikalischen Eigenschaften der Radoberfläche und der Schiene bestimmt wird und daß die Neigungsgrenze, wenn alle Achsen angetrieben werden, unabhängig vom Zuggewicht ist.

Durch strenge Auseinanderhaltung der physikalischen Größen gelangt man somit zu dem Ergebnis, daß es drei verschiedene Grenzwerte des Neigungswinkels für die Kraftübertragung mit rollender Reibung gibt:

1. Der Grenzwert h_R für den Zustand der Ruhe ($w = 0$).
2. Der Grenzwert h_B für die stetige Bergfahrt ($+w$).
3. Der Grenzwert h_T für die stetige Talfahrt ($-w$).

Da z als unveränderlich angesehen werden kann, ist

$$h_R = z, \quad h_B = z - w \quad \text{und} \quad h_T = z + w$$

und der Größenordnung nach

$$h_T > h_R > h_B.$$

Praktisch treten die diesbezüglichen Zusammenhänge wenig in Erscheinung, weil

$$z = 200 \text{ bis } 250 (300) \text{ kg} \quad \text{und} \quad w = 2 \text{ bis } 5 \text{ kg}$$

ist; im ungünstigsten Fall gilt daher die Ungleichung

$$205 > 200 > 195.$$

Immerhin geht aus dieser Betrachtung die Tatsache hervor, daß für die Überwindung großer Steigungen ein niedriger Rollwiderstand von Vorteil ist bzw. die mit Reibungs-

betrieb überwindbare Steigung wächst, wenn der Rollwiderstand fällt, während die Sicherheit der Talfahrt durch Vergrößerung des Rollwiderstandes erhöht wird.

Theoretisch können mit Reibungsbetrieb, etwaige Beschleunigung oder Verzögerung unberücksichtigt gelassen, Steigungen bis etwa

$$h_B = 250 - 5 = 245\text{‰},$$

somit Neigungen bis 14° befahren werden. (Vom Verfasser auf der Zahnradbahn Triest-Opcina durch Versuchsfahrten nachgewiesen.)

Da jedoch das Gleiten der Räder niemals mit unbedingter Sicherheit zu vermeiden ist und eine Steigerung der Umfangskraft unvorhergesehenerweise eintreten kann, 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 Gefälle handelt. (Gmunden 90‰ Fallbremse, Pöstlingberg 105‰ Zangenbremse mit Keilkopfschiene, Triest-Opcina 80‰ Bremszahnstange, Mendel-Dermullo, Iglau, Schienenbremse.)

3. Das angehängte Zugsgewicht. Im allgemeinen wird nur ein Teil der Zuglast auf den angetriebenen Achsen ruhen, d. h. man hat zwischen Treibgewicht (**Reibungsgewicht** R) und der angehängten Zuglast, dem Zugsbrutto, zu unterscheiden.

Die bei Vollbahnen erforderlichen Leistungen benötigen für die Triebfahrzeuge meist ein Baugewicht, das größer ist als das zur Ausübung der verlangten Zugkraft erforderliche Reibungsgewicht, d. h. die Zugmaschine muß Laufachsen erhalten. Das auf diesen ruhende Gewicht (L) ist wie das angehängte Gewicht zu behandeln.

Die Zugkraft am Radumfang ist gleich der gesamten zur Fortbewegung (Beschleunigung) des Zuges erforderlichen Zugkraft

$$1000 R\mu = (R + L + G)(h + w + 100\gamma),$$

wenn man für das Treib-, Lauf- und Anhängengewicht dieselben Widerstandswerte einsetzt (was für die gegenständliche Betrachtung zulässig ist, ohne die Größenordnung des Ergebnisses zu beeinflussen).

Für

$$L = 0, \quad \frac{G}{R} = n$$

wird

$$z = 1000\mu = (1 + n)(h + w + 100\gamma)$$

und das Verhältnis zwischen Anhängelast und Treibgewicht

$$n = \frac{1000\mu}{h + w + 100\gamma} - 1.$$

Für $n = 0$ tritt der früher betrachtete Fall des reinen Motorwagenbetriebes mit lauter angetriebenen Achsen ein.

Für den Fall, daß das gesamte Zugsgewicht als Treibgewicht ausgenützt ist, gilt die Beziehung

$$h = z - w,$$

die eine volle Unabhängigkeit vom Treibgewicht zeigt. Im vorliegenden allgemeinen Fall (jedoch $\gamma = 0$ angenommen) beeinträchtigt die Anhängelast (G) wirksam den Wert der mit Reibungsbetrieb überwindbaren Bahnneigung, wie die Gleichung

$$h = \frac{z}{1 + \frac{G}{R}} - w$$

zeigt.

Umgekehrt nimmt mit zunehmender Steigung das angehängte Zugsbrutto rasch ab. Für

$$z = 100, \text{ d. h. } \mu = \frac{1}{10}, \quad \gamma = 0, \quad w = 5^0/_{00}, \quad s = 45^0/_{00},$$

wird z. B. $n = 1$, d. h. das Brutto ist gleich dem Treibgewicht.

Tatsächlich erweist sich diese Steigung als die wirtschaftliche Grenze für Nebenbahnen.

Die bei Vollbahnen meist nicht überschrittene Höchststeigung beträgt $25^0/_{00}$; setzt man für $\mu = \frac{1}{7}$, so wird

$$n = \frac{143}{25 + 5 + 5} - 1 = 3,1;$$

für $30^0/_{00}$ folgt

$$n = \frac{143}{30 + 5 + 5} - 1 = 2,6.$$

Die das Zugsgewicht herabsetzende Wirkung der Steigung kann durch Verringerung der Beschleunigung ausgeglichen werden. Andererseits hängt die Größe des angehängten

Zugsbrutto unmittelbar von der Reibungsziffer ab. Diese läßt sich vorübergehend durch künstliche Mittel, wie Sandstreuungen, 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 $20^0/_{00}$ größer ist, gilt als wirkliche Reibungsziffer $\mu = 1 : 5,2$.

In ebener Bahn geht man bei Dampfbetrieb bis auf 190 kg.

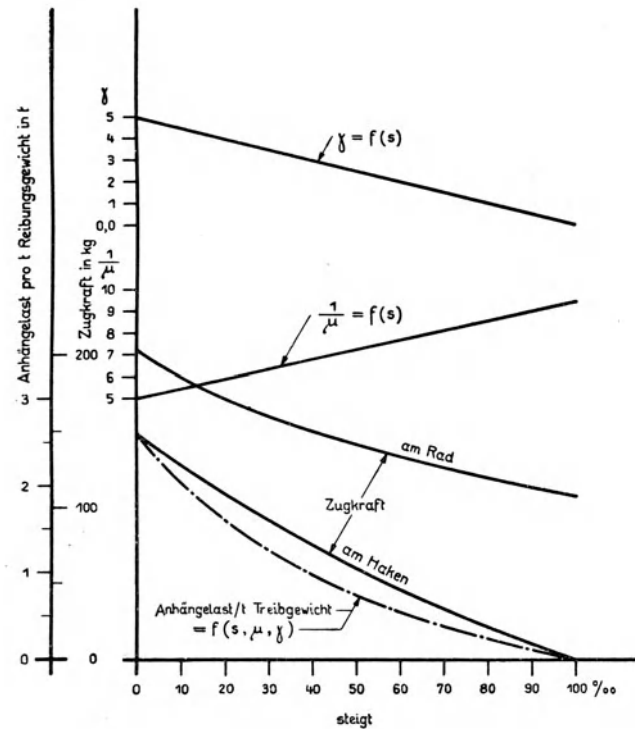


Abb. 144. Belastungstafel für Straßenbahntriebwagen; die Anhängelast, die zweckmäßige Beschleunigung und Reibungszahl in Abhängigkeit von der Steigung (s).

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 unvorgesehen ungünstigen Fällen den Zug noch halten zu können. Andererseits wird man, um mit einer bestimmten Motorausrüstung 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 die Zwischenwerte geradlinig, so daß allgemein

$$\frac{1}{\mu} = 0,0455 s + 5 \quad (w = 5)$$

und

$$\gamma = 0,5 - 0,005 s$$

wird (Abb. 144).

4. 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, wie weiter oben festgestellt wurde, wesentlich größer als diejenige der gleitenden Bewegung. Andererseits bewirken große Flächendrücke auch eine Herabsetzung der spez. Zugkraft, weil durch erstere 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 und 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

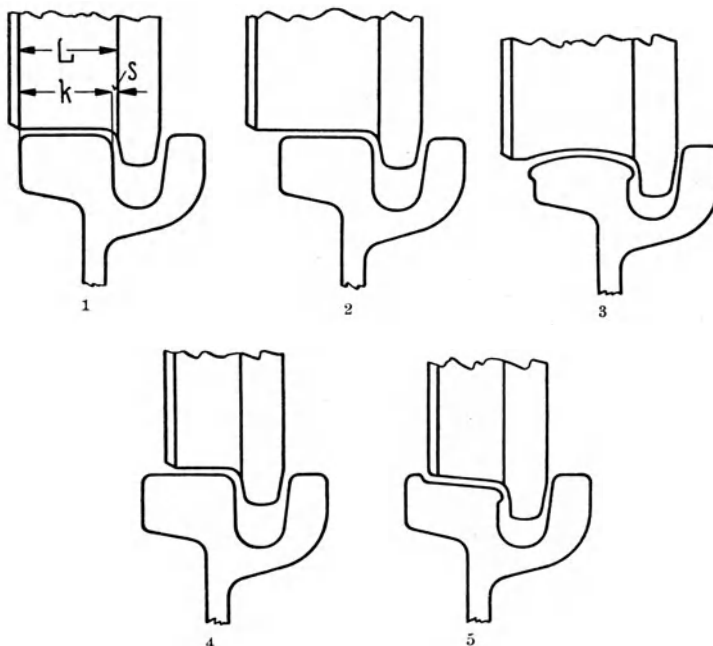


Abb. 145. Paarung von Rad und Schiene; 1 Radreifenbreite im Einklang mit dem Schienenkopf; 2, 3 Radreifen zu breit; 4, 5 Radreifen zu schmal.

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 Gefplogenheit, 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 überwiegt. 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 Abwälzgeschwindig-

keit; alle Flächenelemente mit

$$R' \leq R = \frac{v60}{2\pi n}$$

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, obwohl 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. Elektrische Bahnen haben jedoch oft große Steigungen zu überwinden, bzw. es werden — was auf das gleiche herauskommt — große Anfahrbeschleunigungen oder Verzögerungen benötigt, wobei der Sandstreuer tunlichst nicht in Anspruch zu nehmen ist. Für die sichere Wirkung ist es aber 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 80⁰/₀₀ Steigung der Bahn Triest-Opicina 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.

Sinngemäß sind konstruktive Vorkehrungen bei Entwurf und Ausführung des Oberbaues und der zugehörigen Radsätze zu treffen, damit die ursprünglich vorhandene ideale Paarung von Rad und Schiene auch möglichst erhalten bleibt. Diesbezüglich ist es 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 gleich der Breite des Schienenkopfes zuzüglich des freien Spiels zwischen den Spurkränzen 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 (Abb. 145).

Vom Standpunkt der möglichst langen Aufrechterhaltung der idealen Radreifenform ist die Bremsung der Räder mittels Klötzen grundsätzlich verfehlt.

5. 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 von 1 bis 4 t gekennzeichnet.

Bei Straßenbahnen mit Rillenschienenoberbau geht man nicht über 10 t; für Lokalbahnen mit Schmalspur sind 6 bis 8 t, bei 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 sind wirksame Mittel zur Begrenzung der Beanspruchung der Triebmaschine.

Rad und Schiene bilden gewissermaßen eine Rutschkupplung, welche die Überschreitung bestimmter Zugkräfte nicht zuläßt.

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 stimmt mit der Periodizität der Zugkraft überein; im allgemeinen treffen die hierzu erforderlichen Voraussetzungen nicht zu.

6. Das spezifische Baugewicht und die Reibungsgeschwindigkeit von Triebfahrzeugen.

Das Gewicht Q t eines Triebfahrzeuges setzt sich aus der auf m Triebachsen mit je R t und der auf n Laufachsen mit je L t ruhenden Belastung zusammen.

Zur Erzielung einer guten Lauffähigkeit eines Triebfahrzeuges ist es üblich, die Laufachsen etwas weniger zu belasten als die Treibachsen, so daß

$$R = p L$$

ist, wobei

$$1,5 > p > 1.$$

Das Lokomotivgewicht kann somit gemäß obigen Angaben über das Laufwerk durch die Gleichung

$$Q = m R + n L = R \left(m + \frac{n}{p} \right)$$

ausgedrückt werden.

Bei Ausnützung des gesamten Reibungsgewichtes von $m R$ t mit der Reibungszahl

$$z = 1000 \mu$$

kann das Triebfahrzeug eine Leistung von A PS entwickeln, wobei

$$A = \frac{m R z v}{270}$$

ist und v die Fahrgeschwindigkeit in km/h bezeichnet.

Für die Kosten des Triebfahrzeuges ist der Aufwand an Baustoffen für die Einheit der Leistung maßgebend. Die Maßzahl q für die Baustoffwirtschaft, nämlich das spezifische Baugewicht in kg je PS, ist eine auch sonst für die Auslegung des Fahrzeuges interessierende Zahl:

$$q = \frac{1000 Q}{A}$$

Substituiert man in diese Gleichung die oben abgeleiteten, die konstruktiven und physikalischen Größen des Fahrzeuges erfassenden Werte, so findet man für q die Beziehung

$$q = \frac{270}{\mu v} \left(1 + \frac{n}{m p} \right),$$

die zu weiteren Schlußfolgerungen herangezogen werden kann.

q ist eine aus zahlreichen Lokomotivausführungen, meist für die Stundenleistung ausgewertete Zahl, die eine gewisse Gesetzmäßigkeit in Abhängigkeit von der Größe der Lokomotivleistung erkennen läßt (Abb. 147). Für einen bestimmten ins Auge gefaßten Entwurf kann diese Kennzahl als gegeben angesehen werden. Die Reibungszahl ist den Umständen entsprechend zu wählen. Hieraus bestimmt sich diejenige Höchstgeschwindigkeit, genannt Reibungsgeschwindigkeit,

$$v = \frac{270}{\mu q} \left(1 + \frac{n}{m p} \right),$$

mit welcher das Fahrzeug von festgesetzter Leistung bei voller Ausnützung der Reibung fahren kann.

Besonderes Interesse verdient der durch

$$n = 0$$

gekennzeichnete Sonderfall, daß sämtliche Achsen angetrieben werden. Dann wird

$$v = v_r$$

und

$$v_r = \frac{270}{q\mu} = \frac{270000}{qz}$$

Es sei $z = 180 \text{ kg/t}$, dann wird $v_r = \frac{1500}{q}$ und für $q = 50 \text{ kg/PS}$, ein für Maschinen mittlerer Leistung erzielbares spez. Gewicht, wird

$$v_r = 30 \text{ km/h.}$$

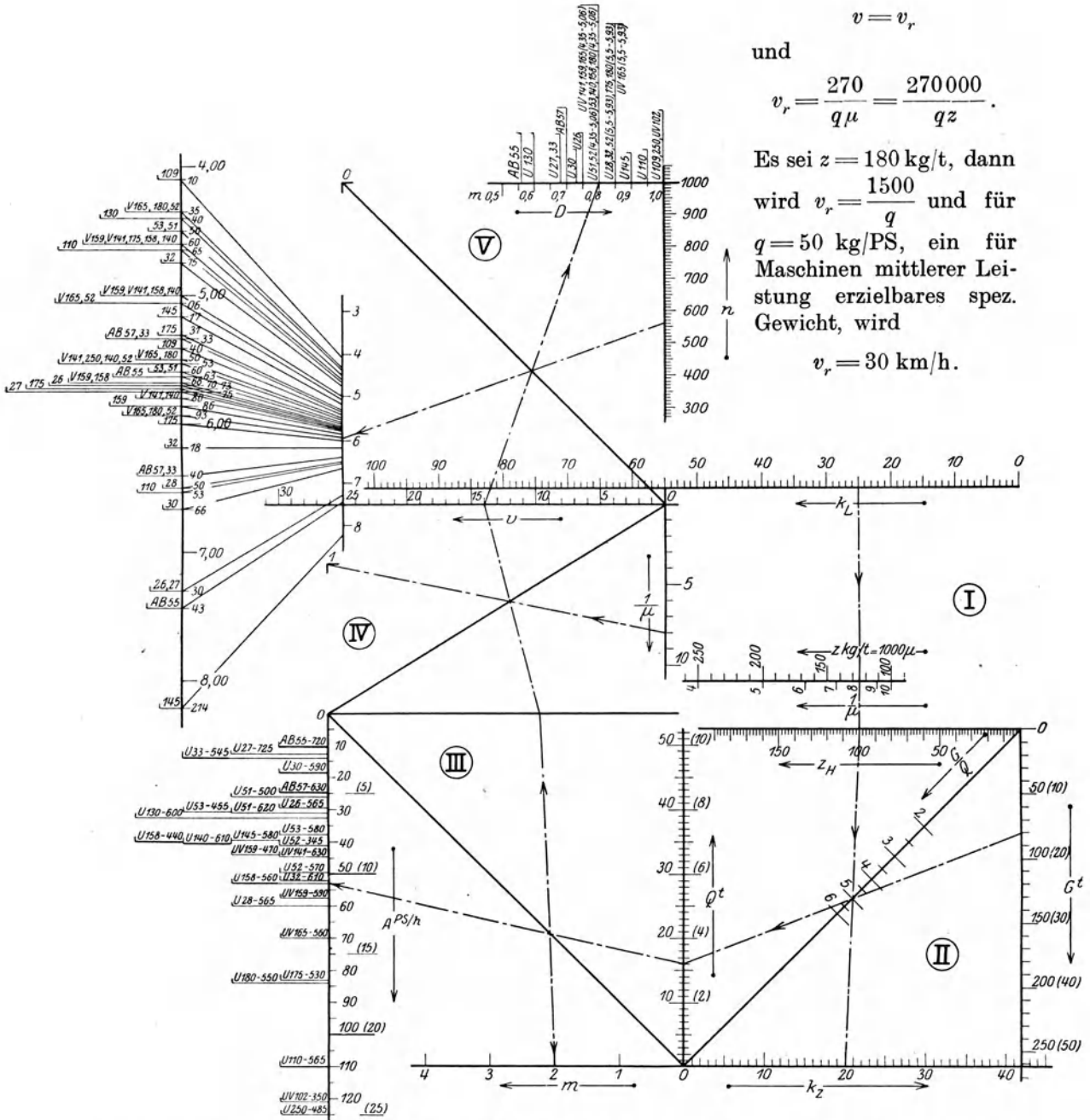


Abb. 146. Rechentafel zur Bestimmung der Motorleistung (Drehzahl, Übersetzung, Raddurchmesser) aus dem Zugsgewicht, der Steigung und der Fahrgeschwindigkeit.

Beispiel: $k_L = 25$, $k_z = 20$, $\mu = \frac{1}{8}$, $z = 125$, $G = 80$, $Q = 16$, $m = 2$, $v = 14$,
Motor $U = 158$, $A = 53$, $D = 0,8$, $n = 560$, $\ddot{u} = 5,93$.

Der Einfluß der Baustoffwirtschaft wird durch diese Beziehung augenfällig, ist doch zu ersehen, daß ein erhöhter Aufwand für die Leistungseinheit die erreichbare Geschwindigkeit herabsetzt. Für $q = 60 \text{ kg/PS}$ wird

$$v_r = 25 \text{ km/h.}$$

Da μ ebenso wie q im Nenner des Ausdruckes für v_r vorkommt, hat die Ausnützung der Reibung die gleiche Wirkung wie eine hohe Baustoffwirtschaft.

Zu beachten ist, daß

$$\frac{v_r z}{270000} = \frac{1}{q}$$

die bei Triebfahrzeugen ohne Laufachsen je Tonne Gewicht erzielbare Leistung bezeichnet.

Für Fahrzeuge mit Laufachsen lautet der Ausdruck für die spezifische Leistung PS/t:

$$\frac{1}{q} = \frac{\mu v}{270 \left(1 + \frac{n}{mp}\right)}$$

7. Rechentafeln für das Triebfahrzeug. Der Zusammenhang der physikalischen und konstruktiven Größen kann in einer Rechentafel (Abb. 146) zusammengefaßt werden, so daß die gegenseitige Beeinflussung der in Betracht kommenden Größen leicht übersehen werden kann.

Die Treibachszahl m eines Fahrzeuges mit Q t Gesamtlast auf den Treibachsen sei zu bestimmen, wenn das mit v km/h Geschwindigkeit zu befördernde Anhängengewicht (Bruttolast) von G t gegeben ist. Die Steigung (Gefälle) sei $h^0/00$, die Rollwiderstände für die Treibachslast w_L , für die angehängte Last w_z , die Bahnwiderstände k_L bzw. k_z , wo $k_L = w_L \pm h + 100 \gamma$ und $k_z = w_z \pm h + 100 \gamma$. Die Reibungszahl μ sei den Verhältnissen entsprechend zu wählen.

Jede Bahnverwaltung pflegt eine Reihe von Raddurchmessern D als Regelmaße zu verwenden, weiters stehen bestimmte Motortypen der Regelbauart zur Verfügung, die die Anwendung gewisser kleinster Raddurchmesser D , Drehzahlen n je min. und Übersetzungen \ddot{u} voraussetzen.

Es bestehen folgende Beziehungen, die in die zur nomographischen Darstellung jeweils geeignete Form überführt werden können.

Die Zugkraft am Radumfang ist bei voller Ausnutzung der Reibung

$$1000 Q \mu = Q k_L + G k_z,$$

hieraus folgt, daß

$$\frac{G}{Q} = \frac{1000 \mu - k_L}{k_z} = \frac{z_H}{k_z} = N,$$

wobei der Ausdruck im Zähler die Zugkraft am Haken je Tonne Reibungsgewicht bezeichnet.

N ist das Verhältnis des angehängten Zugsbruttos zum Treibgewicht. Hat das Triebfahrzeug auch Laufachsen, so ist das auf diesen lastende Gewicht der Anhängelast zuzurechnen.

Zunächst ist der Ausdruck für die Zugkraft am Haken je Tonne Reibungsgewicht

$$z_H = 1000 \mu - k_L,$$

in einem Summennomogramm (I) darzustellen (Abb. 146). Die Mittelskala trägt die Werte von $z = 1000 \mu$ und zweckmäßigerweise auch von $1:\mu$.

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 werden müssen. Anders ausgedrückt, sagt obige Gleichung, daß die Zugkraft am Haken Null wird, daher nichts mehr angehängt werden kann.

Die Zugkraft am Haken für die Tonne Reibungsgewicht z_H kann nur dann verschwinden, wenn

$$z_H = 1000 \mu - k_L = 0.$$

Jede Suchlinie vom Punkte

$$z_H = 0$$

über verschiedene Werte von

$$1 : \mu \text{ bzw. } 1000 \mu = z$$

gezogen, weist zu dem betr. Grenzwert von k_L , wobei zu erinnern ist, daß

$$\overline{k_L} = w_L + h + 100 \gamma.$$

Es ist somit gleichgültig, welcher der drei Anteile des Fahrwiderstandes überwiegend ist.

Im Bergbahnbetrieb wird w_L und 100γ gegenüber h an Bedeutung zurücktreten. Im Stadtbahnbetrieb wird 100γ überwiegen, in Straßenbahnbetrieben 100γ und h 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 erforderlichen 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 Zugs- gewicht 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 durch die Anzahl der vorhandenen Trieb- achsen bzw. Motoren ausgedrückt werden, da 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, so wird

$$L = mA.$$

Andererseits gilt

$$L = \frac{1000 Q \mu v}{270},$$

wobei Q das gesamte Reibungsgewicht in t und v die Geschwindigkeit in km/h bezeich- net. 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 ohne Laufachsen, da in diesem Falle $q = 270 : \mu v$ wird.

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

$$\lambda = \mu v = \frac{270}{q} \quad \text{und} \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{q}{270}$$

gelöst.

Nomogramm V dient als Behelf, um aus den geometrischen Verhältnissen des Motors den entsprechenden Raddurchmesser D und die verwendbare Übersetzung zu bestimmen, da

$$v = \frac{D \pi n \cdot 3,6}{60 \cdot \ddot{u}} \text{ km/h}$$

und 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 je Treibachse 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 vorliegenden Aufgabe fest, so daß zur Steigerung der Leistung je 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.

8. Das Gewicht ausgeführter Lokomotiven. Die Aufgabe des Entwurfes einer Lokomotive ist vielfach so gestellt, daß auf Grund der Erfahrungswerte der Zugförderung die notwendige Achsfolge vorgeschrieben wird.

Durch die erzielten spezifischen Baugewichte sind auch die Leistungen — und zwar Stunden- und Dauerleistungen — angenähert gegeben, die auf den Lokomotiven untergebracht werden können. Mit Hilfe der Rechentafel (Abb. 146) kann, unter Benützung tunlichst 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 gemäß der Beziehung

$$1000 Q = q L,$$

bestimmt, wobei q das von L abhängige spez. Gewicht kg/PS bedeutet; $q = f(L)$ ist eine empirische Funktion. 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

$$Q = m R.$$

Für ein gegebenes Lokomotivgewicht und für eine bestimmte Achszahl kann die

Leistung, die untergebracht werden kann, erst durch Annäherung gefunden werden. Eine Rechentafel (Abb. 147) löst diese Aufgabe kurzerhand.

Die Mittelwerte für ausgeführte Vollbahnlokomotiven sind in folgender Tabelle wiedergegeben:

Stundenleistung PS	Gewicht für die Pferdestärke kg
500	90
750	79
1000	70
1500	58
2000	49
3000	45

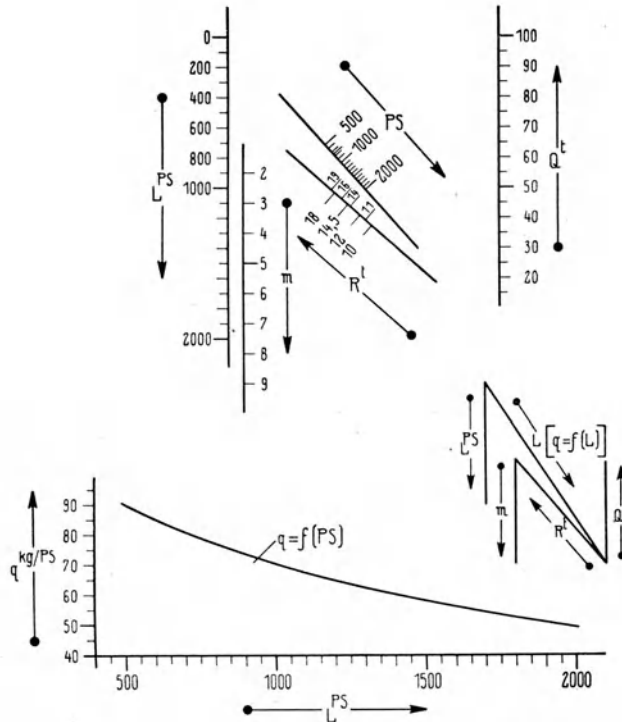


Abb. 147. Abhängigkeit des spez. Lokomotivgewichtes von der Leistung und Rechentafel zur Bestimmung des Lokomotivgewichtes aus der Leistung.

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 spez. Gewicht der elektrischen Lokomotive als Ganzes ist auch von Interesse, den Anteil der Mechanik und der elektrischen Ausrüstung zu kennen.

Verhältnismäßig am leichtesten sind die elektrischen Ausrüstungen von Gleichstrom - Mittelspannungs-

maschinen; diese beanspruchen etwa 38,5% vom Gesamtgewicht. Die elektrische Ausrüstung der neueren amerikanischen Gleichstromlokomotiven für 3000 V Gleichstrombetrieb benötigt 40,5%.

Drehstrom- und Einphasenausrüstungen beanspruchen rd. 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.

9. 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 über den Zusammenhang aller Größen und führt ohne Rechnung mit geringem Zeitaufwand zum Ziel. Das Verfahren unterscheidet sich insofern grundsätzlich von anderen von Pforr,

Hruschka, Hohenegg, Kadrnozka und anderen entworfenen Hilfsmitteln, da bei diesen alle zeichnerischen Behelfe für jeden vorliegenden Fall neu aufgelegt werden müssen, wogegen die nomographischen 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. 148).

Da sich bei dieser Aufgabe mit Rücksicht auf den mathematisch nicht bestimm- baren Zusammenhang von Zugkraft und Geschwindigkeit mit der zugehörigen Strom- stärke des Triebmotors der grundsätzliche Mangel von Punktskalen — so daß man Zwischenwerte schätzen muß — geltend machen könnte, empfiehlt sich eine Darstellung unter Mitbenützung der Motorkennlinien in einem rechtwinkligen Bezugssystem.

Als Erstes stellt man die Zugswiderstandsfunktion

$$w = f(v) \text{ kg/t}$$

im rechtwinkligen Bezugssystem dar. Die Ordinate macht man unter einem zum Skalenträger eines Parallelkoordinatensystems zur Auswertung des gesamten Fahrwider- standes 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 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

$$B = Z - W,$$

wobei Z die Motorzugkraft bedeutet. Die Entfernung der drei Achsen dieses Parallel- koordinatensystems bemißt man so, daß im Zwischenraum die Kennlinien des gewählten Motors $Z = f(v)$ und $Z = f(J)$ in einem rechtwinkligen Bezugssystem gezeichnet werden können. Der 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 inter- essiert 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 betreffenden Werte können in der Rechentafel in den betreffenden Skalen kenntlich gemacht werden und weisen darauf hin, daß sie nicht überschritten werden dürfen.

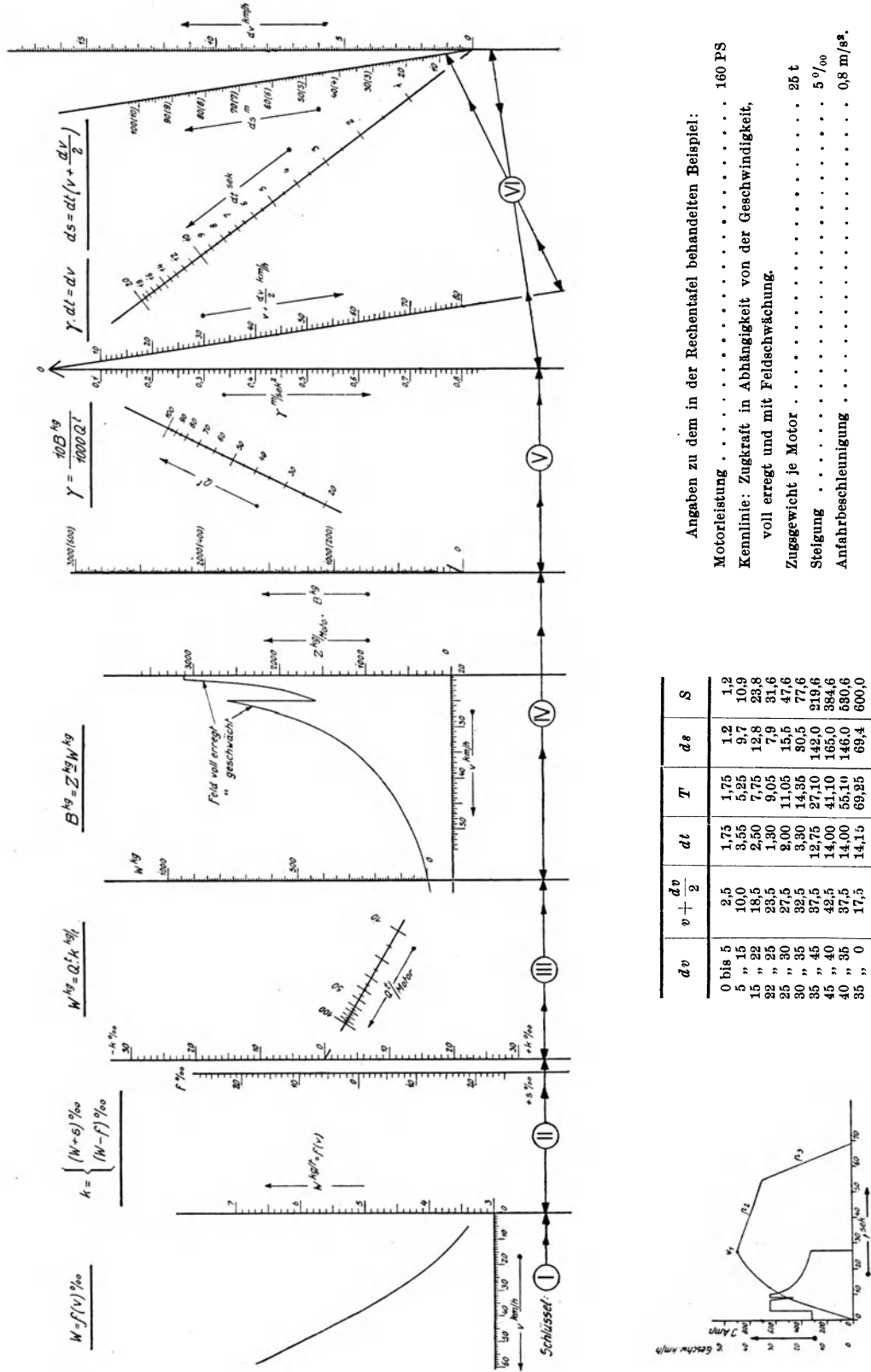


Abb. 148. Rechentafel zur Ermittlung von Bewegungsbildern.

Zwei weitere Z-Tafeln für

$$dv = \gamma dt$$

und

$$ds = v dt,$$

mit gemeinsamer Achse für dt , geben schließlich die gesuchten Werte von v und s in Abhängigkeit von der Zeit und damit das vollständige Fahrdiagramm.

Für v ist stets der jeweils angesetzte Mittelwert zu berücksichtigen, d. h. es ist

$$v_{n+1} = v_n + \frac{dv}{2}.$$

Praktisch wird man mit Rücksicht auf zeichnerische Zweckmäßigkeit gesonderte 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 auf Grund der 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 darauf, daß es sich bei Bestimmung der Zugsbruttos um einen Beharrungszustand handelt, ist für diesen Fall γ und B gleich 0 zu setzen.

Handelt es sich nicht um einen neuen Entwurf, sondern um die Feststellung der Zugsbruttos, die einer gegebenen Lokomotive auf bestimmten Steigungen angehängt werden können, wobei unter

einem die innerhalb der 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

$$Z = Q_L(k_L + h) + G_Z(k_Z + h)$$

in die Form

$$k_Z + h = \frac{Z - Q_L(k_L - k_Z)}{P},$$

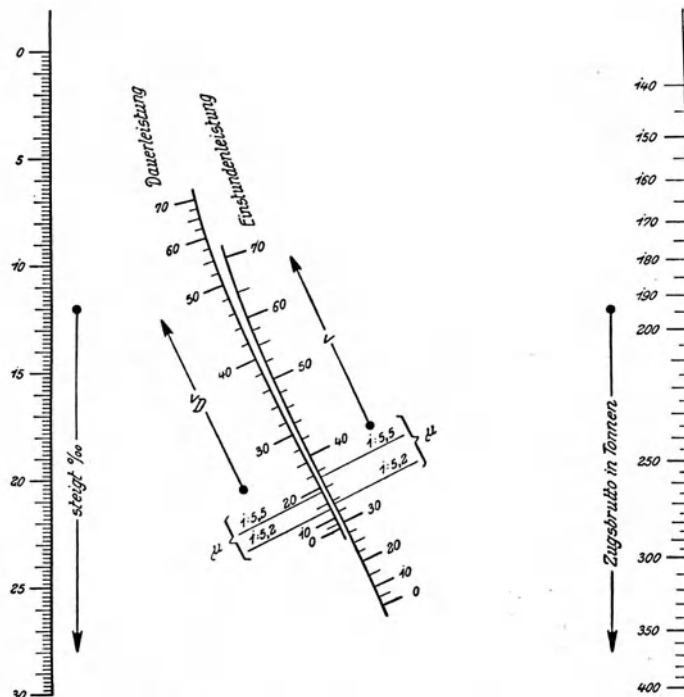
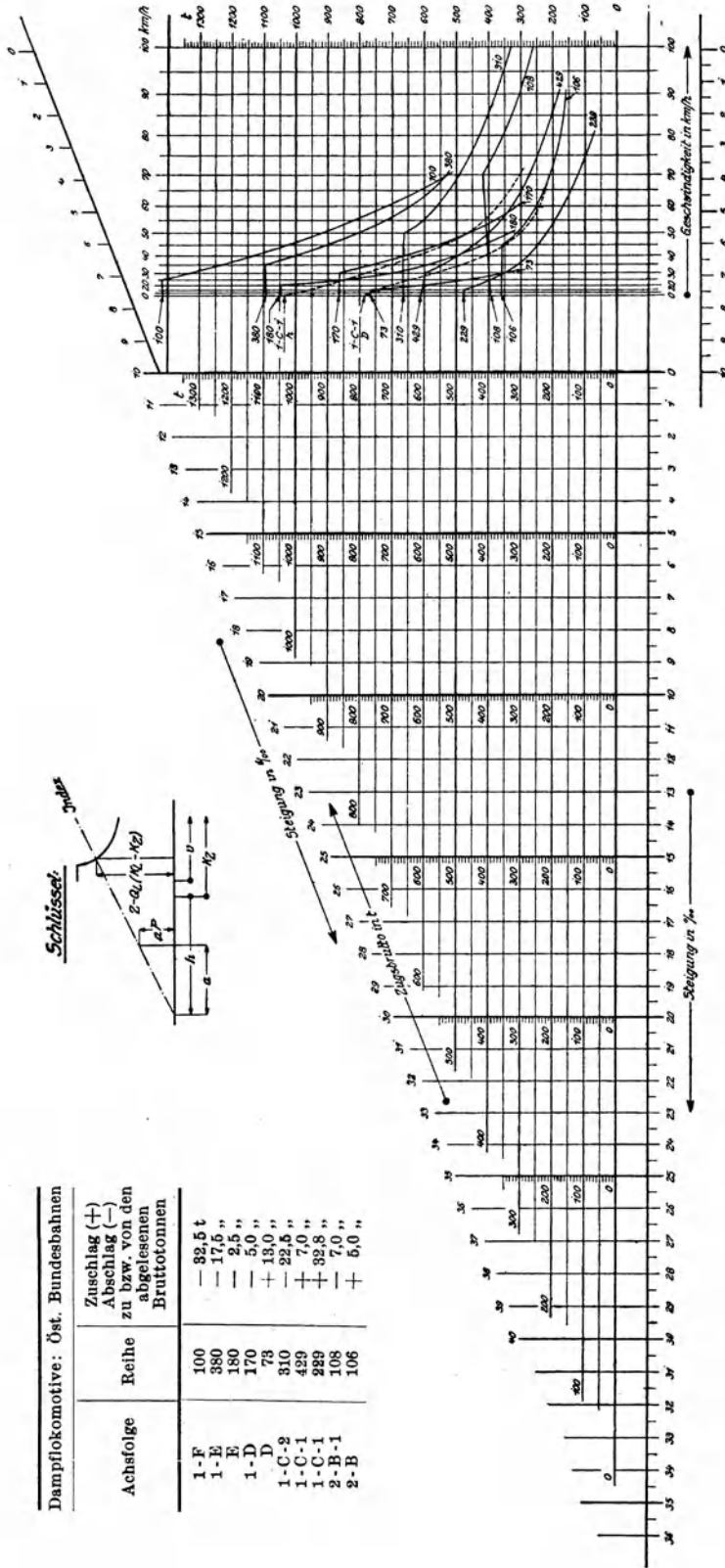


Abb. 149. Rechentafel (Belastungstafel) zur Bestimmung der Zugsbruttos (Bruttotonnen) in Abhängigkeit von der Steigung h in ‰ und der Geschwindigkeit v in km/h.

Lokomotive: Achsfolge	1 - C - 1
Dienstgewicht	68,0 t
Reibungsgewicht	43,5 t
2 Motoren	1400 PS
Raddurchmesser	1614 mm
Übersetzung	1 : 4



$$\text{Gleichung: } \frac{kZ + h}{Z - Q_L \cdot (k_L - k_Z)} = P \cdot \alpha$$

Symbole:

- P = $Q_L + GZ$ gesamtes Zugsgewicht in t
- Q_L Lokomotiv-Dienstgewicht in t
- GZ 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
- h Steigung in ‰/100
- α Festwert

Abb. 150. Belastungstafel für Dampflokotiven System Seefehlner (Gebirgstrecken für kleine Geschwindigkeiten und große Steigungen, Kennlinien der Dampflokotiven nach Sanzin).

wo

$$P = Q_L + G_Z,$$

läßt sich diese in einer Fluchtlinientafel mit krummliniger Mittelskala darstellen.

Die obige Gleichung entspricht der Grundform

$$A + B = C,$$

wobei

$$A = h, \quad C = k_Z = f(v) \quad \text{und} \quad B = F(v, P) \text{ ist.}$$

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. 149 stellt eine Fluchtlinientafel für eine 1400 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

$$\frac{k_Z + h}{Z - Q_L(k_L - k_Z)} = \frac{a}{Pa}$$

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. 150 beigegebenen Schlüssel zu entnehmen ist.

Angeschrieben sind nur die für den Betriebsbeamten wichtigen Größen, h die Steigung, v die Geschwindigkeit und das angehängte Zugsgewicht G .

Um die Belastungstafel gleichzeitig für eine Reihe Lokomotiven mit verschiedenem Dienstgewicht benutzen zu können, müßten die Nullpunkte der Ordinatenenteilung 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 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 des Lokomotivgewichtes von dem oben gewählten runden Wert.

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 $h\%$ befördern?

Man verbindet den der Fahrgeschwindigkeit v entsprechenden Punkt der Lokomotivcharakteristik mit der Kote h auf der Abszissenachse (Abb. 150); der Schnittpunkt dieser Suchlinie mit der demselben h -Wert entsprechenden Ordinate der $(h - a)$ -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 nur um 32 t weniger angehängt werden. Eine leichtere Lokomotive zieht umgekehrt dem Gewichtsunterschied entsprechend ein höheres Brutto.

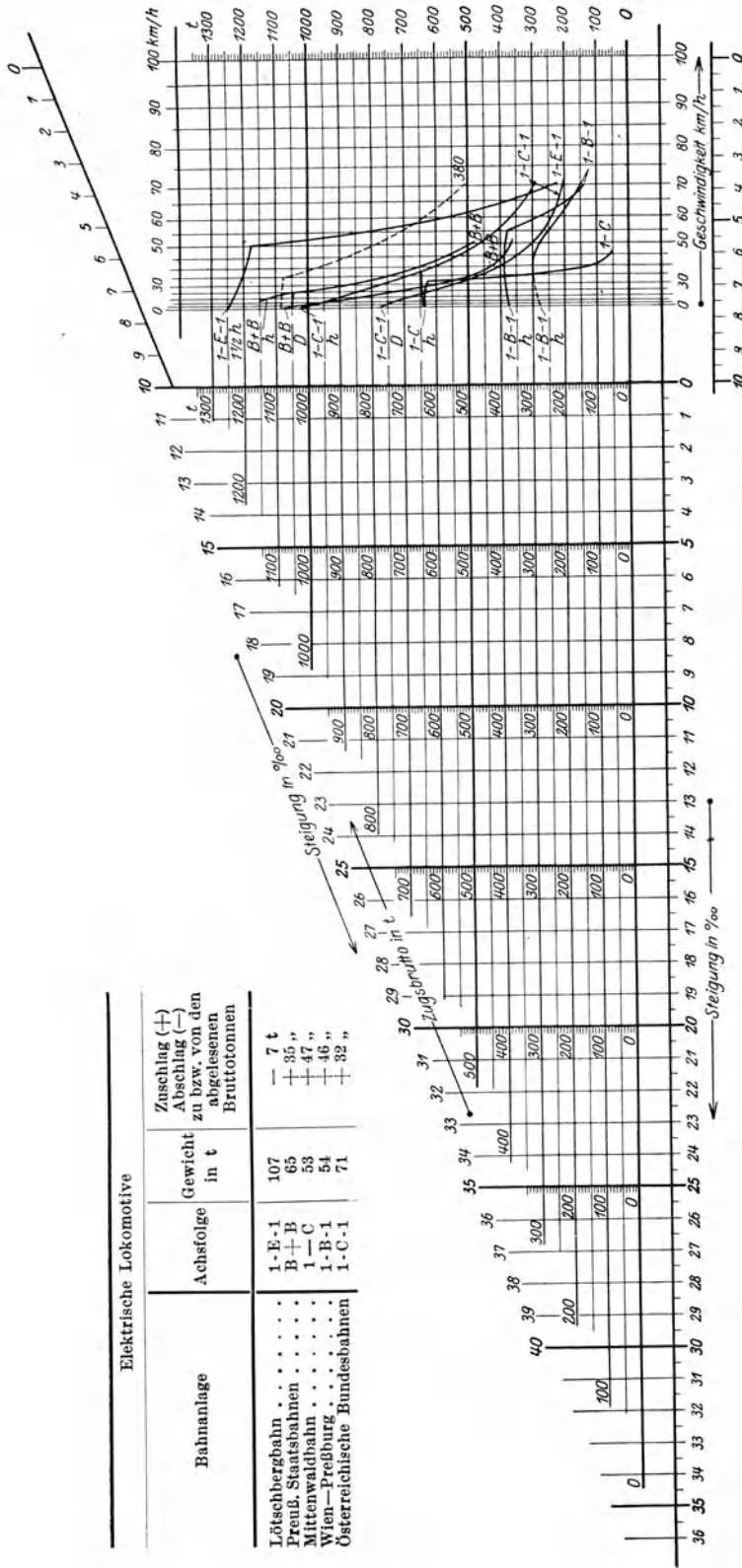


Abb. 151. Belastungstafel für elektrische Lokomotiven (zum Vergleich Kennlinie der Reihe 380, 1-E, Dampflokomotive der Österreichischen Bundesbahnen).

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 h ‰ 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 h auf der Abszissenachse zu dem $G \pm Q$ Wert auf der in h gezogenen Ordinate der ($h - a$)-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 neuerlichen Suchstrahles den genauen Wert der Geschwindigkeit bzw. des Zuggewichtes erheben, welches durch die gewählte Lokomotivtype gefördert werden kann.

Die Rechentafel läßt weiterhin sofort erkennen, welche Geschwindigkeit für eine bestimmte Dampf-

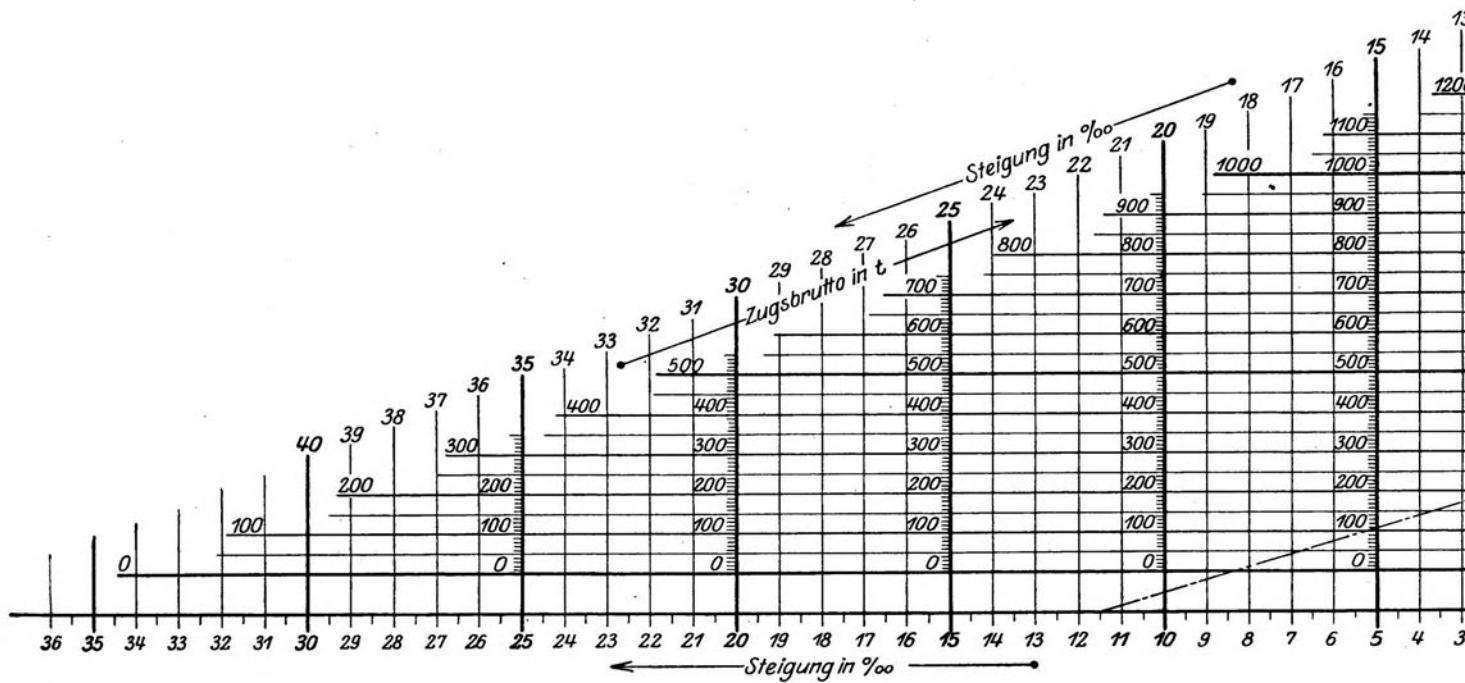
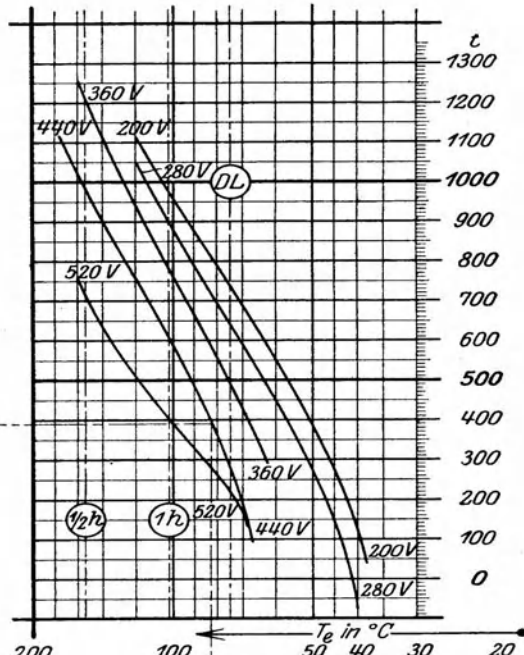
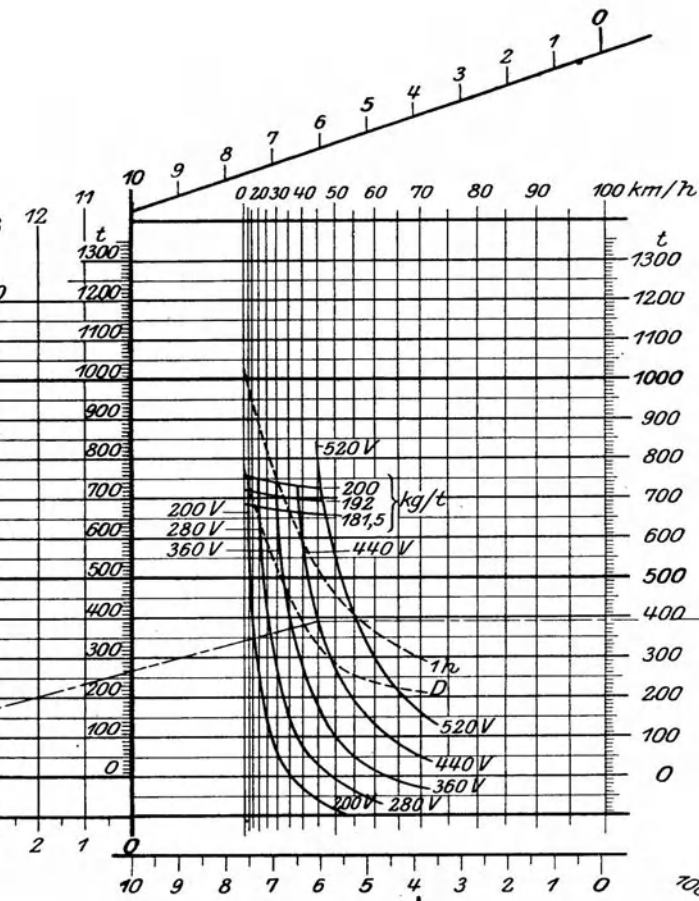
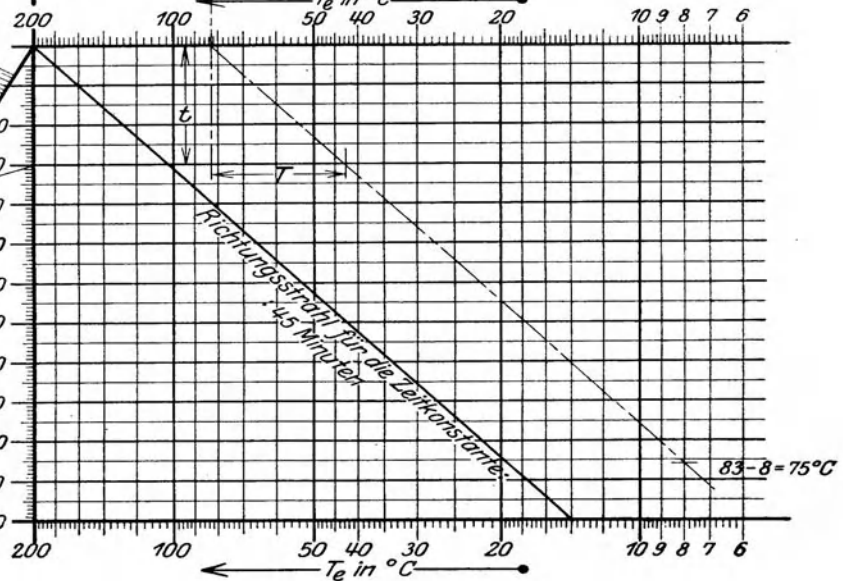
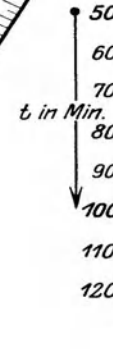
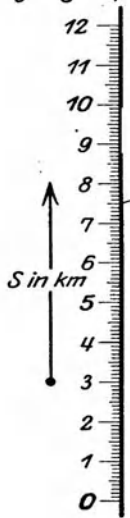


Abb. 152. Belastungstafel einer 1400 PS-71 t-1 C 1-Wechselstromlokomotive zur B Fahrstufen und der Erwärmung der Motoren in Abhängigkeit von der Steigung und die geltenden Spannungs-, Strom- ($\frac{1}{2}$, 1^h , dauernd) Drehzahlgrenzen können gleich werden, ebenso die zurückgelegte Wegstrecke bei der der Fahrstufe entsprechenden
 Beispiel: $h = 11,5 \text{ ‰}$.



Bestimmung der
 Zugsgewicht;
 gleichzeitig abgelesen
 Geschwindigkeit



lokomotive vorzuziehen ist, denn wenn auch die charakteristischen Linien die mit dem angehängten Zug auf gleichen Zugwiderstand 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 Ausnützung der elektrischen Lokomotive (Abb. 151) unterliegt keiner Beschränkung dieser Art, da ihr Wirkungsgrad in einem vergleichsweise großen Bereich befriedigend ist. Dagegen bestehen andere Beschränkungen, die im Nomogramm 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. 152 für fünf Spannungsstufen einer 1200 PS-1C1-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 (Zugwiderstand) 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 höchstzulässigen 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 als Grenze setzt. Diese Grenzgeschwindigkeit (70 km/h) wird durch eine senkrechte Linie zu vermerken sein.

Zur Ermittlung der Erwärmungen, welche durch die in Frage kommenden Lokomotivleistungen herbeigeführt werden, ist dieser Rechentafel eine Darstellung der oben erwähnten Eigencharakteristiken in Abhängigkeit von der Endtemperatur in einem halblogarithmischen System zugeordnet worden. In diesem ist nach dem vom Verfasser angegebenen Verfahren 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. 152 für das Beispiel $h = 11,5 ‰$, $G = 220 + 32 = 252 \text{ t}$, $v = 45 \text{ km/h}$, 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 70° C erreicht wird.

In einer an die Zeitachse angeschlossenen Produktentafel für die Beziehung

$$S = v \cdot t$$

kann auch der zurückgelegte Weg unmittelbar abgelesen werden.

Man kann in die Belastungstafeln auch mit beliebigen anderen Größen eingehen, so daß jede gestellte Aufgabe ohne Rechnung zu lösen ist.

Diese Rechentafel wird insbesondere ein wertvoller Behelf, um auf wissenschaftlich einwandfreier Grundlage zur Anleitung der Fahrer die zweckmäßige Wahl der Schaltstufen festzustellen.

10. Haltezeiten der Züge. Für die genaue Ermittlung der Motorleistung wird man sich im allgemeinen nicht auf die Auswertung eines Bewegungsbildes beschränken, sondern diese für die ganze zurückzulegende Strecke ermitteln. In allen Fällen müssen die üblichen bzw. möglichen Haltezeiten berücksichtigt werden, die insbesondere bei kurzer Folge der Haltestellen die Reisegeschwindigkeit stark beeinflussen.

Sofern die Aufenthalte 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
4	2 sek
10	1 ¹ / ₄ "
20	1 "
40	0,9 "

11. 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 durch die reine Fahrzeit; ebenso die Reisegeschwindigkeit durch Teilung dieses Flächeninhaltes durch die Reisezeit.

Die bei Auslegung des Bewegungsbildes in Erscheinung tretenden Fahrwiderstände bestimmen den Kraftverbrauch; 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 die die Erfahrung bestimmte praktische Grenzwerte erkannt hat, innerhalb welcher sich die gebräuchlichen und zweckmäßigen Geschwindigkeiten der Zugförderung bewegen.

Art der Bahnanlagen	Mittlere Geschwindigkeit	Reise-Geschwindigkeit	Höchst-Geschwindigkeit km/h
Industriebahnen	2—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.

Bahnanlage:	Mittlerer Abstand der Haltestellen m	Reisegeschwin- digkeit km/h	Höchst- geschwindigkeit km/h
Berlin-Lichterfelde, Ost	465	32,8	—
Berlin, Stadtbahn (Dampf)	1100	21,6	50
Berlin, Hoch- und Untergrundbahn	775	24,8	50
Buenos-Ayres	370	20,0—26,0	50
Chicago, Hochbahn	300	13,0	26
Hamburg, Hochbahn	799	28,2	50
Hamburg-Blankenese, Vorortebahn	1650	30,6	60
London:			
Mansion House-Ealing 9 bzw. 16 Haltestellen	{ 1940 1040	38,7 30,9	— —
Elephant-Castle Wattford	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 Streed-Wood Lane	840	27,2	—
Clapham Common-Euston	900	21,9	—
London & North Western	1670	38,7	—
New York, Int. Rapid Transit	—	29,5	65
New York, Hudson & Mauhattau	525	24,0	—
New York, Municipal, Lokalverkehr	—	24,0	—
New York, Municipal, Fernverkehr	—	40,0	—
New York, Subway	525	24,0	—
Paris, Stadtbahn	505	21,0	36
Wien, Stadtbahn (Dampf)	—	21,0	—

Aus diesen Angaben geht deutlich hervor, daß vergleichsweise kurze Entfernungen der Haltestellen die Reisegeschwindigkeiten wesentlich verringern, da fast in allen Fällen die praktisch höchstzulässige Beschleunigung und Verzögerung zur Anwendung kommt.

Die elektrische Ausrüstung der Triebfahrzeuge.

III. Der Bahnmotor.

- Adler: Regelung von Straßenbahnmotoren mittels Feldschwächungswiderständen. ETZ 1916, H. 49.
— Ref. Eu.M 1917, H. 11.
- Alexanderson: The single phase repulsion motor. ERJ Okt. 1913.
- Alexanderson: Single phase Motorcar equipment for trunk line service. GER 1913, Nr. 5.
- Arnold: Die asynchronen Wechselstrommaschinen. II. Die Wechselstromkommutatormaschinen. Berlin: Springer 1912.
- Behn-Eschenburg: Bahnmotoren für Einphasen-Wechselstrom. ETZ 1904. — 1907, H. 45. — Helios 1908, Nr. 24. — ETZ 1908, H. 39. Ref. Eu.M 1906.
- Benischke: Die asynchronen Wechselfeldmotoren. Berlin: Springer 1920.
- Cronbach: Gleichstrom-Wechselstromwagen der AEG. EB 1905, H. 11.
- Dean: Manufacturers' tests of materials for railway motors. ERJ Aug. 1919, S. 321.
- Dover: Electric motors and control systems. London: Pitman & Sons Ltd. 1918.
- Döry: Einphasenbahnmotoren. Braunschweig: Sammlung Vieweg 1919.
- Eichberg: Wechselstrommotoren für Bahnen. EB 1904, H. 2.
- Eichberg: Einphasen-Kollektormotoren und ihre Regelung. ETZ 1904, H. 4.
- Eichberg: Über Einphasenbahnen. Zf.E 1904, H. 9.
- Eichberg: Der Stand der elektr. Vollbahnen mit besonderer Berücksichtigung der Einphasenbahnen. ZVDI 1908, S. 1145.
- Eichberg: Über die Entwicklung des Einphasenbahnsystems. ETZ 1908, H. 24.
- Engel: Das Parallelarbeiten von Gleichstromreihenschlußmaschinen im Bahnbetriebe. EKB 1919, H. 18.

- Fleischmann: Zur Theorie des Winter-Eichbergmotors. ETZ 1905, H. 33.
- Franklin-Seyfert: Über die Raumausnutzung bei Einphasenreihenschlußmotoren. Proc. 1910. Ref. Richter. ETZ 1910, H. 37.
- Fynn: Die Theorie der Wechselstromkollektormotoren in ihrem Zusammenhang mit der der Gleichstrommotoren. Eu.M 1908, H. 5. — ETZ 1906, H. 29.
- Gerstmeyer: Die Wechselstrombahnmotoren. Berlin u. München: Oldenbourg 1919.
- Görges: Das Verhalten der Wechselstrommotoren in einheitlicher Betrachtungsweise. ETZ 1907, H. 30.
- Hammel-Heymann: Wechselstrom-Kollektormotoren. Berlin: AEG 1911.
- Heubach: Der Wechselstromserienmotor. Sammlung Voit. Stuttgart: Verl. Enke 1904.
- Heyland: Allgemeine Gesichtspunkte über die Entwicklung und die Aussichten des Einphasenbahnbetriebes. ETZ 1917, H. 37.
- Heyland: Einphasenmotor mit zur Hauptachse neutraler Kurzschluß- und Anlaufachse. ETZ 1913, H. 30.
- Kopczynski: Die Wendepolerregung eines Reihenschluß-Bahnmotors für Wechselstrom. SZ 1922, H. 4.
- Kummer: Über die Abklärung in der Anwendung verschiedener Motorsysteme innerhalb der Einphasen-traktion. SBZ Dez. 1912.
- Kummer: Über die Bemessung der Umdrehungszahl bei elektrischen Bahnmotoren. SBZ 1919, Bd. 53, Nr. 24.
- Latour: Ein für übersynchronen Betrieb geeigneter Wechselstromkollektormotor mit elliptischem Feld. ETZ 1906, H. 5.
- Latour: Repulsionsmotor. ETZ 1903, H. 24.
- Latour: Einphasenmotoren ohne Phasenverschiebung. ETZ 1903, H. 43.
- Latour: Traktion mit Einphasenstrom. Regelung der Geschwindigkeit und Wiedergewinnung der Arbeit. ETZ 1903, H. 51.
- Latour: Die zweite Form des Repulsionsmotors und des kompensierten Motors. ETZ 1904, H. 45.
- Latour: Neuer Einphasenmotor für Eisenbahnzwecke. ETZ 1904, H. 13.
- Latour: Einphasenwechselstrom-Kollektormotoren. ETZ 1912, H. 48.
- Latour: Die Bahnmotoren für einphasigen Wechselstrom. Eu.M 1913, H. 48.
- Latour: Commutation in alternating-current machinery. Proc. 1918, H. 2.
- Marguerre: Beiträge zur Kenntnis der Wechselstrom-Kommutatormotoren. EKB 1911, H. 27.
- Moser: Die Bestimmung der Transformator- und Rotationsspannung bei Einphasenkollektormotoren mit Bürstenverschiebung und Doppelbürsten. Eu.M 1918, H. 15.
- Moser: Der Gleichstromanker im Wechselfeld. Eu.M 1919, H. 3.
- Müller: Die Bergmann-Einphasenwechselstrombahnmotoren. ETZ 1912, H. 12.
- Müller: Zur Theorie des Winter-Eichberg-Motors. ETZ 1904, H. 43.
- Müller-Mattersdorf: Die Bahnmotoren für Gleichstrom. Berlin: Springer 1903.
- Niethammer: Der Elektromotor als Eisenbahnmotor. Zf.E 1903, H. 24 u. H. 47.
- Niethammer: Wechselstromkommutatormotoren. Zürich: Raustein 1905.
- Niethammer: Wechselstromkommutatormotoren. Zf.E 1904, H. 49. — Eu.M 1906, H. 1.
- Niethammer: Anlaufverhältnisse der Einphasenkommutatormotoren mit Reihenschlußcharakteristik. EKB 1912, H. 1.
- Niethammer: Die Arbeitsweise von Wechselstromkommutatormotoren mit Berücksichtigung aller wesentlichen Streufüsse. Eu.M 1913, H. 43.
- M.-F. Örlikon: Wechselstromreihenschlußmotor für Schmalspurbahnen. ETZ 1907, H. 45.
- Osnos: Kreisdiagramm des Repulsionsmotors. ETZ 1903, H. 44.
- Osnos: Der Wechselstromserienmotor. Zf.E 1903, H. 52.
- Osnos: Die einphasigen Wechselstromkommutatormotoren, deren Entstehung, Arbeitsweise und vergleichende Kritik. ETZ 1904, H. 1.
- Osnos: Theorie des Atkinsonschen Repulsionsmotors. Zf.E 1904, H. 7.
- Osnos: Diagramm für den kompensierten Serienmotor. ETZ 1904, H. 11.
- Osnos: Der Wechselstromdoppelschlußmotor der Felten & Guillaume-Lahmeyer Werke. ETZ 1907, H. 15.
- Osnos: Über Wechselstromkommutatormotoren mit besonderer Berücksichtigung der Bahnmotoren. ETZ 1908, H. 1.
- Ossana: Dimensionierung der einphasigen Kommutatormotoren mit besonderer Berücksichtigung der schweren Zugförderung. ETZ 1911, H. 24.
- Ossana: Untersuchungen über den einphasigen Kollektormotor mit besonderer Berücksichtigung der schweren Zugförderung. Eu.M 1916, H. 31.
- Pannel: Entwurf von Gleichstrombahnmotoren. JAIEE 1916. Ref. Eu.M 1917, H. 16. — ETZ 1916, H. 51. — En. 17. März 1916.
- Parker-Smith: Single and threephase a. c. commutator motors with series and shunt characteristics. ER 1922, Bd. 90, Nr. 2303.
- Pichelmayer: Über Einphasenkommutatormotoren. ETZ 1904, H. 22.
- Pichelmayer: Der Wechselstromkollektormotor für schwere Zugförderung. Eu.M 1909, H. 9.
- Pichelmayer: Über die Wahl der zweckmäßigen Periodenzahl für schwere Zugförderung. Eu.M 1911, H. 11.

- Priest: The motor used on 300 ton electr. locomotives of the Ch.M.&St.P.Ry. GER 1916, Nr. 11.
 Rasch: Regelung der Motoren elektrischer Bahnen. Berlin: Springer 1903.
 Reichel: Bahnmotor von 350 Stunden PS für einphasigen Wechselstrom von 25 Perioden. EKB 1907, H. 4.
 Reichel: Bemerkungen über die Kommutierung und die Spannungsempfindlichkeit von Wechselstromkollektormotoren für Vollbahnbetrieb. EKB 1908, H. 15.
 Richter: Über den Anlauf von Wechselstromkollektormotoren. ETZ 1906, H. 7.
 Richter: Der Wechselstromreihenschlußmotor der SSW. ETZ 1906, H. 23; — 1907, H. 34.
 Richter: Zur Funkenunterdrückung bei Wechselstromkollektormotoren. ETZ 1911, H. 50.
 Schenkel: Einheitliche Gesichtspunkte für die Berechnung der Kollektoren von Wechselstromkollektormotoren beliebiger Bauart und Phasenzahl. ETZ 1917, H. 8.
 Schmidt: Drehfeldtheorie des einphasigen Kollektormotors. Eu.M 1909, H. 39.
 Schnetzler: Ein neuer Repulsionsmotor und seine Vorausberechnung. ETZ 1905, H. 3.
 Schnetzler: Einphasenkollektormotoren der Firma Brown Boveri & Co. ETZ 1907, H. 3.
 Schnetzler: Regelung der Repulsionsmotoren durch Bürstenverschiebung. ETZ 1907, H. 46.
 Steinmetz: Der Wechselstrom-Bahnmotor. Ref. ETZ 1904, H. 18.
 Stillwell: Zur Frage der Periodenzahl bei Wechselstrombahnen. Proc. 1907, Nr. 3.
 Sumeç: Die einphasigen Kommutatormotoren. Zf.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 Einigung der Systeme. Zürich: Rascher.
 Unger: Die Abmessungen der Einphasen-Bahnmotoren. ETZ 1920, H. 1.
 Vallauri: Einiges über die Systemfrage bei der Elektrisierung der Hauptbahnen. EKB 1914.
 Vallauri: Funkenunterdrückung bei Einphasenbahnmotoren. Eu.M 1915, H. 19.
 Winkler: Beiträge zur Kenntnis zeitgemäßer Gleichstrombahnmotoren. ETZ 1919, Nr. 44/45.
 Wittek: Die Periodenzahl bei einphasigen Wechselstrombahnen. Eu.M 1910, H. 38.
 Zehme: Großer Lokomotivmotor für Einphasen-Wechselstrom. ETZ 1907, H. 6.
 Zipp: Elektrische Vollbahnlokomotiven für einphasigen Wechselstrom. Leipzig: Leiner 1915.
 Singlephase motorcar equipment for trunk line service. GER 1913, Nr. 5.
 Über Wechselstromkommutatormotoren. ETZ 1906, H. 33.
 Frage der Periodenzahl bei Wechselstrombahnen. Proc. 1907, Nr. 3. Ref. Eu.M 1907, H. 19.
 Die Wechselstrom-Kollektormotoren der Midland-Railway. El. Juni 1908. Ref. Eu.M 1908.
 The constant speed motor in heavy electric traction. ERJ Juni 1919, S. 1201.
 A good word for the constant speed-railway-Motor. ERJ Okt. 1917, S. 750.
 Das Westinghouse-Einphasen-Bahnsystem. Ref. ETZ 1908, H. 5.
 Eine transformatorische Wirkung beim Schalten der Erregerspulen von Straßenbahnmotoren während des Befahrens von Kreuzungen. ERJ 1922, Bd. 55, S. 383. Ref. ETZ 1921, H. 17.

1. Kennlinien des Bahnmotors (Abb. 153). Bereits im Rahmen der Krafterzeugung wurde die Bedeutung des Umstandes betont, alles zu vermeiden, was geeignet ist, die Belastungsspitzen zu steigern und in das System Starrheit zu bringen.

Da der Bahnbetrieb naturgemäß wechselnde Belastungen verursacht, weil die Züge nach Bedarf vom Stillstand beschleunigt und 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 bei wechselnder Zugkraft und Geschwindigkeit, sei es selbsttätig, sei es mit einfachen Hilfsmitteln, auf konstante Leistung reguliert.

Die Elektrotechnik kennt zweierlei charakteristische Verhalten der Motoren, welche, entsprechend der Tatsache, daß es in ausgesprochener Weise bei den betreffenden Gleichstrommotorarten vorkommt, einerseits mit Nebenschluß-, andererseits mit Reihenschluß-Charakteristik bezeichnet werden.

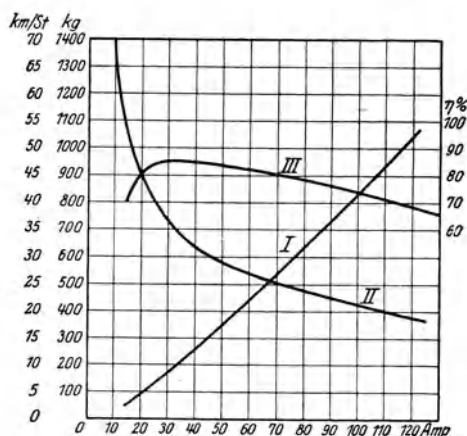


Abb. 153. Kennlinien eines Straßenbahnmotors (AEG.).

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:

$$\Phi \text{ bzw. } i = \text{const.}$$

$$D = CJ$$

$$n = C$$

$$\frac{J}{i} = \text{veränderl.}$$

$$\Phi \text{ veränderl. } \Phi = f(J)$$

$$D \cong cJ^2$$

$$n = f(J) \text{ bzw. } f(D)$$

$$\frac{J}{i} \cong \text{Const.}$$

Hierbei 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, so wird für eine gegebene Klemmenspannung auch die Umlaufzahl 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 ; da dieser sich mit der Leistung ändert, ist das Verhältnis $J:i$ beim Nebenschlußmotor mit der Leistung veränderlich.

Beim Reihenschluß ist das Feld dem Ankerstrom proportional, insolange die Sättigung nicht erreicht ist. Das Feld

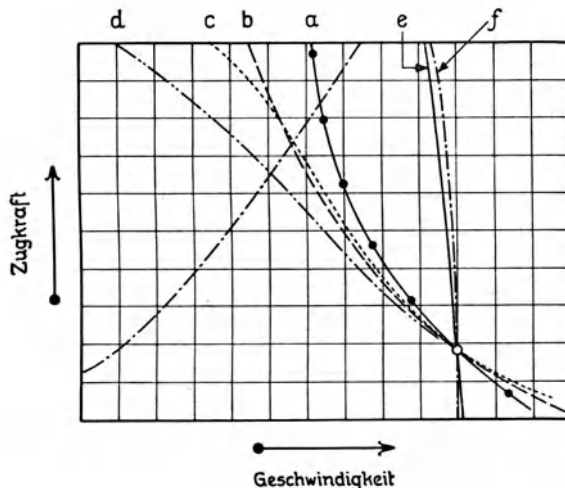


Abb. 154. Kennlinien der verschiedenen Motorarten:

- a) Reihenschlußmotor } Gleichstrom,
- e) Nebenschlußmotor, } Gleichstrom,
- c) Reihenschlußmotor, Wechselstrom,
- f) Induktionsmotor,
- d) Dampflokomotive,
- b) Hyperbel konstanter Leistung.

ist veränderlich, ebenso die Drehzahl. Das Drehmoment ist verhältnismäßig dem J^2 und

$$\frac{J}{i} = \text{Const.}, \text{ weil } J = i.$$

Trägt man das Drehmoment oder die Zugkraft eines Motors in Abhängigkeit von der Drehzahl (Geschwindigkeit) auf, so wird das diesen Verhältnissen entsprechende, verschiedene Verhalten der beiden Motorarten augenfällig.

Die eisenbahntechnische Bedeutung dieser charakteristischen Linien (Abb. 154) 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 Bürstenachse ist. Dies ist in der schematischen Darstellung (Abb. 155) 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. Weiter wird der Umstand, daß die Änderung der Drehrichtung bzw. der Übergang von der Motor- zur

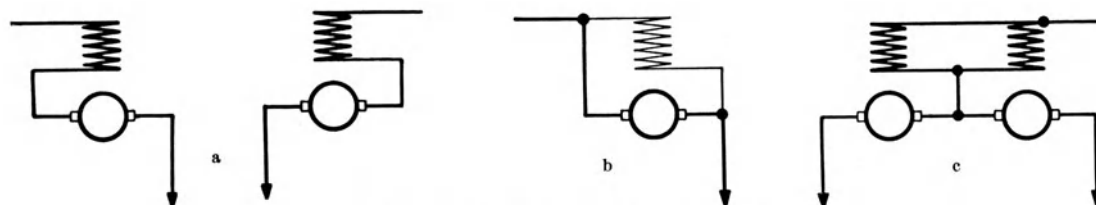


Abb. 155. Schema der Motorschaltungen.

a) Reihenschlußmotor, b) Nebenschlußmotor, c) Störung der Seriencharakteristik durch eine Ausgleichsverbinding.

Generatorwirkung beim Hauptschlußmotor jeweils den Wechsel der relativen Schaltfolge von Anker und Feld bedingt, in den grundsätzlichen Darstellungen zum Ausdruck gebracht. Das gleiche gilt bei Fahrzeugen, die mit zwei — selbstverständlich gleichartig gebauten — Motoren ausgerüstet sind, welche fast immer räumlich um 180° gegeneinander gedreht angeordnet werden. Für gleiche Fahrtrichtung müssen daher die zwei Motoren in bezug auf die relative Lage von Anker und Feld entgegengesetzt 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 vorausgesetzt, 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 induzierten 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 kleiner Spannungsabfall auftreten.

In der Praxis besteht diese Überlegenheit des Drehstrommotors nicht mehr unumschränkt, denn es ist gelungen, Anordnungen — Reihenschaltung der Motoren — zu treffen, die es ermöglichen, im Gleichstrombetrieb die im Bahnbetrieb mit Drehstrom gebräuchliche Spannung von 3000 V anzuwenden.

Der Vorteil des Drehstrombetriebes beschränkt sich demnach auf etwa $12,5\%$ Ersparnis an Leitungsmaterial, wobei der induktive Spannungsverlust noch nicht berücksichtigt ist.

Versuchsbetriebe mit 5000 V Fahrdrachtspannung sind für beide Stromarten eingerichtet worden.

3. Die Regelung der Geschwindigkeit (Drehzahl). Die Kennlinien der verschiedenen Motorarten weisen unter einem den Weg, welcher zur Erreichung einer wirtschaftlichen Geschwindigkeitsregelung einzuschlagen ist.

Die Drehzahl des Reihenschlußmotors ändert sich bei konstanter Zugkraft proportional der Gegen-EMK, wobei die Zugkraft vom jeweiligen Wert der Gegen-EMK und, da der Spannungsabfall im Motor verhältnismäßig klein ist, auch vom Wert der Klemmenspannung unabhängig ist.

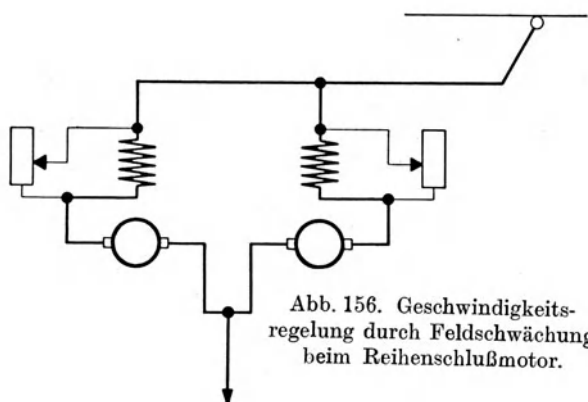


Abb. 156. Geschwindigkeitsregelung durch Feldschwächung beim Reihenschlußmotor.

Der Hauptschlußmotor kann durch Änderung der Spannung wirtschaftlich geregelt werden.

Bei Gleichstrombetrieb steht zu diesem Zweck die Reihenschaltung mehrerer Motoren mit Unterteilung der Betriebsspannung entsprechend der Zahl der Triebmaschinen zur Verfügung.

Das Wechselstromsystem verwendet den Stufentransformator.

Die Geschwindigkeit des Gleichstromnebenschlußmotors kann in weiten Grenzen betriebssicher nur durch Änderung der Ankerspannung be-

einflußt werden, wobei die Erregerspannung tunlichst konstant zu halten ist.

Eine nicht zu weit gehende Geschwindigkeitsregelung ist bei den beiden Motorarten auch durch Feldschwächung (Abb. 156) erzielbar, sofern es sich um nicht zu stark gesättigte Maschinen handelt. Eine vollständige Aufhebung des Ankerfeldes innerhalb der Stromwendungszone durch Wendepole ist die Voraussetzung für die Anwendung dieses Mittels.

Bei Induktionsmotoren versagt die Geschwindigkeitsregelung durch Änderung der Spannung, da bei dieser Motorart die Drehzahl nicht von der Klemmenspannung, sondern nur von der Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes abhängt. Da des weiteren sich das Drehmoment mit der Herabsetzung der Spannung vermindern würde, scheidet dieses Mittel als Behelf für die Drehzahlregelung aus. Ein unwirtschaftliches Mittel zur Herabsetzung — jedoch niemals zur Erhöhung — der Drehzahl ist die 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 vom Stillstand 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. 157).

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 man von den Verlusten in der Maschine selbst ab, so ist die Zugkraft ein Maß für den Strom J , die Geschwindigkeit v bzw. die Drehzahl n für die Ankerspannung.

Für konstante, an das System — Anker und vorgeschalteter Widerstand — angelegte Spannung, messen auch die Stromstärken — die Ordinaten — die zugeführte und abgegebene Leistung. Die zugeführte Leistung ist Annahme gemäß konstant; sie wird im rechtwinkligen Bezugssystem durch eine zur Abszissenachse parallele Gerade dargestellt.

Die abgegebene Nutzleistung wächst entsprechend der eingestellten Zugkraft 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 klar, daß für den Nebenschlußmotor der Schnittpunkt der Anfahrlinie mit der Eigencharakteristik den Punkt der größten Leistung gibt. Zeichnet man für diesen Punkt die Hyperbel konstanter Leistung, so wird dies auch im Schaubild erkennbar.

Beim Reihenschlußmotor ist die Sachlage viel günstiger, da sich seine Eigencharakteristik der Hyperbel $L = \text{Const.}$ sehr nähert, ja es stehen namentlich bei Wechselstrombetrieb einfache Hilfsmittel zur Verfügung, um die Motorcharakteristik mit dieser Hyperbel in praktische Übereinstimmung zu bringen.

Wie bereits erwähnt, fällt der wagrechte Teil des Diagrammes in die Anfahrperiode und stimmt zweckmäßigerweise mit der Stundenleistung des Motors überein.

Der eigentliche Arbeitsbereich liegt im Mittel bei einem Punkt der Eigencharakteristik, welcher der Dauerleistung des Motors entspricht.

Zwei zur Befahrung derselben Strecke bestimmte Motoren der beiden Bauarten müssen die gleichen Dauerleistungen und Anfahrzugkräfte aufweisen, d. h. die beiden charakteristischen Linien müssen sich im Punkte der identischen Dauerzugkraft schneiden und gleich großen Anfahrzugkräften entsprechen. Dieser Zusammenhang läßt die Überlegenheit des Reihenschlußmotors sofort erkennen; der Nebenschlußmotor verbraucht zum Anfahren eine wesentlich größere Arbeit, weil die widerstandsfreie Fahrt die Eigencharakteristik erst bei einer vergleichsweise hohen Geschwindigkeit erreicht. Die durch den Punkt B bestimmte Höchstbeanspruchung dieser Motorart ist daher wesentlich größer als diejenige des R. S.-Motors.

Die Leistung der Motoren ist bei

$$v = 0 \qquad L = 0,$$

im Punkte A bzw. B

$$L_s = Z v_s \quad \text{bzw.} \quad L_n = Z v_n;$$

die Verbindungsgeraden OA bzw. OB teilen die Fläche der zugeführten Arbeit in die Nutzleistung und in die Dreiecke OAC bzw. OAB der Anfahrverluste. Diese sind beim N.-Motor aus den geschilderten Ursachen 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.

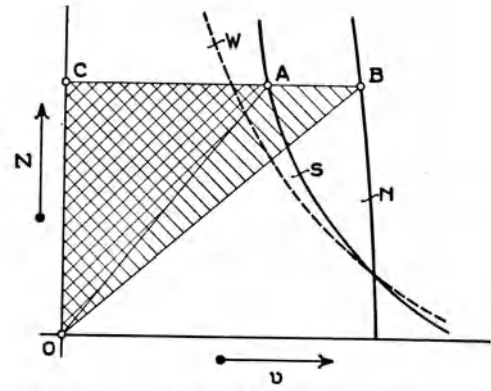


Abb. 157. Kennlinien $Z = f(v)$ bzw. $J = f(E)$ oder $L = f(v)$ für das Anfahren mit einem Serienmotor (OA) und einem Nebenschlußmotor (OB), (W) Wechselstrommotor.

Aus dieser Darstellung sind die Mittel zu erkennen, mit deren Hilfe einerseits die Anfahrverluste herabgesetzt werden können, andererseits die Eigencharakteristik in eine Hyperbel konstanter Leistung überführt werden kann.

Gelingt es, die Betriebsspannung herabzusetzen, zu unterteilen und die Motorcharakteristik in einen anderen Geschwindigkeitsbereich zu verlegen, so vermindern sich die Anfahrverluste dementsprechend, d. h. bei halber Spannung auf die Hälfte usw.

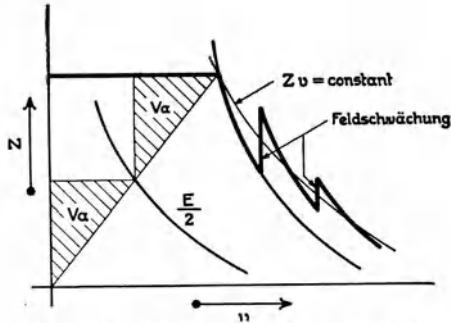


Abb. 158. Kennlinien für die Reihenschaltung und Änderung der Eigencharakteristik durch Feldschwächung.

Bei Gleichstrom steht für diesen Zweck eine beschränkte Stufenzahl durch die Reiheneneinanderschaltung (Abb. 158) zur Verfügung. Durch diese wird der Anfahrverlust nach Maßgabe der Anzahl der im Fahrzeug angeordneten Triebmaschinen auf einen Bruchteil herabgesetzt, indem die Motoren schon bei einem Bruchteil der Geschwindigkeit auf der Eigencharakteristik laufen können. Bei Erreichung der Eigencharakteristik kann eine Feldschwächung (Abb. 158) zum Ziele führen. Durch diese wird die Gegen-EMK des Motors verringert und dadurch das Zufießen der zur Steigerung der Zugkraft erforderlichen Stromstärke ermöglicht. Die Feldschwächung ist bei Wendepolmotoren bis 50% zulässig, die Nebenschlüsse vermindern jedoch die Betriebssicherheit.

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 prozentuellen Abweichungen vom Mittelwert viel weniger Reglerstufen nötig sind.

5. Parallelbetrieb. Der Reihenschlußmotor arbeitet in Parallelschaltung vollständig stabil (Abb. 159), 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.

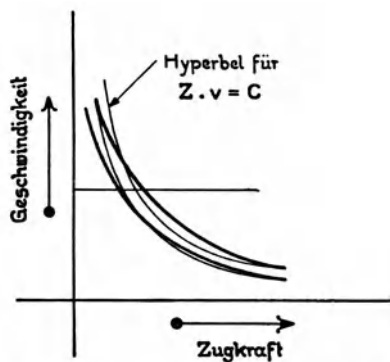


Abb. 159. Ungleiche Geschwindigkeit - Zugkraft - Kennlinien zweier Serienmotoren.

Serienmotoren arbeiten auch stabil, wenn ihre Kennlinien nicht übereinstimmen; es stellt sich lediglich eine der identischen Geschwindigkeit aller parallel laufenden Motoren des Fahrzeuges entsprechende Stromstärke und 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. 155c). 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 ein Kurzschluß auf, weil die Gegen-EMK des betreffenden Motors bis auf die Remanenz verschwindet.

Zum Zwecke des Ausgleichs der Leistungen kommt auch die für den Generatorbetrieb zweckmäßige Kreuzschaltung der Anker und Felder nicht in Betracht, weil in dieser Schaltung die Motoren unstabil arbeiten.

Nimmt z. B. der Anker des Motors I weniger Strom auf, so 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 Hauptschlußmotor 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 Motore auf; es übernimmt der durchgehende Motor fast die ganze Spannung und verhindert auf diese Art das Anfahren, da wegen seiner hohen Gegen-EMK die erforderliche Stromstärke nicht zufließen 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 weitaus größeren Spannung beansprucht werden, als jener, 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 vorhanden ist.

Der N.-Motor ist in Nebeneinanderschaltung unstabil. Geringe Geschwindigkeits- oder Spannungsänderungen bewirken eine sprunghafte Änderung der Stromstärke, sogar eine Umkehrung zur Generatorwirkung; der N.-Motor ist daher für den Parallelbetrieb ungeeignet.

Welch geringfügige Änderungen in der Geschwindigkeit oder im Widerstand des Stromkreises parallel geschalteter N.-Motoren genügen, lehrt ein Beispiel. In einer Zahnradlokomotive arbeiten zwei N.-Motore von je 100 PS nebeneinander, der Ankerwiderstand eines Motors beträgt $0,058 \Omega$, daher genügt ein EMK-Unterschied von $5 \text{ V} = 1,0\%$, um das Verhältnis der Stromstärken in beiden Motoren auf $2:1$ zu verändern.

Es gilt für Vollast:

$$J = 250 \text{ A}, \quad E_1 = E_2 + 5,$$

$$E_1 + i_1 0,058 = E_2 + i_2 0,058,$$

daher

$$i_1 = 82 \text{ A}, \quad i_2 = 168 \text{ A}.$$

Begegnet wird diesem Übelstand durch einen Ausgleichswiderstand gemäß Schaltung Abb. 160.

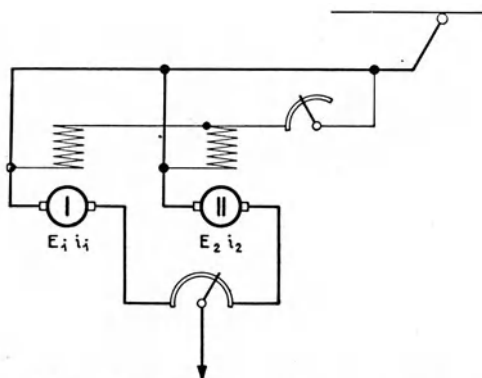


Abb. 160. Parallelschaltung von Nebenschlußmotoren mit Widerstand für den Ausgleich der Ströme.

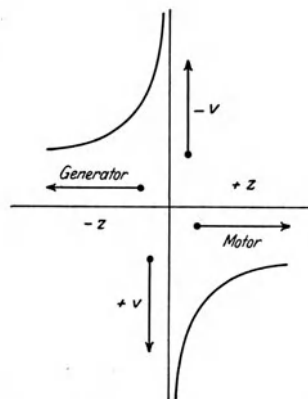


Abb. 161. Stromumkehr der Reihenschlußmaschine.

Daß beim S.-Motor in Nebeneinanderschaltung keine Stromumkehr, also keine Generatorwirkung, eintreten kann, geht aus seiner Geschwindigkeitscharakteristik hervor, die sich asymptotisch der Abszisse nähert (Abb. 161). Die Umkehrung kann nur bei Verkehrung der Geschwindigkeitsrichtung 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 aus starken Drähten bestehende Feldwicklung eines R.-Motors.

Aus dem gleichen Grunde ist die Ausnützung des Wickelraumes ungünstiger. In jedem 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, wobei auch die Spannung gegen Erde sehr klein gehalten werden kann.

Weiter bildet die Selbstinduktionsspannung beim Ausschalten zufolge der großen magnetischen Trägheit des Systems eine Gefahr für die Feldwicklung.

6. Vergleich mit der Dampflokomotive. Die Kennlinien (Abb. 154) eignen sich auch gut zur Beurteilung der Dampflokomotive, da 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, weil die durch die Reibung begrenzte Zugkraft voll ausgenützt und auch diejenige größte Geschwindigkeit erreicht wird, 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 an, 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, die nach dem Induktionsprinzip, mit oder ohne Ankererregung, mit festen oder verschiebbaren Bürstensystemen arbeiten — 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. Ferner verlangen sie 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. die Kollektorumfangsgeschwindigkeit eine Grenze für die Drehzahl 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 nur diejenigen Ableitungen durchgeführt, die zur Beurteilung einer Motorart nötig sind, nachdem das grundsätzliche Verhalten der Neben- und Reihenschlußmaschinen schon bereinigt wurde.

Erwähnt soll hier werden, daß auch der mechanische Aufbau des Ankers die immerhin empfindliche Stromwendung beeinflussen kann. Diesbezüglich ist es wichtig, namentlich bei Maschinen mit vergleichsweise großem Durchmesser, den Ankerkörper mit dem Kollektor auf einem gemeinsamen zylindrischen Kern anzubringen und nicht etwa untereinander nur durch die Welle verbunden mit zwei getrennten Naben auf diese aufzukeilen. Das pulsierende Drehmoment des Wechselstrommotors versetzt im allgemeinen den Ankerkörper, und zwar nur diesen und nicht den einer Kraftwirkung nicht unterliegenden Kollektorring, in Schwingungen, die sich dem gleichmäßigen Umlauf überlagern. Insbesondere kann bei geeigneter Drehzahl durch Resonanz die auf diese Weise zwischen Anker und Kollektor in Erscheinung tretende Relativbewegung die Stromwendung stören, indem die jeweils kurzgeschlossene Wicklung sich nicht genau in der neutralen Zone befindet. Viele mit diesem konstruktiven Fehler behaftete Wechselstromkollektor-Maschinen verursachen, mit Strom belastet, im Lauf ein für Wechselstrommaschinen geradezu kennzeichnendes Geräusch.

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 dieses erzeugt in ihr statisch, also unabhängig von der Drehzahl, eine EMK, die mit dem Feld in Quadratur ist und ihm um 90° nacheilt.

Durch den Umlauf im Ankerstreufeld entsteht, wie bei jeder kompensierten Gleichstrommaschine, die Stromwendespannung, 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

$$E_w = 6,28 w \sim F \cdot 10^{-8},$$

wobei 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

$$E_w = j \cdot k_2 J$$

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 begrenzten Wert von etwa 3,5 bis 4 V nicht zu überschreiten, muß die \sim möglichst niedrig sein, um noch für $w=1$ angemessene Poldimensionen zu erhalten.

Die Stromwendespannung ist

$$E_g = \xi v w A S L_0,$$

wobei ξ eine Erfahrungszahl,

v die Ankerumfangsgeschwindigkeit,

w die Windungszahl für jedes Segment,

AS die Amperestabzahl für den cm Ankerumfang und

L_0 die effektive Ankereisenlänge bezeichnet.

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

$$\Phi = \frac{k_1 J n + j k_3 J}{k_3 n} = k_4 J + j k_5 \frac{J}{n};$$

die mit J phasengleiche Komponente hält der dynamischen Funkenspannung das Gleichgewicht, die dazu senkrechte ebenso der statischen.

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 $n=0$, d. h. in dem für den Bahnmotor sehr wichtigen Betriebszustand des Anfahrens, müßte die unmögliche Bedingung

$$\Phi = \infty$$

befriedigt werden. Jenseits dieses, bei neuzeitlichen Motoren sehr geringen Prozentsatzes des Gesamttourengebiets 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 von Kollektormotoren unterscheiden sich dagegen in bezug auf die Herstellungsweise der Gegenfunkenspannung und 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 erste Stelle gesetzte insofern den anderen überlegen ist, als Feld- und Anker-

strom streng gleichphasig sind, die Drehmomentbildung daher am vorteilhaftesten vor sich geht (Abb. 162).

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, so arbeitet der Motor in reiner Reihenschaltung mit kurzgeschlossener Kompensations-

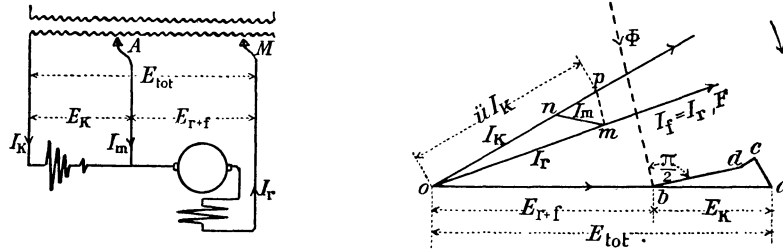


Abb. 162. Schaltung und Vektordiagramm des doppelt gespeisten Kollektormotors.

wicklung, 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. 162) hervorgeht.

- $oa = E_{tot}$ ist die gesamte Spannung des Motors,
- $ab = E_k$ ist der Anteil der Kompensationswicklung,
- OF 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 sind. 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 *AW* der Kompensationswicklung und des Rotors.

Der Strom $J_k(on)$ in der Kompensationswicklung wird sich daher gegenüber $J_R(om, \text{Rotorstrom})$ so einstellen, daß unter Berücksichtigung der Windungszahl und des Wicklungsfaktors der beiden gleichachsigen Wicklungen, die für die Magnetisierung dieser gemeinsamen Achse resultierenden *AW* die ganz bestimmte Größe und Phase *AW*(*pm*) besitzen, wenn mit Φ der mit den beiden gleichachsigen Wicklungen gemeinsam verkettete Flux bezeichnet wird. Von der Spannung E_k ist eine Teilspannung (*ac*) entsprechend der Streuspannung der Kompensationswicklung senkrecht zum Vektor J_k und eine Teilspannung (*cd*) gleich und entgegengerichtet dem in der gleichen Wicklung auftretenden Ohmschen Spannungsabfall. Der resultierende Vektor (*db*) stellt die interessierende Querfeldspannung dar, welche die Größe und Phase des Querfeldes Φ bestimmt.

Da $om = J_R = J_F$, so stellt diese Strecke in einem anderen Maßstab auch die Rotoramperewindungen dar. $mp \parallel \Phi$ und \perp auf bd stellt dann AW_Φ 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 $op = \ddot{u} J_k$ sein und in dem für die AW gewählten Maßstab die Kompensations- AW 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 Funkenbildung 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

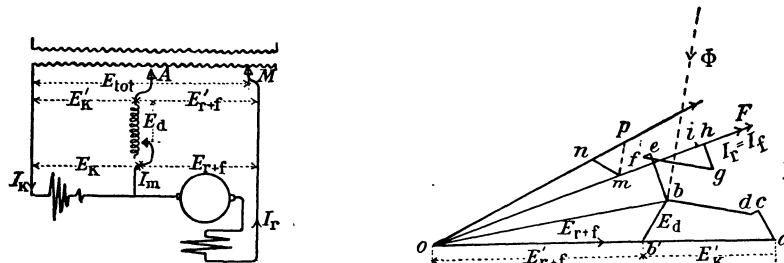


Abb. 163. Schaltung und Vektordiagramm des doppelt gespeisten Kollektormotors mit Drosselspule im Mittelleiter.

$\cos \varphi$ klein, φ groß und Φ erhält daher eine größere, mit J_r phasengleiche Komponente. Bei gut ausgenutzten Motoren und gutem $\cos \varphi$ ergibt diese Schaltung im normalen Tourengebiete 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 benützt worden. (Rhätische-Bahnlokomotive Nr. 391, Wien-Preßburg 1—B—1 Lokomotive).

Das dieser Schaltung entsprechende Diagramm (Abb. 163) läßt sich nach dem oben Gesagten ohne weiters ableiten. Es 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 Funkenbildung ausgleicht.

Man hat es somit in der Hand, durch zweckentsprechende Einstellung der beiden verfügbaren Größen, nämlich der Spannung e_k und der Impedanz des Mittelleiters, Größe und Phase des Querfeldes Φ und 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 kann.

Die mit Motoren dieser Schaltung im schwersten Eisenbahnbetrieb gemachten Erfahrungen sind vorzüglich. Die Kollektoren sind nach einem neunjährigen Betrieb mit Jahresleistungen bis zu 100000 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 vom Stillstand bis zum fünffachen Synchronismus als vollständig ausreichend.

10. Der Reihenschlußmotor mit abgezwigter 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 Schalt-

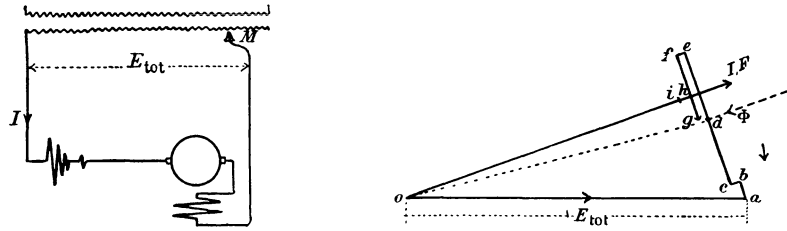


Abb. 164. Schaltung und Vektordiagramm des kompensierten Reihenschluß-Kollektormotors.

elemente sind im gedrängten Aufbau einer Lokomotive unerwünschte Zutaten. Man entledigt sich ihrer um so eher, als der reine Reihenschlußmotor mit abgezwigter Kompensation, wie sie erstmalig von Behn-Eschenburg angegeben wurde, mit einfacheren Mitteln die gleichen 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. 164) hervorgeht, hat das Querfeld keine Komponente in der Richtung der statischen Funkenspannung, die Maschine ist dynamisch überkompensiert.

Schaltet man zur 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

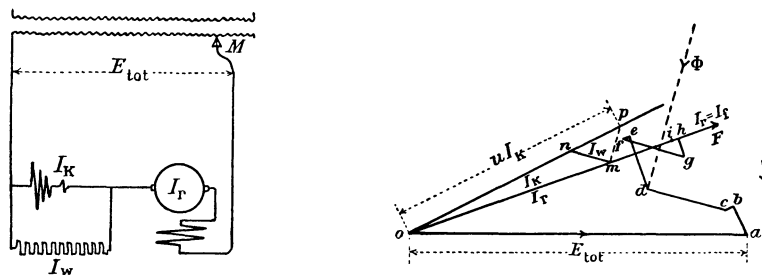


Abb. 165. Schaltung und Vektordiagramm des kompensierten Reihenschluß-Kollektormotors mit abgezwigter Kompensation.

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 AW bestimmt, sondern ergibt sich aus der 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. 165)

$$\begin{aligned} on &= J_K \text{ der Strom in der Kompensationswicklung;} \\ om &= J_R \text{ der Strom im Rotor und} \\ mn &= J_W \text{ der Zweigstrom im Widerstand.} \end{aligned}$$

Wenn in einem anderen Maßstab om die Rotor- AW darstellt, so wird $op = \dot{u} J_k$ der Vektor der Kompensations- AW und pm der Vektor der resultierenden, das Querfeld in Größe und Phase bestimmenden Querfeld- AW .

Im Spannungsdiagramm bezeichnen:

$$\begin{aligned} oa &= E_{\text{tot}} \text{ die Gesamtspannung,} \\ ab &\perp J_k \text{ den induktiven Spannungsabfall in der Kompensationswicklung,} \\ bc &\parallel J_k \text{ den Ohmschen Spannungsverlust in derselben,} \\ cd &\text{ die durch } \Phi \text{ induzierte Gegen-EMK, wobei } cd \perp \Phi \text{ und } \perp pm, \\ de &\perp J_R \text{ die Reaktanzspannung des Hauptfeldes in der Feldwicklung,} \\ ef &\text{ den Ohmschen Spannungsabfall in der Feldwicklung,} \\ fg &= \frac{cd}{\dot{u}} \text{ die durch } \Phi \text{ in der Rotorwicklung induzierte EMK,} \\ gh &\text{ die induzierte Streuspannung } \\ hi &\text{ den Ohmschen Spannungsabfall } \left. \vphantom{gh, hi} \right\} \text{ im Rotor,} \\ io &\parallel F \text{ die Gegen-EMK des Motors.} \end{aligned}$$

Zur vollkommenen Stromwendung für sämtliche Betriebszustände genügt die Einstellung des Nebenschlußwiderstandes nicht. Hierzu müßte man zur Kompensationswicklung des Motors noch einen Serientransformator parallel schalten. Es ergibt sich, daß die Regelung dieses Transformators einer Regelung des Übersetzungsverhältnisses gleichkommt.

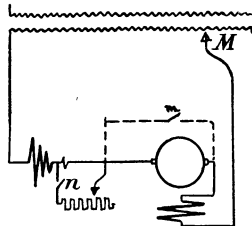


Abb. 166. Schaltung des Reihenschlußmotors mit zur Wendespule parallel gelegtem Widerstand. Anfahrts mit kurzgeschlossenem Anker.

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, parallel geschaltet. 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, so 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 abgezwigten Reihenschaltung kleiner sind als bei der doppelten Speisung.

Da weiterhin die abgezwigte Reihenschaltung auch weniger Schaltbehelfe und Hilfseinrichtungen benötigt, ist dieser Schaltung der Vorzug einzuräumen.

Nach dem heutigen Stande der technischen Entwicklung wird für die meisten vor kommenden Fälle der größeren Bahnmotoren die abgezwigte 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. 166).

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, vielen Polen und vielen parallelen Ankerstromzweigen. Das praktische Verhalten gegenüber dem Gleichstrommotor ist nur im niedrigsten Drehzahlbereiche (etwa $\frac{1}{20}$ bis $\frac{1}{10}$) 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 V gegen bis 1500 bis 2000 V — 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, welche im Bahnbetrieb nicht zu unterschätzen ist. Die Bemessung der Zuleitungen und der Strombelastung der Schalteinrichtung kann durch Reihenschaltung mehrerer Motore in mäßigen Grenzen gehalten werden.

Die niedrige Betriebsspannung des Einphasenmotors erhöht die gesamte Baustoffwirtschaft der elektrischen Vollbahnlokomotive auch insofern, als durch diese 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, 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 insbesondere in den Vereinigten Staaten sind anfänglich alle Wechselstromüberlandbahnen so gebaut worden, daß die Fahrzeuge im Bereich der Städte mit niedrig gespanntem Gleichstrom, auf den Überlandstrecken mit hochgespanntem Wechselstrom verkehren konnten. Selbst die einen schweren Vollbahnbetrieb aufweisende N.Y.-N.H.-H.R.R. ist mit diesem System ausgerüstet worden. Dieses Zwitter-system hat sich wegen der Umständlichkeit der für die beiden Stromarten ganz verschieden beschaffenen Steuerungseinrichtungen nirgends voll bewährt. Die Anwendung blieb daher auf Einzelausführungen beschränkt. (Wien-Baden, Rotterdam—Haag—Scheweningen, Versuchsbetrieb der AEG Niederschöne-weide—Cöpenick, New York-New Haven—Hartford-Bahn.)

IV. Die elektrodynamische Bremsung.

Abt: Sicherungsvorrichtungen an Steilbahnen. ZfKB 1919.

Behn-Eschenburg: Anlage zur Nutzbremung von Fahrzeugen mit Kommutatormotoren für Einphasen-Wechselstrom. ETZ 1918, H. 49. — Eu M 1918, H. 52.

Behn-Eschenburg: Versuchsfahrten einer Wechselstromlokomotive mit elektrischer Nutzbremung. SBZ 1919, Bd. 74, Nr. 7.

Benischke: Die Wechselstrom-Nebenschlußmaschine als Motor und Nutzbremse. Eu.M 1920, H. 7.

Blondel: EE Febr. 1904.

Boveri: Versuche über Energierückgewinnung auf einer Einphasenlokomotive. BBCM 1920, Nr. 11.

Braun: Über die Bedeutung elektromagnetischer Schienenbremsen. EKB 1919, H. 27. — ZVDI 1909.

Brown-Boveri Co.: Mitteilungen. Versuche mit Schienenbremsen. 1917.

Coors: Regenerative electric braking on the locomotives of the C.M. & St.P.Ry. GER 1918, Nr. 6.

Forsberg: Control equipment of Paulista Locomotives. GER 1922, Nr. 3.

Frankl: Über Selbsterregung und Nutzbremung von Reihenschluß-Kommutatormaschinen für Ein- und Mehrphasenstrom. Eu.M 1912, H. 33.

Funke: Elektromagnetische Schienenbremse. EB 1905, H. 21.

- Heilfron: Über einige neuere Fragen aus dem elektrischen Vollbahnwesen. (Arbeitsrückgewinnung.) ETZ 1910, H. 13.
- Hellmund: Regenerative braking of electric vehicles. Proc. 1917, Nr. 1.
- Hibbard: Systems of single phase regeneration for use with series type commutator motors. JAIEE 1923, Nr. 3.
- Kindler: Erfahrungen mit verschiedenen Bremsarten bei der Berliner Straßenbahn. EKB 1921, H. 10.
- Kraus: Die elektrische Bremsung von Wendepolmotoren im Straßenbahnbetriebe. Eu.M 1921, H. 21.
- Kummer: Über elektrisches Bremsen mit Wechselstrom-Serien-Motoren. EKB 1907, H. 19.
- Kummer: Kraftbedarf der Gotthardbahn. SBZ 1912, Bd. 59, Nr. 11.
- Kummer: Das Urteil über die Energierückgewinnung bei elektrischen Bahnen. SBZ 1918, Bd. 71, Nr. 18.
- Kummer: Die relative Energieersparnis durch die Nutzbremung bei elektrischen Bahnen. SBZ 1920, Bd. 75, Nr. 11.
- Kummer: Über Betriebskurven und Betriebssicherheit verschiedener Verfahren der Nutzbremung. SBZ 1921, Bd. 77, Nr. 13.
- Lafontaine: Nouveau système de traction autoregulateur. TM Bd. 8, Nr. 6.
- Latour: Note sur le montage en récupération du moteur shunt à collecteur. Verl. RGE.
- Linebaugh: Regenerative electric braking. GER 1916, Nr. 11.
- Luithlen: Schienenbremsen bei österreichischen Bahnen. EKB 1913, H. 3.
- Mandl: Die Bremsung des Serienmotors. Eu.M 1920, H. 36.
- Mester: Emploi du système à récupération Raworth sur les voitures de tramways. GC 1910, S. 372.
- Müller: Gegenstrom und Kurzschlußbremsung bei Reihenschlußkommutatoren. EKB 1911, H. 32.
- Müller: Die elektrische Bremsung der Straßenbahnwagen. ETZ 1902, H. 24.
- Müller: Die Entwicklung der elektromagnetischen Schienenbremsen. EKB 1921, H. 10.
- Monath: Einige Verfahren und Schaltungen zur Nutzbremung von Wechselstromlokomotiven. EKB 1919, H. 27.
- Monath: Der Einphasenkollektormotor als Generator und die Nutzbremung von Wechselstromlokomotiven. Berlin: AEG 1921.
- Naumann: Über Versuche mit elektromagnetischen Schienenbremsen. ETZ 1911, H. 2.
- Niethammer-Siegel: Über die Nutzbremung von Wechselstromkommutatormotoren mit Seriencharakteristik. Eu.M 1912, H. 35.
- Nordefeldt: Nutzbremung von Wechselstrommotoren. El. 1922, Bd. 88, Nr. 2287. — Ref. Eu.M 1922, H. 22.
- Perret-Cauwenberghe: Die 1200 bis 1500 PS-Wechselstromlokomotive der französischen Südbahn. EKB 1911, H. 27.
- Reutener: Nebenschlußtriebswagen und ihre Verwendung auf Gebirgsstrecken. EKB 1913, H. 14.
- Rusch: Nutzbremung der wichtigsten Kollektormotoren. Eu.M 1911, H. 1.
- Sauveur: Gegen die rein elektrische Bremsung der Straßenbahnwagen. EKB 1919, H. 20.
- Schenkel: Stromrückgewinnung bei Wechselstrombahnen. ETZ 1920, H. 28. — Ref. Eu.M 1920, H. 52.
- Schopfer: Etudes de certains phénomènes se produisant lors du freinage rhéostatique et des moyens d'y remédier. L'Industrie des Tramways 1922, Sept. — RGE 1923, Bd. 13, Nr. 4.
- Scherbius: Über Selbsterregung und Nutzbremung von Maschinen mit Reihenschlußcharakteristik. ETZ 1912, H. 49.
- Seefehlner: Die Rittnerbahn. EKB 1908, H. 29.
- Seefehlner: Die elektrische Bahn Triest—Opicina. EB 1904, H. 14.
- Seefehlner: Die Nutzbremung elektrischer Fahrzeuge im Eisenbahnbetrieb. Eu.M 1917, H. 34. — EKB 1917, H. 24.
- Seefehlner: Zur Frage der rein elektrischen Bremsung der Straßenbahnwagen. EKB 1919, H. 24.
- Volkers: Für die rein elektrische Bremsung der Straßenbahnwagen. EKB 1918, H. 30 u. 1919, H. 16.
- Whittaker: D. C. Regenerative locomotive on the Erie & Northern Ry. ERJ Oktober 1916, S. 730.
- Wolf: Neuere Schaltungen für elektrische Energierückgewinnung und Bremsung. EKB 1916, H. 6.
- Regenerative braking with single-phase commutator motors. El. Juli 1919, S. 57.
- Regeneration characteristic curves of direct current locomotives. EJ März 1922.
- Stromrückgewinnung mit Hauptschlußmotoren. DSKBZ 35. Jahrg., H. 19. — Ref. Eu.M 1922, H. 36.
- Magnetbremsen-Gesellschaft, Berlin. Elektromagnetische Schienenbremsen 1912.
- Système de freinage avec récupération d'énergie pour véhicules actionnés par moteurs monophasés à collecteur. GC 1918, S. 347.

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 vom Bremsstrom betätigte Behelfe bewirkt werden.

Beide Systeme kommen für Fahrzeuge in Betracht, die mit Gleichstrom-Reihen-

schlußmotoren 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.

Wird der gesamte, dem Fahrzeug innewohnende Kraftüberschuß durch die Triebmotoren in elektrischen Strom umgeformt und Widerständen zugeführt, so 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 die umgeformte Arbeit aufnehmen, von den Übertragungsverlusten abgesehen, für die ganze Bremsleistung des Fahrzeuges bemessen werden.

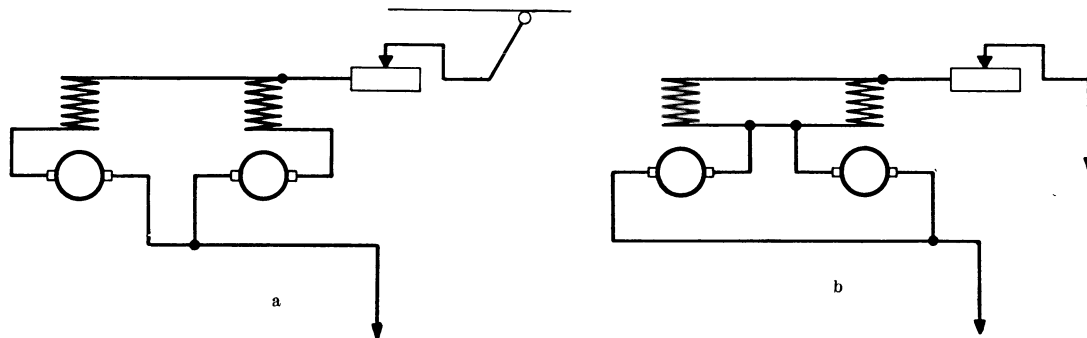


Abb. 167. Schaltung zweier Reihenschlußmotore für unmittelbaren Kurzschlußbremsung.
a) Fahrt, b) Bremse.

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. 167) — gemeint ist hierbei die elektrische Kurzschlußbremsung überhaupt — weist den nicht unerheblichen Nachteil auf, daß wegen der magnetischen Trägheit des Systems eine je nach der Fahrgeschwindigkeit verschiedene Zeit verstreicht, bis die Bremswirkung einsetzt.

Andererseits birgt die Kurzschlußbremsung insofern auch eine Gefährdung der Motoren in sich, als die Raschheit des Schaltens dem Führer anheimgestellt ist.

Die Stromstärke kann daher in bedenklichem Maße anwachsen; da selbsttätige Schalter oder Sicherungen im Bremsstromkreis untunlich 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.

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.

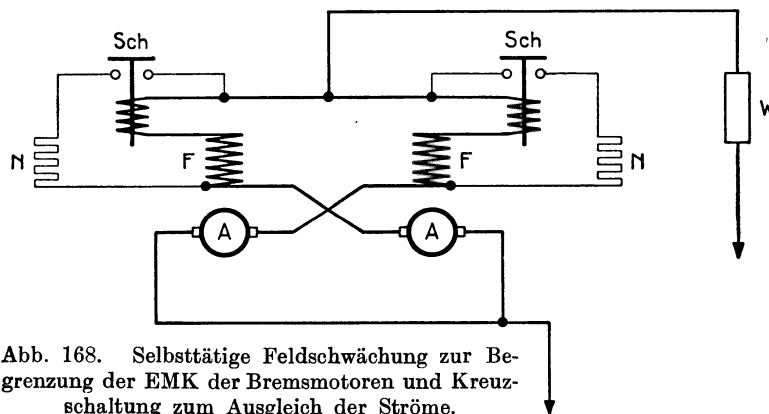


Abb. 168. Selbsttätige Feldschwächung zur Begrenzung der EMK der Bremsmotoren und Kreuzschaltung zum Ausgleich der Ströme.

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

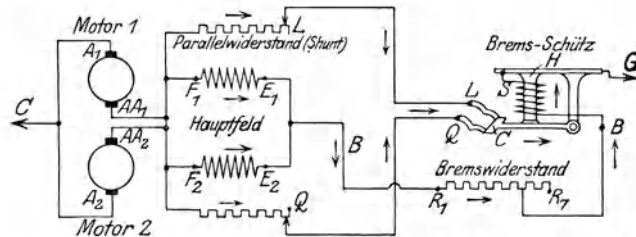


Abb. 169. Selbsttätige Feldschwächung zur Begrenzung der EMK der Bremsmotoren. Ausgleichschaltung, Zugspule im Hauptstromkreis.

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. 170) übertragen wird, der durch den Strom oder die Generatorspannung der bremsenden Motoren betätigt wird (Abb. 168, 169).

Es ist einzusehen, daß durch dieses System der ganze Bremsvorgang wesentlich sanfter gestaltet werden kann, da 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 er an Stelle der vom Ankerstrom betätigten Zugspule eine solche zu erhalten, die parallel zum Anker im Nebenschluß liegt. Da man dünnadrätige Nebenschlußwickelungen, die an der vollen Betriebsspannung liegen, im Bahnbetriebe gerne vermeidet, ist die erstgenannte Anordnung mit einer mechanisch festen Spule mit wenigen Windungen gebräuchlicher.

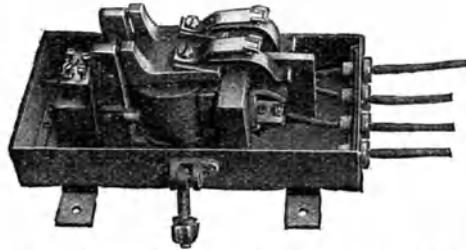


Abb. 170. Durch den Bremsstrom betätigter elektromagnetischer Schalter (AEG).

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, so ist diese Anordnung sehr betriebssicher und verlangt wenig Instandhaltung.

3. Die gemischte Bremsung (Abb. 171). 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 Bremsstrom zur Betätigung besonderer elektromagnetischer Bremsvorrichtungen verwendet. Es ist üblich, den Motorwagen mit den Motoren abzubremesen, die Beiwagen dagegen durch Solenoidbremsen, die vom Kurzschlußstrom durchflossen werden und 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

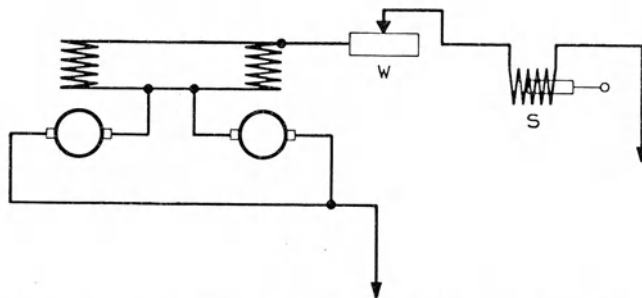


Abb. 171. Schaltplan für mittelbare und gemischte elektrodynamische Bremsung.

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 verschieden geartete Motoren vorhanden, d. h. Motortypen, die für eine bestimmte Stromstärke nicht dieselbe Zugkraft aufweisen, so 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 schafft, um die auf allen Fahrzeugen angebrachten elektromagnetischen Bremsen zu betätigen. Es ist dann nicht nötig, die Zugspulen der Magnetbremsen für jene 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 benützt. 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, da das Fahrzeug im Gefälle solche Geschwindigkeiten annehmen kann, bei welchen der Seriengenerator mit der für die Bremskraft nötigen Stromstärke bereits höhere Spannungen erzeugt, als die, 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 und Bremskraft bemessen werden, sondern mit Bedacht darauf, daß beim Einsetzen der Bremsung bei der praktisch vorkommenden Höchstgeschwindigkeit die für den Motor höchstzulässige Spannung nicht überschritten wird.

Die Spannungscharakteristik für die fragliche Geschwindigkeit gibt hierüber Aufschluß. Im allgemeinen wird man gut tun, für die Bremsung eine um höchstens 20% erhöhte Spannung zuzulassen.

Für diese Art der Bemessung des Bremswiderstandes spricht auch der Umstand, daß es vom Standpunkt der Reisenden und auch zur Schonung der Fahrzeuge von Vorteil ist, wenn die Bremsung zunächst sanft — mit einer verhältnismäßig kleinen Verzögerung — einsetzt. Wenn die Fahrgäste durch die angedeutete 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 Verzögerung auf. Diese Übelstände werden durch eine gewissermaßen vorbereitende Bremsstufe vermieden.

Aus der Zugkraftkurve des Motors kann man unter Hinzufügung der mechanischen Verluste mit ausreichender Genauigkeit die Bremskraftkurve ableiten. Aus dieser ergibt sich die entsprechende mittlere Stromstärke, von der man entsprechend der Stufenzahl des Bremsschalters Schwankungen nach oben und unten zulassen muß.

Der Vorgang der Berechnung der Bremswiderstände läßt sich an Hand eines Beispiels am klarsten ableiten.

In Abb. 172 sind die Kennlinien eines Motors für 550 V Klemmenspannung dargestellt. Die den verschiedenen Stromstärken und dem Motorwiderstand entsprechenden EMKe erscheinen durch die vom Spannungswert 550 V ausgehende, schiefe Gerade gegeben. Die Höchstgeschwindigkeit soll 27,5 km/h betragen und hierbei die Verzögerung auf der ersten Stufe 0,2 m/sek² nicht überschreiten. Das Wagen-gewicht je Motor sei 10 t, die Strecke habe ein Gefälle von 40‰, der Zugwiderstand sei 6 kg/t. Die erforderliche Bremskraft je Motor ist

$$40 \cdot 10 + 0,2 \cdot 1000 - 10 \cdot 6 = 540 \text{ kg.}$$

Dieser Zugkraft entspricht eine Stromstärke von 50 A, max. 65 A. Bei letzter Stromstärke läuft der Motor mit der Geschwindigkeit von 18,5 km/h. Der Geschwindigkeit von 27,5 km/h entspricht, wie aus der Ähnlichkeit der Hilfsdreiecke hervorgeht, die EMK 700 V. Hieraus folgt, daß der Motor bei 28 km/h nicht

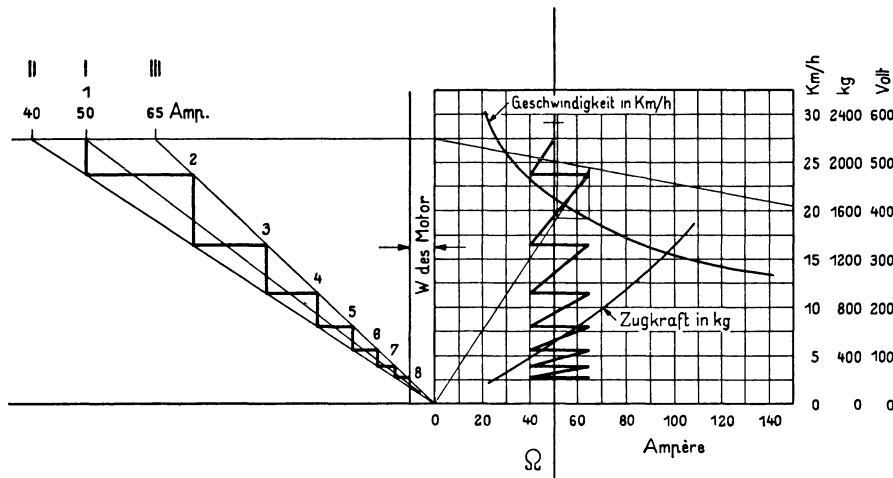


Abb. 172. Zeichnerische Ermittlung der Ohmschen Werte der Bremswiderstände aus den Kennlinien der Triebmaschine.

mit dieser Stromstärke gebremst werden sollte. Man müßte sich im fraglichen Gefälle mit einer kleineren Bremskraft 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 700 V darf jedoch dann zugelassen werden, wenn es sich um eine Motortype handelt, die mit entsprechend verminderter Stromstärke auch bei 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 V langsamlaufend und mit der nächst höheren Regelspannung von etwa 700 V schnellaufend verwendet werden können.

Um die Darstellung nicht durch weitere Linien zu verwirren, sei angenommen, dieser Fall liege vor.

Wenn für die Stromstärke ein Maßstab entsprechend b A, für die Spannung a V und für den Widerstand $c \Omega$ je 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 Linien, welche die den EMKe entsprechenden Punkte mit dem Ursprung verbinden, die Werte der Widerstände in Ohm.

Derart erhält man den Widerstand für den gewählten Mittelwert bzw. unteren und oberen Grenzwert der Stromstärke. Trägt man diese Werte auf der Horizontalen $v = 27,5$ km/h nach links auf (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 Fahr Schalters eingehalten werden müssen.

Das Verfahren ist demnach die Umkehrung desjenigen für das Anfahren, indem die für die EMK der Serienmaschine die Beziehung

$$E = JW + JW_m \text{ gilt,}$$

wobei J die Stromstärke,
 W_m den Motorwiderstand und
 W den Bremswiderstand

bezeichnet. Da E proportional der Drehzahl, der Geschwindigkeit und der Stromstärke ist, so gilt

$$cJn = JW + JW_m,$$

somit

$$cn = W + W_m.$$

Die verschiedenen Werte für W bei gegebener Stromstärke liegen auf Geraden, nämlich auf den in obiger Darstellung eingeführten Linien I o , II o und III o .

Vom Werte W des Bremswiderstandes sind die Widerstände der betätigten Zugs- spulen der Bremsmagnete abzuziehen. Wenn die Widerstände vom Strom von 2 bzw. 4 parallel geschalteten Motoren durchflossen werden, so sind diese mit $\frac{1}{2}$ bzw. $\frac{1}{4}$ ihres Ohmschen Wertes, jedoch mit entsprechend höherer Kapazität auszuliegen.

6. Bremsschaltungen. Da Straßenbahnwagen fast immer mit mindest zwei Trieb- motoren ausgerüstet sind, so ist das Verhalten dieser parallel auf einen Widerstand arbeitenden 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. 173) bei gleicher Geschwindigkeit ausgehend, ist zu er- sehen, daß dieser Zustand nicht stabil sein kann, weil eine geringfügige Änderung, z. B. die Zunahme der Strom- stärke der Maschine I, ein Wachsen der Spannung und damit ein weiteres Steigen der Stromstärke I und gleich- zeitige Abnahme der Stromstärke der Maschine II be- wirkt. Die Summe der Ströme muß nahezu konstant bleiben, weil eine gegebene Bremskraft vorausgesetzt wird. Hieraus folgt, daß dieser Zustand rasch zu einem Kurz- schluß über die Maschine II und zur Umpolarisierung der letzteren führen muß.

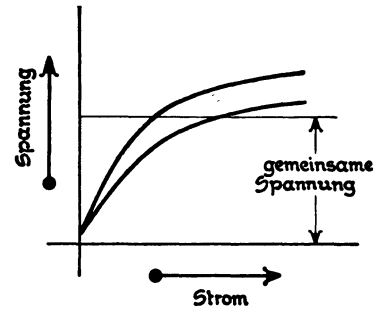


Abb. 173. Verschiedene Kennlinien $E = f(J)$ von zwei Hauptschluß- generatoren in Parallelschaltung.

In Wirklichkeit ist der Vorgang insofern ein anderer, als die Motoren — ent- sprechend der Fahrtrichtung in Generatorschaltung — noch unerregt an einen Wider- stand gelegt werden. Erregt sich z. B. Motor I früher als Motor II, so geht mit Rücksicht darauf, daß der Widerstand der Motoren wesentlich kleiner sein muß als der Brems- widerstand, der überwiegende Teil des Stromes durch Motor II und polarisiert diesen um. Die beiden Motoren arbeiten hintereinander in Kurzschluß. Durch Anlegen der in Abb. 167b gezeichneten Verbindung ist das Ummagnetisieren des Motors II verhindert.

Aus demselben Grunde sind bei Fahrt im Gefälle — also stromlos — die Strom- kreise sonst parallel geschalteter Motoren zu lösen oder, wenn dies in der Steuerung nicht vorgesehen ist, darf in Fahrt ohne Strom die Schaltrichtung der Felder nicht gewechselt werden, weil sonst unvermeidlich unkontrollierbare Bremswirkungen ent- stehen. Das gleiche ist der Fall, wenn ein Wagen mit parallel geschalteten Motoren nach deren Abstellen von einem anderen Fahrzeug in der der ursprünglichen Fahrtrichtung entgegengesetzten geschleppt wird.

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 Hauptschlußgeneratoren, wenn sich die Generatoren wechselweise erregen. Die dies- bezügliche Schaltung ist unter dem Namen Kreuzschaltung (Abb. 174) bekannt und besteht darin, daß bei mehreren Motoren Felder und Anker zyklisch ver- tauscht werden.

Ist eine Verschiedenheit der EMKe vorhanden, so entsteht ihrem Unterschied entsprechend ein Ausgleichsstrom, der, vom Anker des Motors mit höherer Spannung

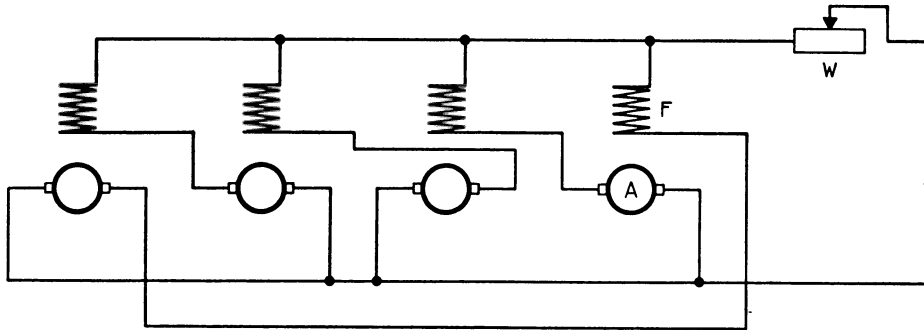


Abb. 174. Zyklische Kreuzschaltung zur Kurzschlußbremsung von vier Motoren.
A = Anker; F = Feld; W = Bremswiderstand.

ausgehend, das Feld der anderen Maschinen 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, so kann nach Angaben der AEG eine Bremschaltung vorgesehen werden, die auf der Voraussetzung beruht, daß

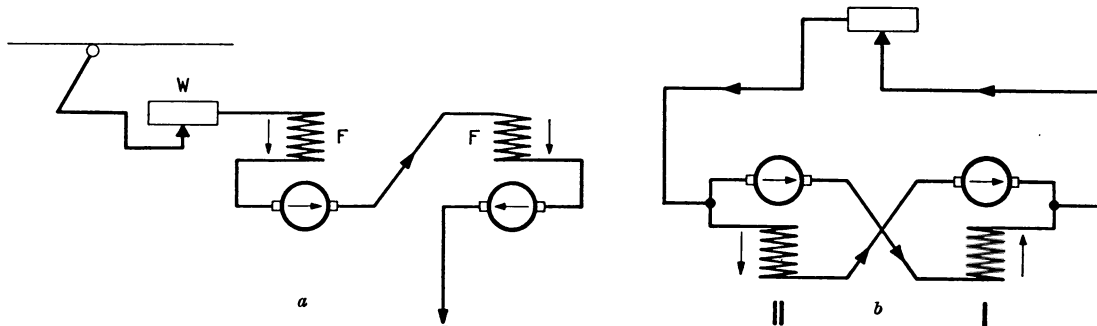


Abb. 175. Bremschaltung der AEG.: a = Fahrt; b = Bremsung.

der remanente Magnetismus zweier Motoren praktisch nie gleich groß ist. In Abb. 175 ist die Schaltung für Fahren und Bremsen dargestellt; man sieht, daß, wenn z. B. Motor II sich früher oder stärker erregt, hierdurch der Motor zweimal ummagnetisiert wird, aber im übrigen als Generator gemeinsam mit Motor I auf den Bremswiderstand arbeitet.

7. Elektromagnetische Solenoidbremsen (Abb. 176) sind Zugmagnete, die durch den Generatorstrom der Triebmotoren erregt werden. Der magnetische Stromkreis besteht aus einem zylindrischen, einseitig geschlossenen Gehäuse aus Stahlguß — neuerdings aus Gußeisen — und einem axial beweglichen, einseitig konisch verjüngten Stahlkern, welcher das Gestänge der Klotzbremse betätigt. Das 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 konstant, sie ändert sich vielmehr mit der Lage des Kernes, d. h. innerhalb des Hubes, und ist je nach der Stromstärke verschieden.

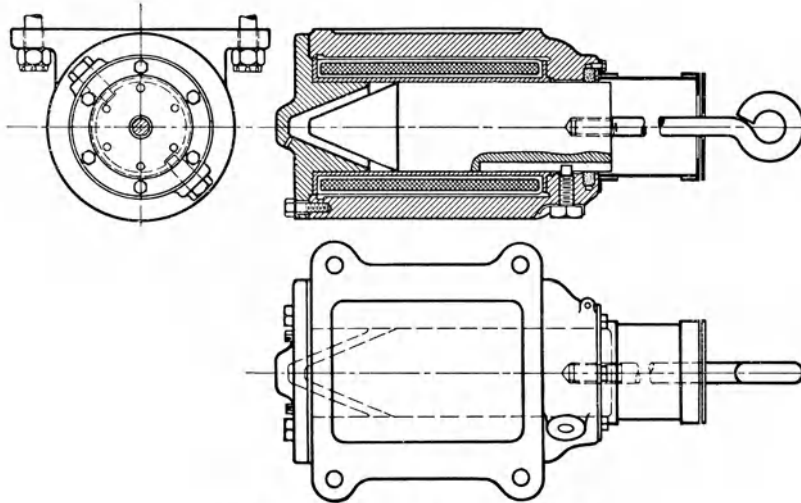


Abb. 176. Solenoidbremse der SSW.

Zur Beurteilung der zu wählenden Type und Wicklungsart, die von der verfügbaren Stromstärke abhängt, werden im Versuchswege die Kennlinien der Bremszugkraft in Abhängigkeit vom Polabstand und der Stromstärke ermittelt. Über den Charakter dieser Kennlinien gibt die Abb. 177 Aufschluß.

Diese Kennlinien beziehen sich auf eine Bremse, die für Anhängewagen von ca. 5 t Leergewicht gangbar ist. Die Bremse verträgt bei 90 A zulässigem Höchststrom durch 4 Min. einen Regelstrom von 70 A (Kurve B), sowie einen Dauerstrom von 11 A, entsprechend 120 W. Gegenüber der Normalaufnahme von 4900 W ist die Dauerleistung sehr gering. Hieraus folgt, daß die Beanspruchung der Bremse im Betrieb vorher 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. 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 wird. Es kann dann eine angemessene Abnützung 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 Kennlinien (Abb. 177) ist zu entnehmen, daß mit abnehmender Stromstärke der Scheitelwert der Bremskraft bei kleinerem Wert des Polabstandes, also größerem Hub eintritt, was insofern

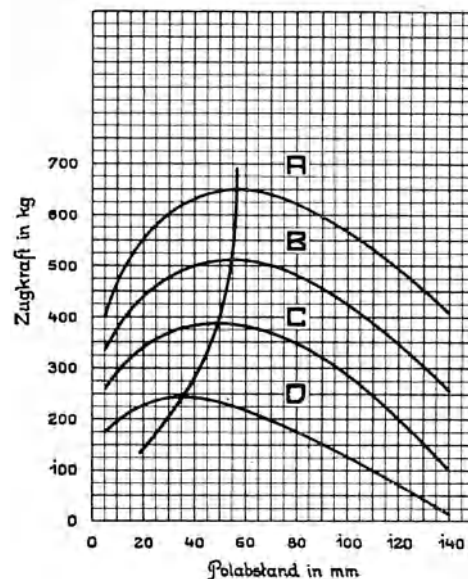


Abb. 177. Kennlinien einer Solenoidbremse für 500 kg Regelzugkraft, Kolbenstellungen für die größte Zugkraft (AEG).

Stromstärken $A = 90$ A; $B = 70$ A; $C = 50$ A; $D = 30$ A.
Dauerleistung 120 W, 11 A; Leistung 4900 W 4 min.

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

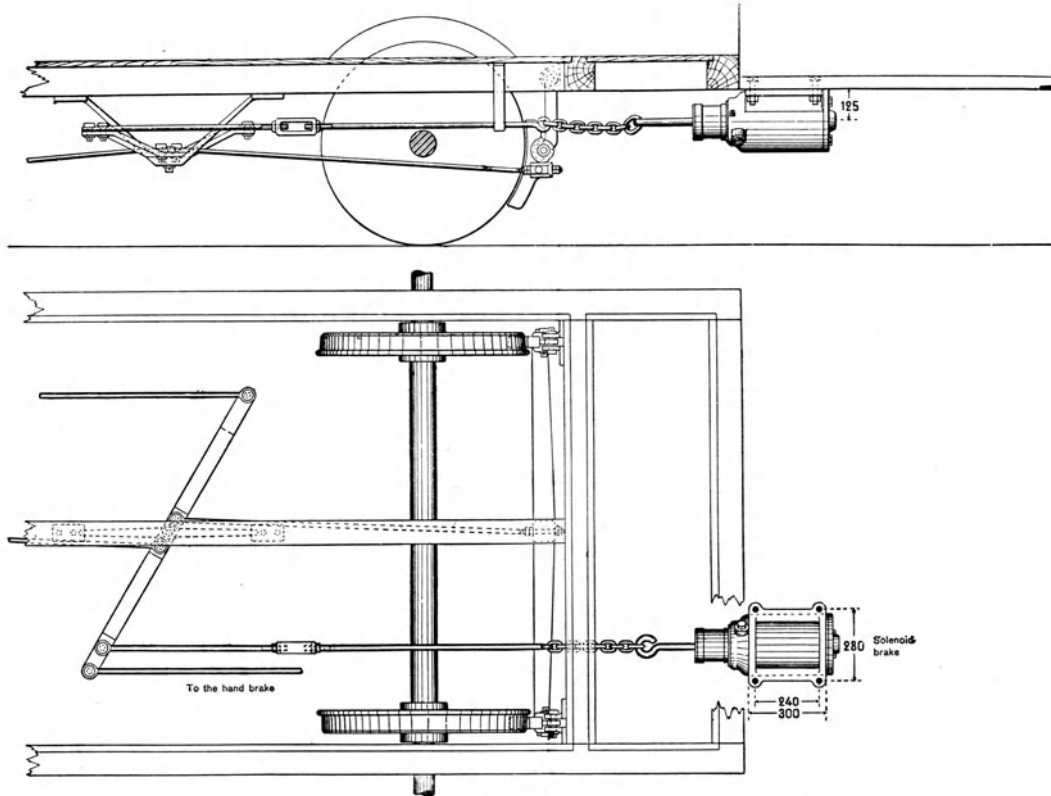


Abb. 178. Anordnung der Solenoidbremse im Wagengestell (SSW).

ein Spiel von 5 bis 10 mm zu geben pflegt, so müßte das Bremsgestänge mit einer Übersetzung von 7 bis 14 ausgeführt werden. Die Abnutzung von Rad oder Klotz kann daher etwa 3,6 bis 1,8 mm erreichen, bevor eine Neueinstellung des Gestänges nötig wird.

Bei Anwendung dieser Übersetzungen wird ein Bremsdruck von 3500 bzw. 7000 kg am Radumfang ausgeübt, daher wird der Wagen bei 1:10 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 Zugwiderstand leer mit einer Verzögerung

$$\frac{350 + 25}{500} = 0,75, \quad \text{beladen} \quad \frac{350 + 40}{800} = 0,49$$

bzw.

$$\text{leer} \quad \frac{700 + 25}{500} = 1,45, \quad \text{beladen} \quad \frac{700 + 40}{800} = 0,92 \text{ m/sek}^2$$

abgebremst.

Dieses Rechnungsergebnis beweist im Hinblick darauf, daß die Bremsgestänge der in Betracht kommenden Wagen meist mit Übersetzung von $\frac{1}{9}$ bis $\frac{1}{12}$ gebaut werden, daß selbst noch in starkem Gefälle und bei niedrigeren Stromstärken die nötige Bremskraft vorhanden sein wird, da man stärkere Verzögerungen als 0,5 bis 0,7 m/sek² 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 Fahrtdiagramm 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 etwa 18 mkg während 4 min; letztere für eine solche mit rund 35 mkg.

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 Fahrzeuge die Bremsung des ganzen Zuges vereiteln kann. Im Hinblick auf die lösbaren Kuppelungen zwischen den einzelnen Fahrzeugen kann auch eine Unterbrechung des Bremsstromkreises eintreten. Aus diesen Gründen ist fast ausschließlich die Nebeneinanderschaltung der Bremsen gebräuchlich.

Für alle elektromagnetischen Bremsen ist die Erregung durch den Kurzschlußstrom der als Generatoren arbeitenden 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 betriebssicheren Bauformen. Wenn man von der Drehung der Räder und der Reibung zwischen Triebrad und Schiene unabhängig sein will, kann die Erregung der Bremse der Oberleitung oder einer mitgeschleppten Batterie entnommen werden. Letzteres wird meist für Steilbahnen von seiten der Behörden verlangt; man baut dann, um die Leistung der Batterie einzuschränken, die Bremsen mit sogenannter Verbundwicklung, d. h. mit einer Starkstromspule für Dauerbetrieb mit Motorstromerregung und einer mit Linienstrom betätigten sogenannten Frischstromwicklung für Notbremsungen. Letztere Wicklung wird nicht unmittelbar, sondern unter Vor-schaltung eines Widerstandes an die Oberleitung oder an 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 mittels einer Kette das Hebelsystem der Klotzbremse betätigen (Abb. 179).

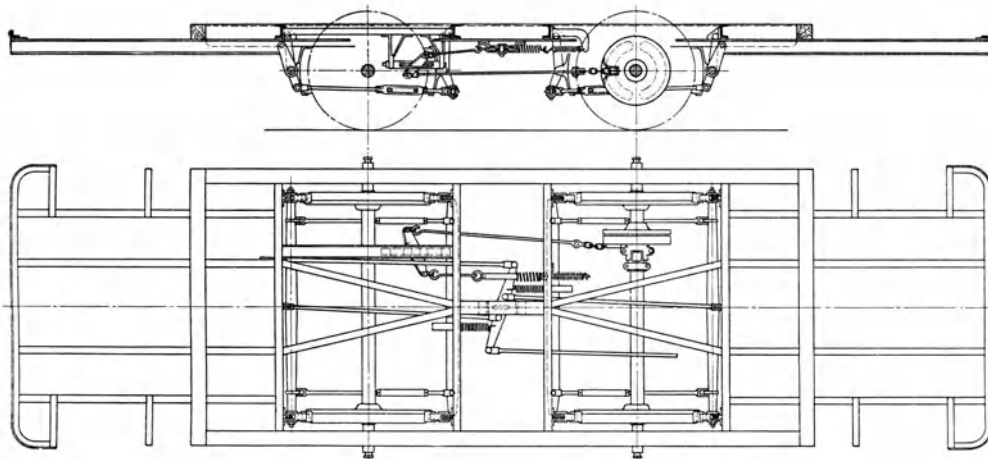


Abb. 179. Anordnung der mittelbar wirkenden Scheibenbremse im Wagengestell.

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 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, so 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 Bremscheibe entstehenden Wirbelströme unterstützen ihrerseits

auch die Bremswirkung. Die Solenoidbremsen sind den Scheibenbremsen infolge ihrer wesentlich einfacheren Bauart und geringeren Abnutzung überlegen.

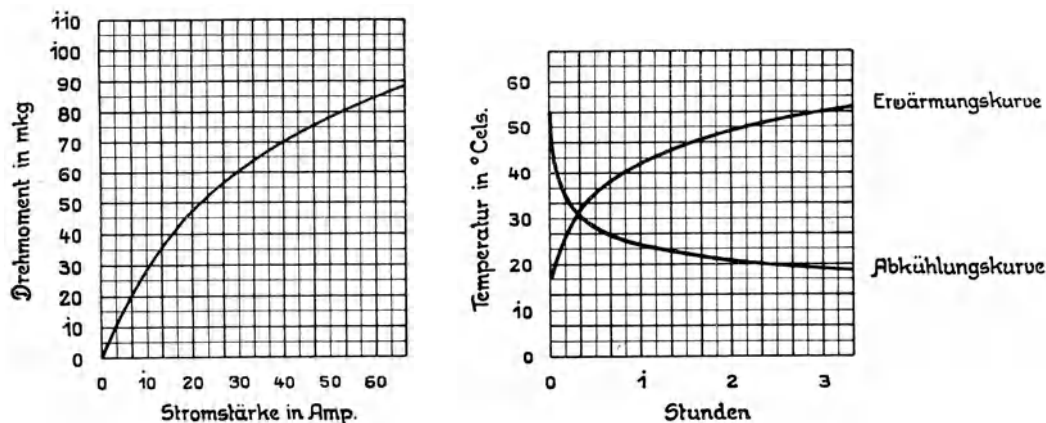


Abb. 180. Kennlinien der direkt wirkenden Scheibenbremse (AEG).

Für die Wahl der Type ist auf Grundlage der Kennlinien (Abb. 180) 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.

11. Die Schienenbremsen gelangen in der Hauptsache auf Bahnen mit starkem Gefälle — über 60‰ — zur Anwendung; sie sind auch bei Straßenbahnen dann vor-

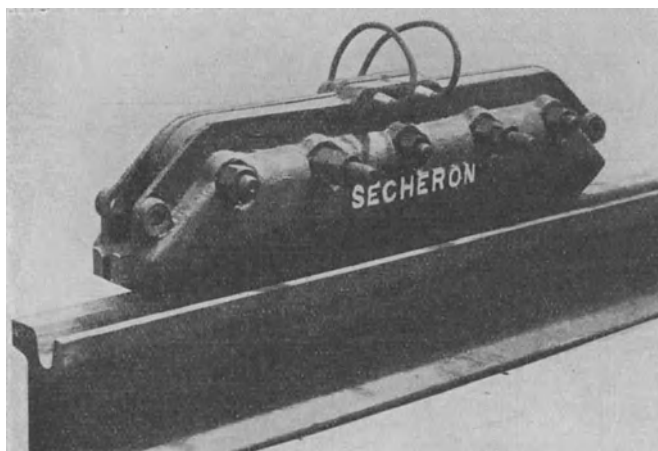


Abb. 181. Einspulige Schienenbremse (Secheron, Genf).

zusehen, wenn besondere Verkehrsverhältnisse — hohe Geschwindigkeit, enge Straßen, starker Fuhrwerksverkehr u. dgl. — es als wünschenswert erscheinen lassen, über einen 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 entsprechend 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. Bei gleicher Zugkraft wird die kürzeste Bauart jeder längeren vorzuziehen sein, weil die Zugkraft der längeren Bauform durch die Gleiskrümmungen mehr beeinträchtigt wird.

In dieser Beziehung ist die Bauart mit Quermagnetisierung der Schiene und einem Erregerspulensystem [West., Magnetbremsengesellschaft, Secheron (Abb. 181) und BBC] derjenigen mit mehreren Folgepolen in der Längsrichtung der Schiene (AEG, Abb. 182) überlegen, indem erstere je Meter Baulänge 3750 bis 4450 kg Zugkraft auf-

weisen, letztere dagegen nur 2300 bis 3060 kg. Hierzu 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, außerdem wird das auf den Achsen

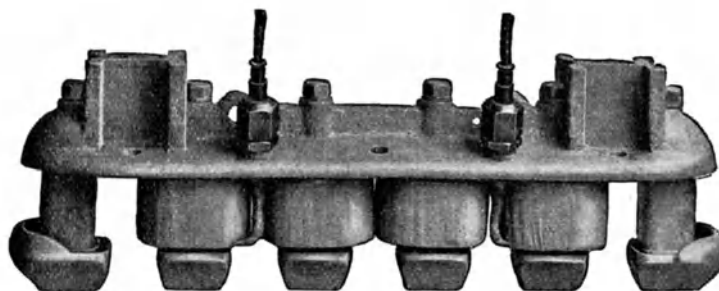


Abb. 182. Sechspolige Schienenbremse (AEG).

lastende Gewicht des Wagens, sofern die Bremse am 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.

Die Bremswirkung der Schienenbremsen (Abb. 183) entspricht der Reibungszahl der Bewegung, und zwar derjenigen für Stahl auf Stahl, 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 $\frac{1}{30}$	„	„	„	50 bis 33 kg
Reine nasse Schienen	$\frac{1}{7}$ bis $\frac{1}{15}$	„	„	„	143 „ 67 „
Reine trockene Schienen	$\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{7}$	„	„	„	200 „ 143 „

12. Die Nutzbremmung bildet eine zweite Art der elektrodynamischen Bremsung. Diese Bremsart ist grundsätzlich dadurch gekennzeichnet, daß die freie Energie des Fahrzeuges oder des Zuges nicht wie bei der Kurzschlußbremsung in Wärme überführt, demnach vernichtet, sondern als elektrische Arbeit an die Fahrleitung oder in etwa mitgeführte Speicher zurückgeliefert wird. Man wendet sie insbesondere dann an, wenn in der Talfahrt der Züge so große Arbeitsmengen frei werden, daß sie sich mit bequemen Einrichtungen nicht mehr in Wärme umsetzen lassen oder wenn die Ersparnisse an Strom von Wichtigkeit sind.

Gegen diese Betriebsart bestanden bei Vollbahnen bislang Bedenken, da 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

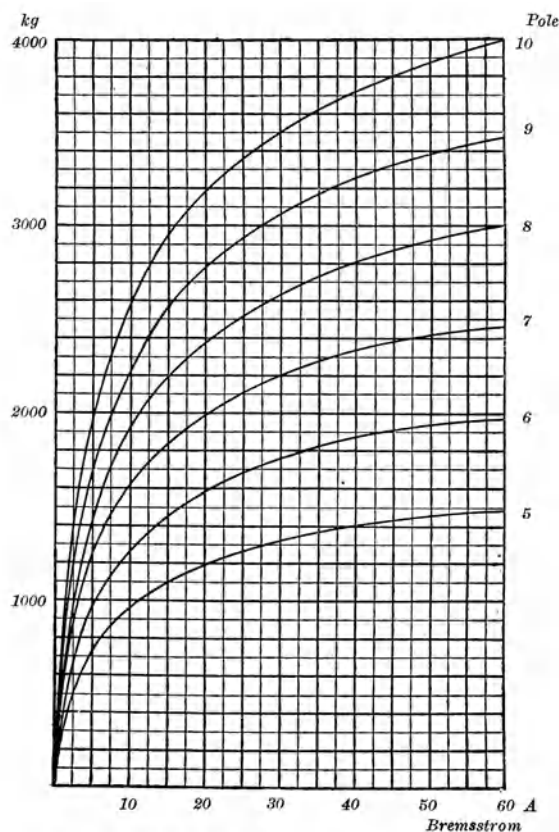


Abb. 183. Kennlinien der Schienenbremse Abb. 182 für ein Schienengewicht von mindestens 46 kg je lfd. m und nicht gewölbten Schienenkopf.

Bedenken unbegründet sind, kann die elektrische Bremsung der Züge durch die Lokomotive 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 Bremsrichtung erhöht und gleichzeitig Radreifen und Bremsklötze schont. In warmen Tunnels — Untergrundbahnen — kommt noch die Abfuhr der Bremswärme durch die Leitung in Betracht, weiters, 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 Zugwiderstand/t,
 h die Steigung ‰;

dann wird bei einem Nutzeffekt η_B der Lokomotive zwischen Rad und Stromabnehmer in der Bergfahrt eine Leistung entsprechend der Zugkraft/t

$$Z_B = \frac{w + h}{\eta_B}$$

zuzuführen sein.

In der Talfahrt wird die Zugkraft

$$Z_T = (h - w) \cdot \eta_T$$

frei, daher ist

$$Z_T = Z_B \frac{(h - w) \eta_T \cdot \eta_B}{h + w}.$$

Für

$$h = 2w, \quad \eta_B = 80\%, \quad \eta_T = 75\%$$

wird z. B.

$$Z_T = 0,2 Z_B,$$

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 dadurch, daß die Annahme, der Zugwiderstand sei für das beim Bremsen treibende Zugsgewicht derselbe, wie er für den bergauf geschleppten Zug festgestellt wurde, nicht zutrifft.

Tatsächlich sind bis jetzt auf den Steilstrecken der Giovi-Linie in Italien und denjenigen der Chicago-Milwaukee-St. Paul-Bahn in den U.S.A. ($h = 31\%$ 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 Ausgabenetat aus.

Wichtiger ist der Umstand, daß durch die Nutzbremung die freiwerdende Energie nicht zu schädlicher Arbeit, d. h. zur Abnützung 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 und gleichmäßige 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 daher die höchsterreichbare Sicherheit.

13. Die Nutzbremung mit Gleichstrom-Nebenschlußmotoren erfordert keine besondere Einrichtung, da 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 jedoch unerwünscht; infolgedessen ist es zweckmäßig, Hilfseinrichtungen vorzusehen, welche diesen Übelstand mildern.

Statt die Erregung von der Fahrleitung parallel zum Anker zu speisen, sieht man mittels eines Motorgenerators eine Fremderregung vor, die sich den Spannungsverhältnissen der Linie anpaßt.

Für die Zahnradlokomotiven des Eisenerzer Erzbergbaues ist z. B. nach Angaben des Verfassers die Schaltung Abb. 184 ausgeführt worden. Die Antriebsmaschine des Erregerumformers ist ein R.S.-Motor, dessen Drehzahl den Spannungsschwankungen folgt. Die Erregerdynamo hat 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, so wäre bei

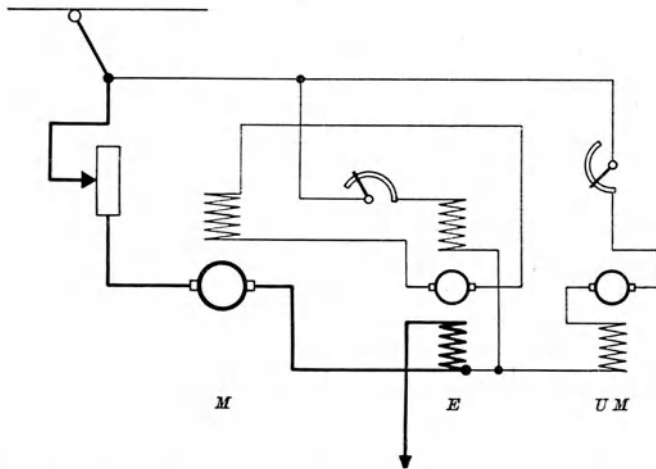


Abb. 184. Schaltplan zur Nutzbremung mit einem Nebenschlußmotor, abfallende Charakteristik durch Umformererregung erzielt. Das Feld der Erregermaschine wird durch den Strom der Hauptmaschine geschwächt (AEGU).

M Hauptmaschine, *E* Erregermaschine, *UM* Antriebsmotor der Erregermaschine.

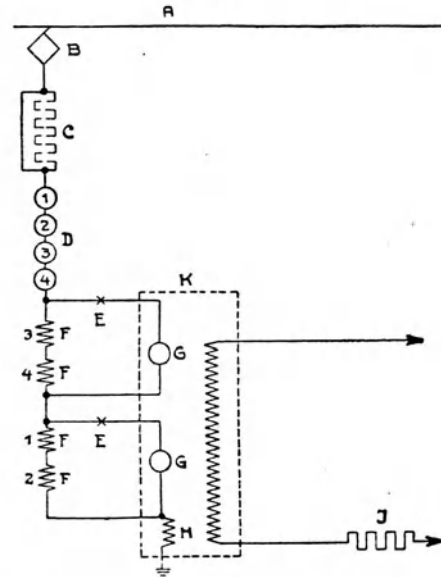


Abb. 185. Schaltprinzip der Nutzbremung der Lokomotiven der Ch.M. & St.P.Bahn (GEC).

normaler Erregung ein starker Stromstoß und dementsprechend ein heftiger mechanischer Stoß im Fahrzeug die Folge. Diese Wirkung wird durch den gleichzeitigen Tourenabfall der Erregermaschine und die Gegenwirkung der Hauptstromwicklung gemildert.

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.

Es war ursprünglich beabsichtigt, nur bergab mit der Umformererregung zu fahren. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, daß diese Schaltung den besonderen Vorteil aufweist, daß das Drehmoment der Maschine ebenso beim Ziehen wie beim Bremsen von den Schwankungen der Linienspannung praktisch unabhängig wird. Wirtschaftlich ist dieser Umstand von großer Tragweite, weil zufolge dieser Eigenschaft der Schaltung die Leitungsanlage mit vergleichsweise großem Spannungsabfall ausgelegt werden kann, ebenso wie wenn Fahrzeuge mit gewöhnlichen Reihenschlußmotoren Anwendung finden würden.

Diese Schaltung und viele ähnliche Schaltungen ermöglichen auch die Nutzbremung mit Reihenschlußmotoren, in welchem Falle die eben erwähnte magnetische Trägheit des Systems sich stark vermindert, dagegen die Erregermaschinen wegen der hohen Stromstärken und niedrigen Spannungen von kaum einigen Volt ungewöhnliche

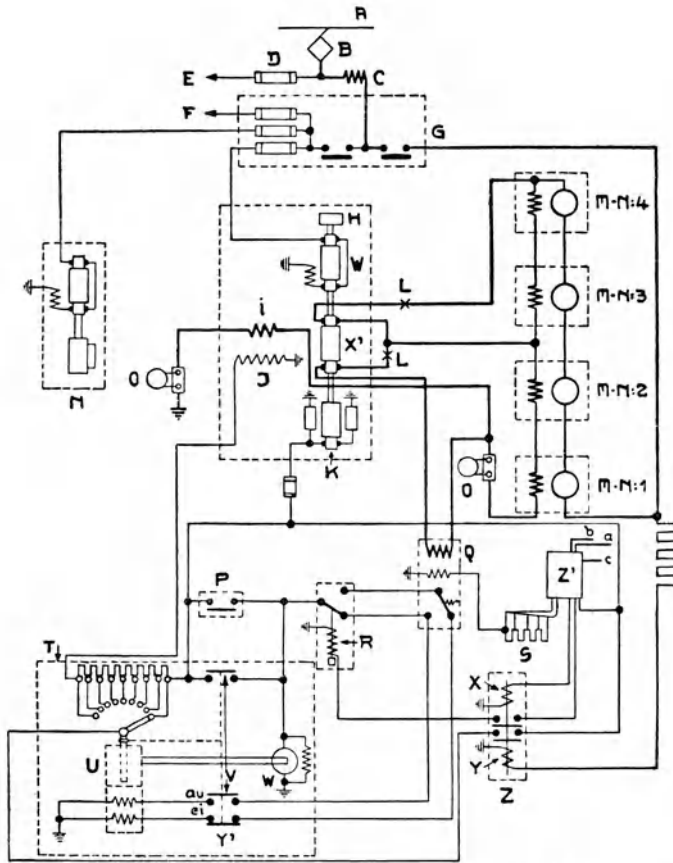


Abb. 186. Schaltplan zur Nutzbremung mit Hochspannungs-Reihenschlußmotoren der Ch.M. & St.P.Bahn.

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 (GEC).

Abmessung erhalten, außer es handelt sich um Hochspannungsmotoren, deren Feld einen relativ hohen Widerstand aufweist (3000-Volt-Lokomotive der Chicago - Milwaukee - St. Paul - Bahn Abb. 185 u. 186).

Bei der GEC-Schaltung werden je zwei Felder von einer Hilfsdynamo fremd erregt; die Erregung dieser Dynamo wird vom Bremsstrom beeinflusst. Bei dieser Schaltung führen die Anker der Hilfsgeneratoren die Summe der Brems- und Feldströme.

Diesem Übelstand begegnet die Westinghouse-Schaltung Abb. 187, bei welcher zunächst das angestrebte Zusammenwirken der Erregermaschine mit dem jeweiligen Bewegungszustand des Zuges dadurch erreicht wird, daß die Erregermaschine von einer Laufachse angetrieben wird. Weiters wird durch die Schaltung erreicht, daß die Hilfsdynamo nur den Erregerstrom zu führen hat, indem der Bremsstrom über einen in den Erregerstromkreis geschalteten Widerstand geleitet wird.

14. Für die Nutzbremung mit Drehstrominduktionsmotoren gilt das bezüglich der

Gleichstromnebenschlusmotoren Gesagte mit der Ergänzung, daß hier wirtschaftliche Mittel zur Milderung der Starrheit des Verhaltens nicht bekannt sind. Die Charakteristik der Induktionsmaschine ist allerdings weniger starr als diejenige der Gleichstrommaschine, außerdem ist sie, da kein Kollektor und keine empfindliche Erregerwicklung vorhanden ist, durch übermäßige Bremsstöße weniger gefährdet.

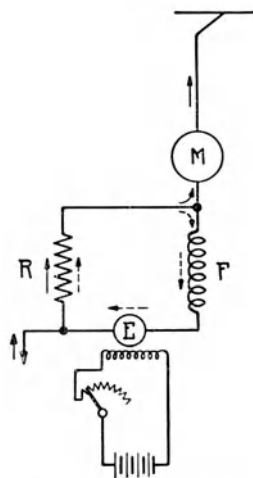


Abb. 187. Nutzbremungsschaltung von West.

15. Nutzbremung mit Wechselstrommotoren. Vorschläge, um mit Wechselstrom-Kollektormotoren die Nutzbremung 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 nähergetreten ist.

Wechselstromkollektormotoren mit Reihenschaltung arbeiten bei richtiger Schaltfolge von Stator und Rotor wie Gleichstrommaschinen; es tritt daher, da der Stromkreis durch die Trans-

formatorwicklung 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 Generatorspannung 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 AEG — Abb. 188 und 189 — wird das Feld eines Motors durch eine Nebenschlußkollektormaschine erregt und auf diese Art die Nutzbremung erzwungen. 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.

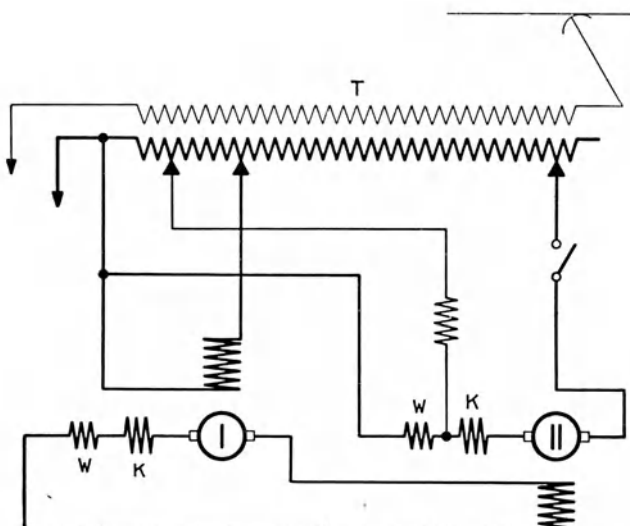


Abb. 188. Schaltplan für die Nutzbremung mit einem Wechselstrom-Hauptschlußmotor, Fremderregung durch eine im Nebenschluß erregte Wechselstrom-Kollektormaschine (A.E.G.).

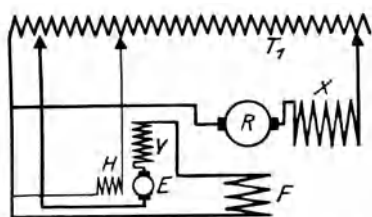


Abb. 189. Schaltprinzip für die Nutzbremung mit einer Wechselstrom-Hauptschlußmaschine.

Fremderregung gemischt: von der Linie und einer im Nebenschluß erregten Kollektormaschine.

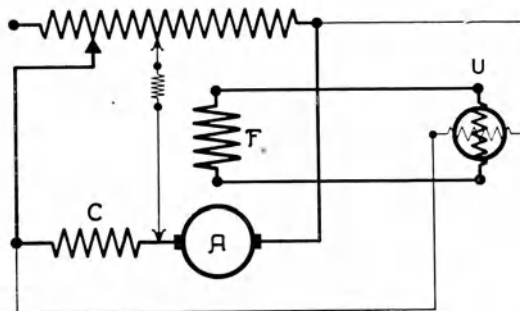


Abb. 190. Schaltplan für die Nutzbremung mit einem Wechselstrom-Hauptschlußmotor, Felderregung durch einen Phasenspalter.

Diese Schaltung krankt daran, daß wegen des $\cos \varphi \cong 0$ der Erregergenerator für vergleichsweise große KVA ausgelegt werden muß.

Sind mehrere Motoren in dem zu bremsenden Fahrzeug vorhanden, so kann jeweils ein Motor die Erregung des anderen liefern (Abb. 188). Dies ist um so eher möglich, als bei den im Vollbahnbetrieb praktisch vorkommenden Steigungen von selten über $26 \frac{0}{100}$ die halbe Motorzahl für die Bremsung stets ausreicht.

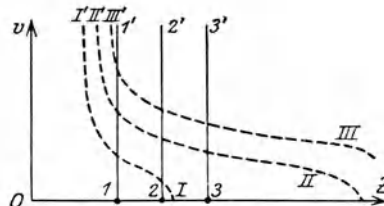
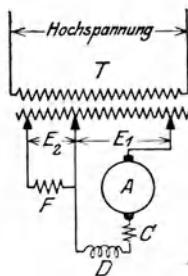


Abb. 191. Nutzbremsschaltung und deren Kennlinien von Behn-Eschenburg (MFO).

Mit einem zweiphasig gewickelten Induktionsgenerator kann die oben gestellte Aufgabe durch eine Einankermaschine gelöst werden, doch wird dieser in seinen Maßen noch größer, weil die Induktionsmaschine durch ihre Polzahl an eine vergleichsweise niedrige Drehzahl gebunden ist (Abb. 190).

Behn-Eschenburg hat 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. 191). Diese Schaltung wird versuchsweise bei den Lokomotiven der Gotthardbahn angewendet.

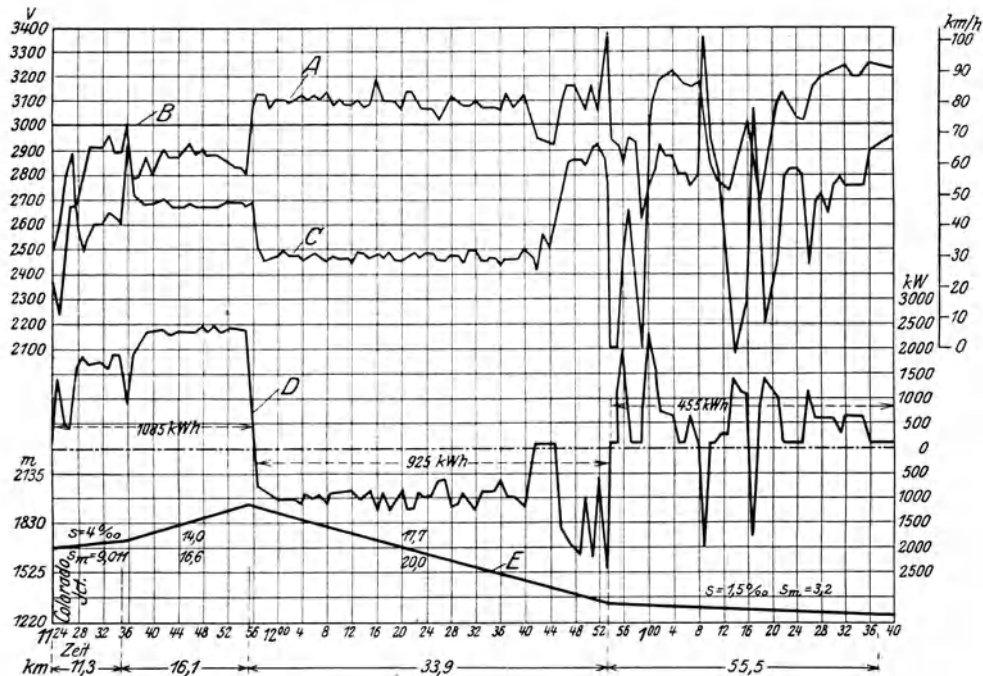


Abb. 192. Stromzeitlinie einer mit Nutzbremzung fahrenden Lokomotive der Ch.M.St.P.-Bahn. Bruttolast 600 t. Zugsgewicht 870 t. Länge der Strecke 116 km. Größtes Gefälle 20 ‰, mittleres Gefälle 17,7 ‰ auf 33,9 km Länge.

A Linienspannung; B Regelspannung; C Geschwindigkeit; D Leistung kW; E Höhenplan.

16. Vergleich der Wirkungsweise der Nutzbremzung 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 gleich verwickelt. Die Hilfsmaschinen sind beim Wechselstrombetrieb jedoch nicht von der Hochspannung gefährdet.

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.

- Adler: Luftgekühlte Bahnmotoren der AEG. EKB 1915, H. 32.
 Adler: Die Ankererwärmung der Bahnmotoren. ETZ 1917, H. 26.
 Adler und Schiebeler: Die Leistungsbewertung der Elektromotoren. ETZ 1920, H. 25.
 Armstrong und Thirlwall: Power consumption of railway motors. GER 1915, Nr. 10.
 Bethge: Der Stromverbrauch bei städtischen Schnellbahnen. EKB 1917, H. 20.
 Bethge: Betrachtung über die Überlegenheit der sich selbst lüftenden Motoren über die gekapselten. EKB 1918, H. 35. AEG-Mitteilungen für Bahnbetriebe 1919. EKB 1919, H. 31.
 Blanc: Dauerleistung, Zeitleistung, Aussetzleistung. ETZ 1922, H. 6.
 Broomall: Unterschied in der Erwärmung der Motoren bei Verschiedenheiten in den Raddurchmessern des Wagens. ERJ 1915, Bd. 46, S. 452. Ref. E.u.M 1916, H. 2.
 Cooper: Ventilierte Bahnmotoren. EJ Okt. 1918, H. 35. Ref. E.u.M 1919.
 Engel: Graphisches Verfahren zur Vorausbestimmung der Erwärmung von Bahnmotoren. EKB 1915, H. 35.
 Fischer-Hinnen: Erwärmung von Maschinen und Transformatoren. E.u.M 1918, H. 18.
 Gut: Ein neues graphisches Verfahren zur Vorausbestimmung der Erwärmung elektrischer Maschinen und Apparate für intermittierende Betriebe einschließlich Bahnen. BSEV 1918, Nr. 2.
 Knorr: Der Fahrtdiagramm. EKB 1920, H. 8.
 Laying: Relation between car operation and power consumption. GER 1915.
 Luke: Heating of railway motors in service and on test floor runs. JFJ 1922, Nr. 3.
 Mattersdorf: Normung und Wartung. VT 1921, Nr. 24.
 Mauermann: Die Stromersparnisse im Fahrbetriebe von Gleichstromanlagen. ETZ 1917, H. 32.
 Müller: Die Arbeitsleistung beim Lokomotivbetrieb. EKB 1916, H. 27.
 Müller-Gerthe: Der Stromverbrauch elektrischer Straßenbahnen. VT 1921, H. 4.
 Neidt: Graphisches Verfahren zur Bestimmung von Fahrgeschwindigkeiten und Vorschaltwiderständen für elektrisch angetriebene Fahrzeuge. ETZ 1899, H. 2.
 Neuschwander: Überwachung des Fahrstromverbrauches bei Straßenbahnen. SBZ 1923, Bd. 82, Nr. 13.
 Pornin: Les économies d'énergie dans les exploitations de chemins de fer électriques. RGE 1923, Bd. XIII, Nr. 10.
 Schermerholm: A light weight railway motor. GER 1916.
 Schreiber: Berechnung des Stromverbrauches elektrischer Bahnen. Stuttgart: Enke.
 Seefehlner: Zeichn. Rechenbehelfe für den Entwurf und den Betrieb elektr. Bahnen. ETZ 1921, H. 9.
 Thormann: Der Energieverbrauch der elektrischen Zugförderung der Berner Alpenbahn. EKB 1916, H. 25. — GC Nov. 1916, S. 352.
 Unger: Die Abmessungen der Einphasenbahnmotoren. ETZ 1920, H. 1.
 Volkers: Berechnung des Wattstundenverbrauches elektrischer Bahnen. ETZ 1901, H. 24.
 Volkers: Unnützer Stromverbrauch bei Straßenbahnen. EKB 1922, H. 13.
 Wichert: Über die Normung der Leistungen von Straßenbahn-, Kleinbahn- und Vollbahnmotoren. ETZ 1921, H. 25.
 Wolff: Verbrauchszähler oder Kontrollapparate für Straßenbahnen. VT 1922, Nr. 46.
 Woods: Die Einwirkung von Belastungsspitzen auf Bahnmotoren. ERJ 1922, Bd. 60, Nr. 9. Ref. E.u.M 1922, H. 50.
 Effect of gear ratio on operating economy. ERJ 1915, Bd. 46. Ref. EKB 1916, H. 2.
 Zur Frage der Leistungsbezeichnung von Straßenbahnmotoren. ETZ 1901, H. 4.
 Die Berechnung der Motorleistung im Bahnbetriebe. Zf.E 1904, H. 30.
 Puissance et capacité thermique des moteurs de traction. LE 4. März 1916.
 Die innere Temperatur von Bahnmotoren als Maß ihrer Leistung. ETZ 1922, H. 37.

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 Fahrpläne, in welchen die Fahrgeschwindigkeit, die Zugkraft und damit die Stromstärke als Funktion der Zeit dargestellt werden.

Grundsätzlich kommen zwei Gesichtspunkte in Betracht:

- a) der Motor muß ohne Schaden für den Stromwende- oder Stromabnahmeapparat oder für seine mechanische Festigkeit diejenigen Stromstärken vertragen, die zur Ausübung der verlangten Zugkräfte nötig sind;
- b) seine Wärmeaufnahmefähigkeit muß 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:

- a) für die Stundenleistung, die eine praktische Grenze für das betriebsmäßig größte Drehmoment bildet, dann
- b) für die Dauerleistung, durch welche derjenige Strommittelwert gegeben ist, den die Triebmaschine im Dauerbetrieb verträgt. Außerdem ist es
- c) 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 Straßen-

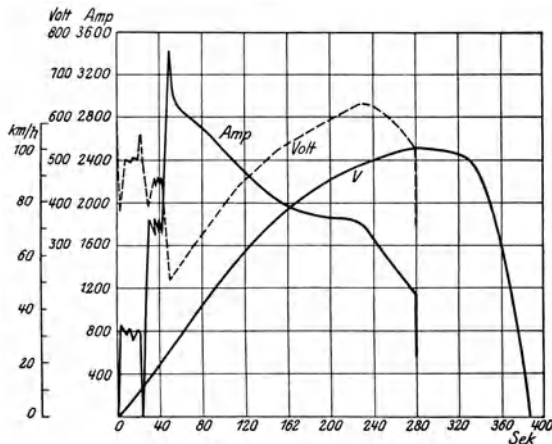


Abb. 193. New York-Zentralbahn. Bewegungsbild einer Wettfahrt zwischen einer elektrischen und einer Dampflokomotive.

	Elektrische Lokomotive	Dampf-Lokomotive
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/sek ²	0,175	0,109

bahnen weisen keinen länger andauernden Beharrungszustand auf. Für die Bemessung des Motors ist daher in erster Linie die sprunghaft einsetzende Anfahrleistung ausschlaggebend. Die verlangten großen Motor-momente führen unter solchen Umständen meistens zu Motordimensionen, welche die erforderliche Wärmekapazität und Dauerleistung aufweisen.

Im Betrieb der Vollbahnen und oft auch bei Industriebahnen, Bergbahnen, kommen Anfahrten vergleichsweise selten vor, für die Beanspruchung der Triebmaschine ist daher die anhaltende Leistung im Beharrungszustand maßgebend.

Für Vollbahnen ist es daher meist zwecklos, die bis in alle Einzelheiten gehenden Fahrlinien zu ermitteln; die Feststellung der mittleren Leistung in charakteristischen Abschnitten genügt im allgemeinen.

Für Stadtbahnen und ähnlich geartete Bahnbetriebe ist eine weitgehende Auswertung der Bewegungsvorgänge (Abb. 193) unerlässlich, ebenso für Straßenbahnen. Bei diesen ist eine mittlere Haltestellenentfernung als Grundlage anzunehmen.

Die Fahrlinien können allerdings erst mit Hilfe der Motorkennlinien (Abb. 194 bis 198) aufgetragen werden, setzen also bereits die getroffene Wahl der Motortype 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 $h > w$. Für w wird ein fester Mittelwert entsprechend der beabsichtigten Geschwindigkeit eingesetzt. Auf allen Strecken, wo $h = 0$ oder $h < w$, ist auch auf der Rückfahrt Arbeit zur Überwindung des Reibungswiderstandes aufzuwenden, und zwar für $h = 0$ die vollen $100\% = w$, sonst im Verhältnis $(w - h) : w$ weniger. Die in Betracht kommenden Teilstrecken sind in diesem Verhältnis zu kürzen.

Auf diese Art berechnet sich die virtuelle Länge der Strecke

$$L + \sum L \frac{w-h}{w} = L_v$$

und der Stromverbrauch je Tonne zur Überwindung der Reibung bei $\eta = 1$ zu

$$\frac{1000 \cdot w \cdot L_v}{366 \cdot 2 \cdot L} = a_r \text{ Wh/tkm}$$

b) Die Heбungsarbeit wird für eine Hin- und Rückfahrt

$$\frac{1000 \cdot \sum h}{366 \cdot 2 \cdot L} = a_g,$$

wobei h den Höhenunterschied der einzelnen Teilstrecken bedeutet.

c) Die Bremsarbeit ist

$$\frac{100 n \cdot v^2}{366 \cdot 2 \cdot L} = a_b.$$

Hier bezeichnet n die Anzahl der Anfahrten.

$$\frac{a_r + a_h + a_b}{\eta} = A$$

ist 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 den gleichen Wirkungsgrad zu nehmen, insbesondere müßte für die Bremsarbeit ein schlechterer eingesetzt werden. Da mit dem Verlust der vollen Bremsarbeit gerechnet wird, in Wirklichkeit aber 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 und der elektrischen Ausrüstung nicht vom arithmetischen Mittelwert, sondern zum Teil vom geometrischen Mittelwert der Stromstärke 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.

Umgekehrt, wenn auf einer gegebenen Strecke der Stromverbrauch mit A Wh/tkm ermittelt wurde, so kann aus dieser Zahl der Mittelwert des gesamten Zugwiderstandes für das Tonnenkilometer errechnet werden, denn es ist

$$A = \frac{w_{\text{mittel}} 1000}{366},$$

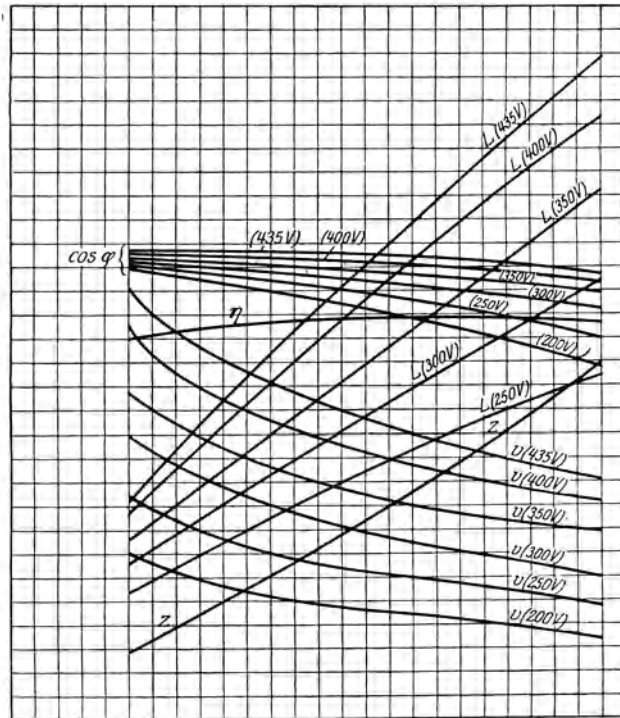


Abb. 194. Kennlinien des 1200 PS-Motors der 1-E-1-Lokomotiven der Lötschbergbahn (MFO).

Z Zugkraft kg; L Leistung PS; V Geschwindigkeit km/h; η Wirkungsgrad %.

daher

$$w_{\text{mittl}} = 0,366 A,$$

wobei der Wirkungsgrad der elektromechanischen Umformung noch nicht berücksichtigt ist.

Es sei dieser η ‰, dann wird

$$w_{\text{mittl}} = 0,366 A \eta.$$

Die mittlere Leistung in PS je t ist

$$L = \frac{w_{\text{mittl}} v}{270};$$

den obigen Wert von w_{mittl} eingesetzt, findet sich die für die Dauerleistung in PS des Motors maßgebende Beanspruchung je Tonne 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 Verbrauchszahlen einiger Bahnen angeführt.

Stromverbrauch elektrischer Bahnen.

(Gemessen an den Speisepunkten.)

Bahnanlage	Wh/tkm	Stromart
Straßenbahnen	40—60	G.S. 500—750 V
Überlandbahnen:		
Liverpool—Southport	30,0	G.S. 600 V
" Verschubdienst	70,0	G.S. 600 V
Milano—Varese	29,0	G.S. 650 V
Montreux—Berner Oberland (Gebirgsbahn)	124,0	G.S. 750 V
New York—State Railway	68,4	G.S. 600 V
Preuß. Staatsbahnen, Speicherwagen	20,0	G.S.
Rhätische Bahn	50,7	W.S. 11000 V 15 ~
Stubaitalbahn (Gebirgsbahn)	70,0	W.S. 2500 V 45 ~
Ville-Franche—Bourg Madame	80,0	G.S. 800 V
Stadtbahnen:		
Baltimore—Ohio	70,0	G.S. 600 V
Hamburg—Blankenese	34,5	W.S. 6000 V 25 ~
London & North Western	40,3	G.S. 575 V
London & South Western	40,0	G.S. 600 V
Manchester—Bury	60,0	G.S. 1200 V
New Havenbahn	45,5	G.S. 600 V und W.S. 11000 V 25 ~
Paris—Nord-Süd	68,8	G.S. 600 V
Vollbahnen:		
Chicago—Milw. & St. Paul-Bahn	22,7	G.S. 3000 V (Nutzbremsung Ersp. etwa 15 ‰)
Italienische Staatsbahnen, Valtellina	32,0	D.S. 3000 V 15 ~
" " Giovi	22,3	mit Nutzbremsung
	29,0	ohne "
Bern—Schierzlingen	35,0	} W.S. 15000 V 16 ² / ₃ ~
Gotthard (Erstfeld—Biasca)	48,0	
Lötschbergbahn, Teilstrecke: Spiez—Frutigen, Triebwagen	24,0	
Lötschbergbahn, Lokomotiven (am Fahrzeug ge- messen)	21,0	
Lötschbergbahn, Durchschnitt 1913/1920	51,0	
Preuß. Staatsb. Dessau-Bitterfeld:		
Schnell- und Personenzüge	30,5	
Güterzüge	17,4	

New Haven:			
Lokalzüge	60,0	} W.S. 11000 V 25 ~	
Schnellzüge	34,0		
Güterzüge	29,0		
Güterzüge	55,0		
Lokalgüterzüge	55,0		
Riksgränsen	21,0	W.S. 15000 V	
„ am Fahrzeug	13,4		
Simplon	34,0	D.S. 3000 V 15 ~	
Speicherwagen Österr. Bundesbahnen	23,5	G.S. 500 V	

3. Die Erwärmung und die Abkühlung; ihre Gesetze und Berechnung¹⁾. Die Zuverlässigkeit eines Belastungsfalles, der durch das Belastungsdiagramm (Belastung in Abhängigkeit von der Zeit) gegeben 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 durch die Verluste erzeugten Wärmemenge einerseits und der unter Temperaturzuwachs aufgenommenen und infolge des Temperaturgefälles an die Umgebung abgegebenen Wärmemenge andererseits gegeben.

Die in Wärme umgesetzten Verluste seien W Watt; 4189 W bedeuten die Entwicklung einer WE je Sekunde. Die im Zeitelement dt erzeugte Wärme ist

$$W dt \text{ W-sek (Joule) (1)}$$

Die von einem Körper des Gewichtes G kg und der spezifischen Wärme c W-sek (Joule) je kg und Grad Celsius unter dem Temperaturzuwachs dT aufgenommene Wärme ist

$$G c dT = A dT \text{ W-sek (Joule), (2)}$$

wobei

$$A = G c$$

die Wärmekapazität der Maschine (W-sek je Grad Celsius) bezeichnet.

Die spezifische Wärme c beträgt:

für Kupfer	0,094	WE/kg, °C, d. i. 390	Wsek/kg, °C
„ Aluminium	0,215	„ „ „ 900	„ „
„ Eisen	0,115	„ „ „ 480	„ „
„ Isoliermaterialien	0,3 bis 0,6	„ „ „ 1200 bis 2500	„ „
„ Öl	0,4	„ „ „ 1700	„ „

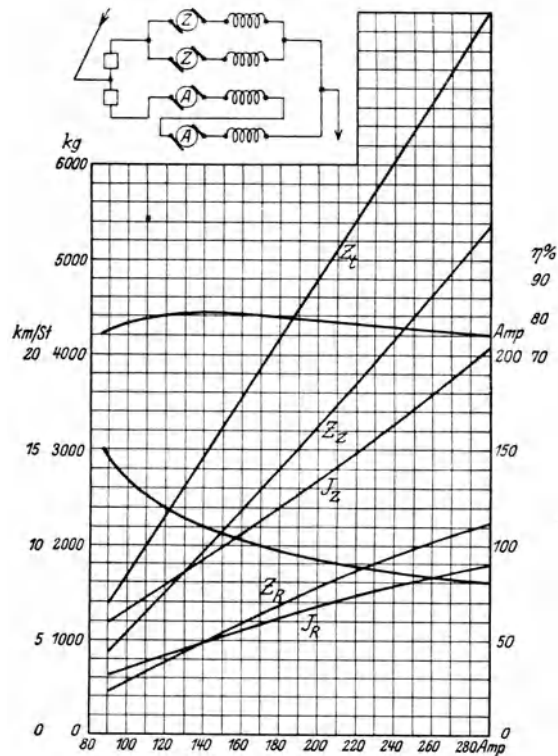


Abb. 195. Triebwagen für gemischten Betrieb (Reibung u. Zahnstange) Monthey-Champérybahn. Schaltprinzip und Kennlinien des Fahrzeuges in Abhängigkeit vom gesamten Strom.

Z_R Zugkraft; J_R Stromstärke des Reibungsmotors; Z_Z und J_Z dasselbe für den Zahnradmotor; Z_i Zugkraft total am Radumfang; η Wirkungsgrad %.

¹⁾ Bearbeitet unter Mitwirkung von Dr. A. Winkler, Wien.

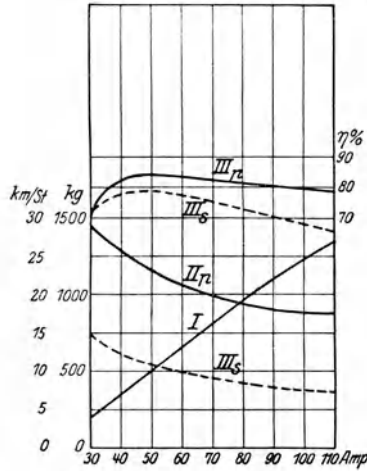


Abb. 196. Kennlinien des Motors für den Reibungsantrieb der Motorwagen der Monthey-Champérybahn.

Regelleistung 75 PS
 Betriebsspannung 750 V
 Umlauf je min. 500
 Übersetzung 1 : 4,5
 Raddurchmesser 885 mm

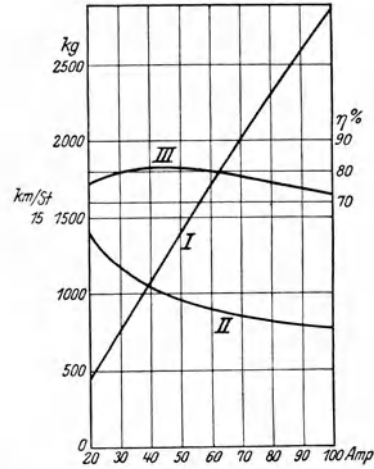


Abb. 197. Kennlinien des Zahnradmotors der Triebwagen der Monthey-Champérybahn.

Regelleistung 75 PS
 Betriebsspannung 750 V
 Umlauf je min. 500
 Übersetzung 1 : 8,15
 Triebzahnradradius 732 mm

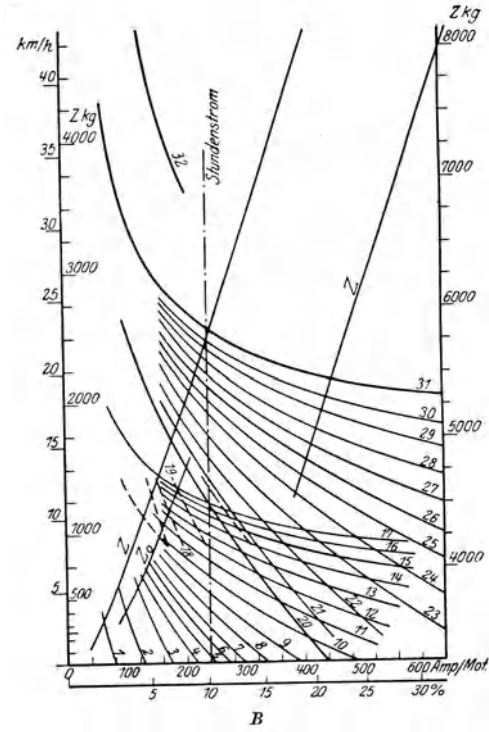
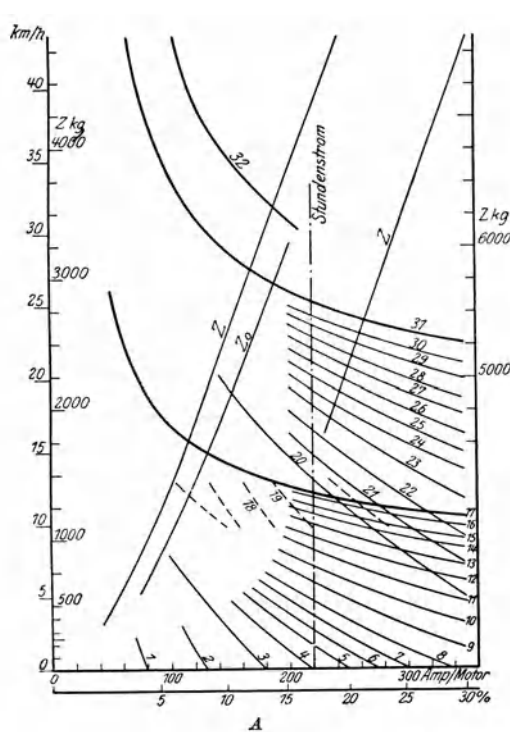


Abb. 198. Kennlinien eines 450 PS — 1500 V Gleichstrom-Untergestellmotors der Lokomotiven der ersten Reihe der Ch.M. & St.P.-Bahn (GEC) $Z = f(J)$ und $(v = f(J))$.

Die %-Skala gibt das Maß der Ausnützung der Reibung.

A Kennlinien für die Güterzuglokomotiven. Zahnradübersetzung 1 : 4,56. Zugkraft je t Achsdruck bei der Stundenleistung \sim 170 kg.

B Kennlinien für die Personenzuglokomotiven. Zahnradübersetzung 1 : 2,45. Zugkraft je t Achsdruck bei der Stundenleistung je 100 kg.

Bezogen auf das Volumen, liegen die Werte für alle Baustoffe elektrischer Maschinen nicht weit auseinander:

für Kupfer	3500	Wsek/dm ³ , °C
" Aluminium	2400	" "
" Eisen	3700	" "
" Isoliermaterialien	2500	" "
" Öl	1500	" "

(für Kupfer und Eisen angenähert: 1 Wh/dm³, °C).

Die von der Oberfläche O 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, $\lambda O(1 + \beta \sqrt{v}) T W$; somit im Zeitelement dt :

$$\lambda O(1 + \beta \sqrt{v}) T dt = A T dt \text{ Wsek (Joule), (3)}$$

wobei

$$A = \lambda O(1 + \beta \sqrt{v})$$

den spezifischen Wärmeverlust der Maschine (W je °C) bedeutet.

Die Koeffizienten λ und β sind von nachstehender Größenordnung (Fischer-Hinnen):

Trockentransformatoren (O = äußere Oberfläche) . . .	$\lambda = 0,1$	W/dm ² , °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	$\lambda = 4,0$	" "	" $\beta = 3$
Blankes Eisen gegen Wasser	$\lambda = 1,0$	" "	" $\beta = 3$
Blankes Eisen gegen Öl	$\lambda = 0,7$	" "	" $\beta = 3$
Widerstände gegen Öl	$\lambda = 2,0$	" "	" $\beta = 0$
Widerstände gegen Luft	$\lambda = 0,1$	" "	" $\beta = 0$

Unter Einführung vorstehender Begriffe lautet die an erster Stelle aufgestellte thermische Zustandsgleichung formelmäßig:

$$A dT = W dt - A T dt \text{ (4a)}$$

Mit anderen Worten: der Wärmeinhalt der Maschine ist jederzeit gleich der zugeführten oder durch die Umformungsverluste erzeugten Wärmemenge, abzüglich der an die Umgebung abgegebenen.

Die vorstehende Gleichung ist bezüglich t als unabhängiger und T als abhängiger Variabler eine lineare Differentialgleichung erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{A}{A} T = \frac{W}{A} \text{ (4b)}$$

Die allgemeine Lösung ist das Gesetz der allmählichen Aufzehrung des Wärmegefälles (Newton):

$$T = T_a e^{-\frac{t}{\tau}} + T_e \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \text{ (5)}$$

Die zugehörige Kurve nimmt, je nachdem ob $T_a < T_e$ oder $T_a > T_e$ ist, den in Abb. 199 und 200 dargestellten Verlauf und kann dementsprechend in der Form

$$T - T_a = (T_e - T_a) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \dots \dots \dots (5a)$$

bzw.

$$T - T_e = (T_a - T_e) e^{-\frac{t}{\tau}} \dots \dots \dots (5b)$$

geschrieben werden. Für alle Temperaturkurven kennzeichnend ist die vom Ausgangszustand und jedem beliebigen Zwischenzustand asymptotische Annäherung an den Endzustand nach dem Gesetz der konstanten Subtangente.

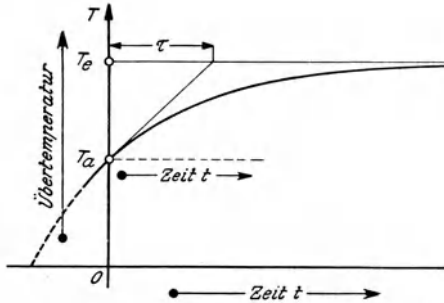


Abb. 199. Logarithmische Erwärmungslinie, Anfangstemperatur allgemein T_a .

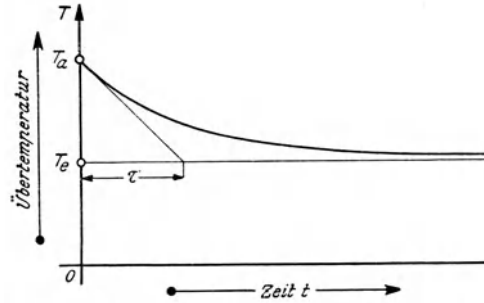


Abb. 200. Logarithmische Abkühlungslinie, Endtemperatur $T_e > 0$.

Zwei besondere Lösungen sind (Abb. 201):

1. die von der Ausgangstemperatur (Übertemperatur) $T_a = 0$ ausgehende, zur Endtemperatur (Übertemperatur) des Beharrungszustandes T_e führende Erwärmungskurve

$$T = T_e \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \dots \dots \dots (6)$$

2. die von der Ausgangstemperatur T_a ausgehende, zur Endtemperatur $T_e = 0$ führende Abkühlungskurve für verlustlosen Leerlauf:

$$T = T_a e^{-\frac{t}{\tau}} \dots \dots \dots (7)$$

Hierbei bezeichnet:

T die Übertemperatur $^{\circ}\text{C}$ zur Zeit t ,

T_a die Ausgangstemperatur (Übertemperatur) zur Zeit $t = 0$,

$T_e = \frac{W}{A}$ die Endtemperatur (Übertemperatur) zur Zeit $t = \infty$,

W die für die Erwärmung maßgebenden Verluste (W),

$A = Gc$ die Wärmekapazität der Maschine (Wsek je $^{\circ}\text{C}$),

$A = \lambda O (1 + \beta \sqrt{v})$ den spezifischen Wärmeverlust der Maschine (W je $^{\circ}\text{C}$),

$\tau = \frac{A}{W}$ die thermische Zeitkonstante der Maschine,

$e = 2,718$ die Basis der natürlichen Logarithmen.

b) Eigenschaften der Temperaturkurven. Folgt man dem Verlauf einer Erwärmungskurve $T = T_e \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$ (Abb. 201), so kann man an ihr folgende Eigenschaften feststellen:

Zu Beginn der Erwärmung ist für den Temperaturanstieg die Wärmekapazität A der Maschine maßgebend; die Wärmeabgabe tritt dagegen zurück ($\lambda T dt = 0$ für $T \cong 0$); als Maß dient der Temperaturanstieg in der Zeiteinheit (Neigung der Ursprungstangente der Erwärmungskurve), dessen Wert sich für $t = 0$ zu

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{A} = \operatorname{tg} \alpha \dots \dots (8)$$

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. 4 a wird

$$GcdT = 0$$

und

$$W = \lambda O(1 + \beta \sqrt{v}) T_e,$$

somit

$$T_e = \frac{W}{\lambda O(1 + \beta \sqrt{v})} = \frac{W}{A} \dots \dots \dots (9)$$

Diese Gleichung dient zur Berechnung 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 wurden; sie gibt 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; dementsprechend ist die Endtemperatur

$$T_e = \text{konst. } W$$

eine Maßgröße für die Belastung der Maschine.

Eine besondere physikalische Bedeutung hat der Zeitabschnitt τ , die thermische Zeitkonstante. Sie bedeutet jene Zeit, welche ohne Wärmeverluste bei W Watt Wärmeerzeugung benötigt wird, um die Endtemperatur T_e zu erreichen. In diesem Grenzfall geht die Gl. 4 a, da annahmegemäß

$$\lambda O(1 + \beta \sqrt{v}) T dt = 0$$

ist, in die Form

$$GcdT = Wdt \text{ über; für } dT = T_e \text{ und } dt = \tau,$$

wird

$$\tau = \frac{GcT_e}{W} \dots \dots \dots (10)$$

oder, T_e aus Gl. 10 eingesetzt,

$$\tau = \frac{Gc}{\lambda O(1 + \beta \sqrt{v})} \dots \dots \dots (10a)$$

τ bedeutet somit jene Zeit, die bei gegebener Belastung und reiner Wärmeaufnahme ohne Wärmeverlust erforderlich ist, um die Endtemperatur T_e zu erreichen.

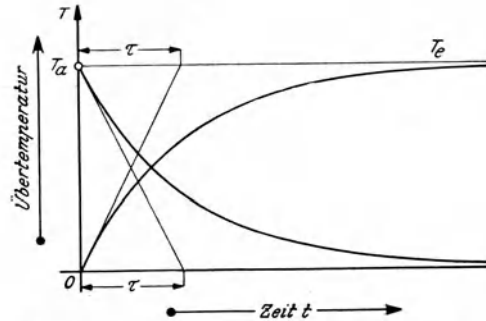


Abb. 201. Logarithmische Linie der Erwärmung für $T_a = 0$ und der Abkühlung für $T_e = 0$.

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 als eine kleine Type. 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.

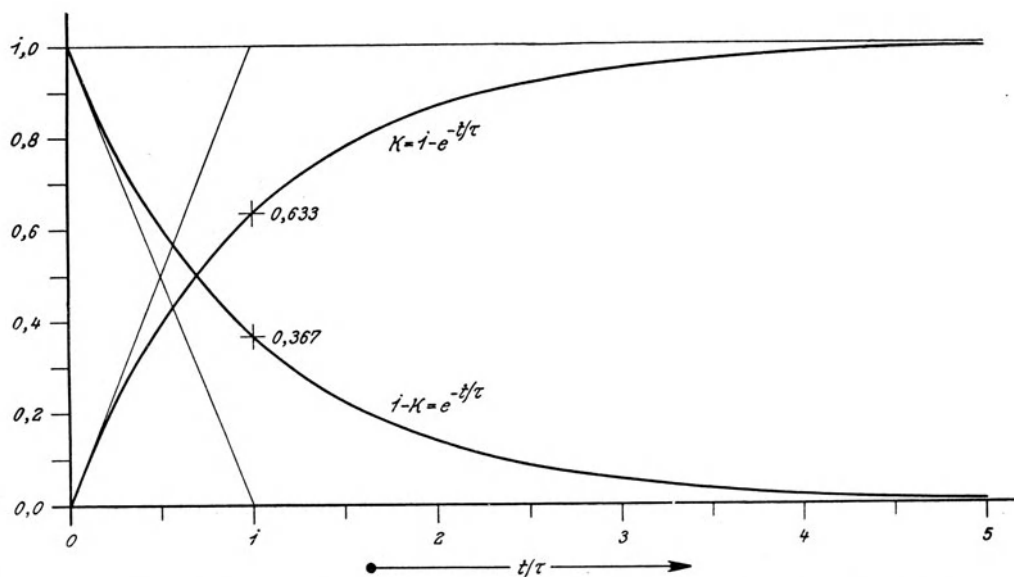


Abb. 202. Zahlenwerte der logarithmischen Linien der Erwärmung und Abkühlung für $T = 0$ bzw. $T_e = 0$.

Umgekehrt wird eine bestimmte, durch ihre Wärmekapazität $A = Gc$ gekennzeichnete Maschine in ihrem thermischen Verhalten um so günstiger abschneiden, 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 Δ kann aus Gl. 9 für eine Dauerbelastung berechnet werden, wenn die maßgebenden Verluste erhoben wurden.

Für eine gegebene Drehzahl ist die thermische Zeitkonstante unabhängig von der Belastung, demnach eine Eigentümlichkeit der Maschine.

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. 202 für die Zahlenwerte der Funktion

$$k = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \dots \dots \dots (11a)$$

und

$$1 - k = e^{-\frac{t}{\tau}} \dots \dots \dots (11b)$$

Die Erwärmungskurve erreicht zur Zeit $t = \tau$ eine Temperatur von $63,3\%$ des vollen Wertes der Endtemperatur, 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 4τ kann mit der genannten Annäherung (95 bis 98%) als Dauerbelastung gelten; Probeläufe werden daher im allgemeinen über diesen Zeitraum vorzunehmen sein.

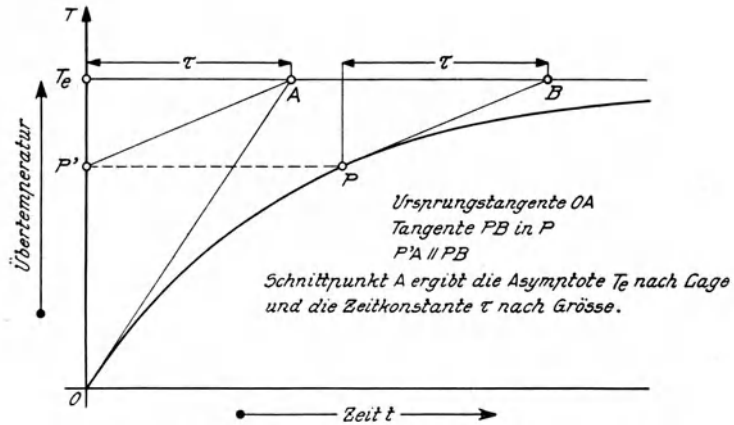


Abb. 203. Geometrische Eigenschaften der logarithmischen Erwärmungslinie.

Eine geometrische Eigenschaft der logarithmischen Linie veranschaulichen Abb. 203 und 204. 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. 205).

Gl. 6 lautet logarithmisch

$$\lg T_e - \lg (T_e - T) = \frac{t}{\tau} \lg e.$$

Setzt man

$$\lg T_e = a; \lg (T_e - T) = y, \quad t = x \quad \text{und} \quad \frac{\lg e}{\tau} = b,$$

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, Abszissen normal geteilt) wird die Erwärmungs-(Abkühlungs-)kurve daher 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; diese können auch nicht genau vorausberechnet 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 das logarithmische

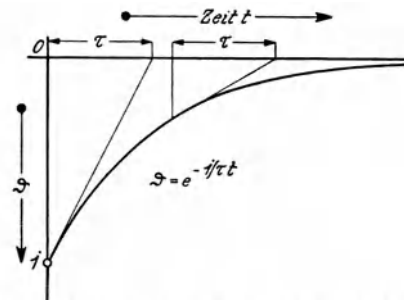


Abb. 204. Geometrische Eigenschaften der logarithmischen Erwärmungslinie. Ermittlung von T_e und τ aus einem gegebenen Teilstück.

Gesetz zutrifft, läßt sich daran erkennen, daß die Kurven, auf halblogarithmisch geteiltem Papier aufgetragen, 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.

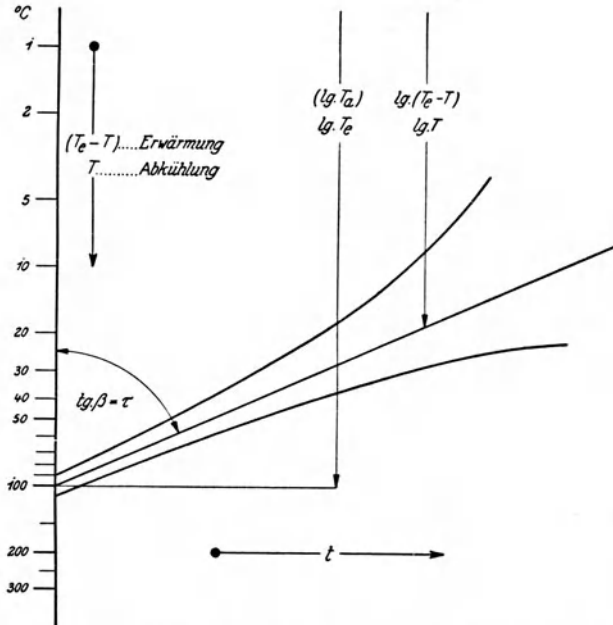


Abb. 205. Darstellung der logarithmischen Linie im halblogarithmischen rechtwinkligen Bezugssystem. Abszissen regulär, Ordinaten logarithmisch geteilt. Divergenz der Linie für unrichtiges T_a bzw. T_e .

Die Beobachtungswerte einer Erwärmungskurve enthalten die absoluten Zahlenwerte der beobachteten Temperaturen in °C, wogegen die thermische Zustandsgleichung für die Erwärmung nur die Differenzwerte in bezug auf die hier noch unbekannte, für die betreffende Belastung kennzeichnende Endtemperatur T_e enthält. Um daher die Beobachtungswerte in einem halblogarithmischen System richtig auftragen zu können, müßte zunächst T_e auf anderem Wege berechnet werden. Diese Rechnung würde der Feststellung, ob die Erwärmungskurve dem logarithmischen Gesetz folgt, vorgreifen. 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, da die logarithmische Skalenteilung nicht gleichmäßig ist (Abb. 205).

Unrichtig aufgetragen, divergieren die eingetragenen Beobachtungswerte in bezug auf die dem unbekanntem 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 gegen die Senkrechte im halblogarithmischen System — $\text{tg } \beta$ — ein Maß für die Zeitkonstante bildet.

Aus Gl. 6 der Abkühlungslinie folgt, daß

$$\tau = \frac{t \lg e}{\lg T_a - \lg T}$$

Der bildlichen Darstellung im halblogarithmischen Bezugssystem ist zu entnehmen, daß

$$\text{tg } \beta = \frac{tb}{(\lg T_a - \lg T) a}$$

Ebenso gilt 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 folgt

$$\tau = \frac{a \lg e}{b} \operatorname{tg} \beta = \text{konst. } \operatorname{tg} \beta,$$

wobei

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 Bereiche 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 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 auch hier Gültigkeit behält.

Auf Grund dieser Annahme können aus Gl. 5 die ideellen Endtemperaturen

$$T_e = \frac{T}{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

berechnet werden.

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, so 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, so kann man sich einer zur allgemeinen Lösung der Temperaturgleichungen geeigneten Verhältnis-Rechentafel bedienen.

Mit Hilfe dieser Rechentafel kann man unter anderem τ ohne Kenntnis von T bestimmen, wenn die Temperaturen in drei Zeitpunkten, die gleichgroßen Zeitabschnitten (t) entsprechen, bekannt sind.

Dies wird z. B. für die kurzzeitigen Belastungen ($\frac{1}{2}$ 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 folgt

$$\frac{T_e - T_2}{T_e - T_1} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}},$$

andererseits

$$T_2 - T_1 = (T_e - T_1) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right)$$

$$T_3 - T_2 = (T_e - T_2) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right),$$

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:

$$\begin{aligned} \text{für } t_1 = 0 \quad T_1 = 0, \quad \text{für } t_2 = \frac{1}{3} \text{ h}, \quad T_2 \quad \text{und} \\ \text{für } t_3 = 1 \text{ h} \quad T_3 = 75^\circ, \end{aligned}$$

woraus τ gefunden werden kann.

Die andere, mit der Belastung veränderliche Kennzahl der Maschine, die Endtemperatur T_e , berechnet sich wie folgt:

$$\lg T_e - \lg(T_e - T_1) = \frac{t_1 \lg e}{\tau},$$

oder

$$\lg T_e - \lg(T_e - T_2) = \frac{t_2 \lg e}{\tau},$$

hieraus

$$T_e = \frac{T_2^2 - T_1 T_2}{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_2)}$$

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

$$\lg e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = \lg \frac{T_2}{T_1},$$

und

$$\lg T_1 - \lg T_2 = \lg e \cdot \frac{\Delta t}{\tau}.$$

d) Vereinigung der thermischen und elektromechanischen Charakteristik. Mit Hilfe der hier geschilderten Verfahren und Behelfe wird es möglich sein,

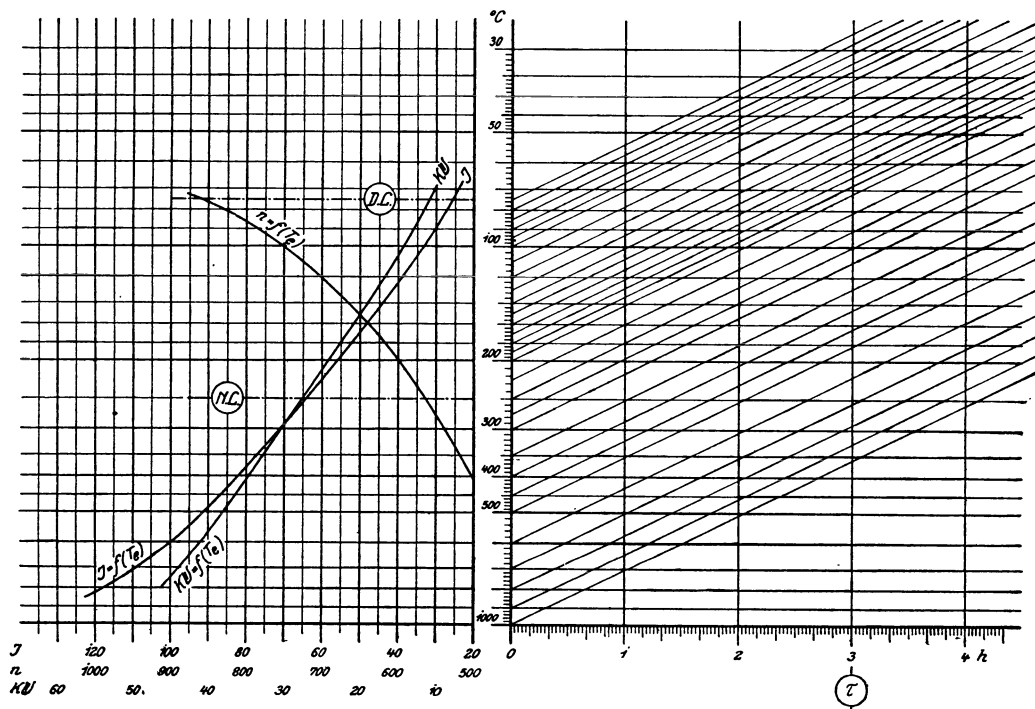


Abb. 206. Thermische und elektromechanische Kennlinien eines Gleichstrom-Bahnmotors.
 Bauart: geschlossen, Gehäuse einteilig. Leistung: normal (NL) 26,5 kW, dauernd (DL) 11,0 kW. Spannung: 500 V. Zeitkonstante: ≈ 3 h.

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.

Das gleiche gilt bezüglich der Zeitkonstanten und man wird feststellen können, ob diese auch für verschiedene Belastungen mit einem unveränderlichen Zahlenwert in die weiteren Rechnungen eingeführt werden kann.

Wählt man zu der Darstellung der Stromstärke (J), der Zugkraft (Z), der Drehzahl (n) und der Zeitkonstanten τ in Abhängigkeit von T_e das gleiche halblogarithmische Bezugssystem mit gemeinsamer logarithmischer Teilung der Ordinate für die Temperaturen, das für die Temperaturkurven verwendet wurde, so erhält man zwar im Vergleich zu der üblichen elektromechanischen Charakteristik verzerrte Linien, erreicht dafür aber

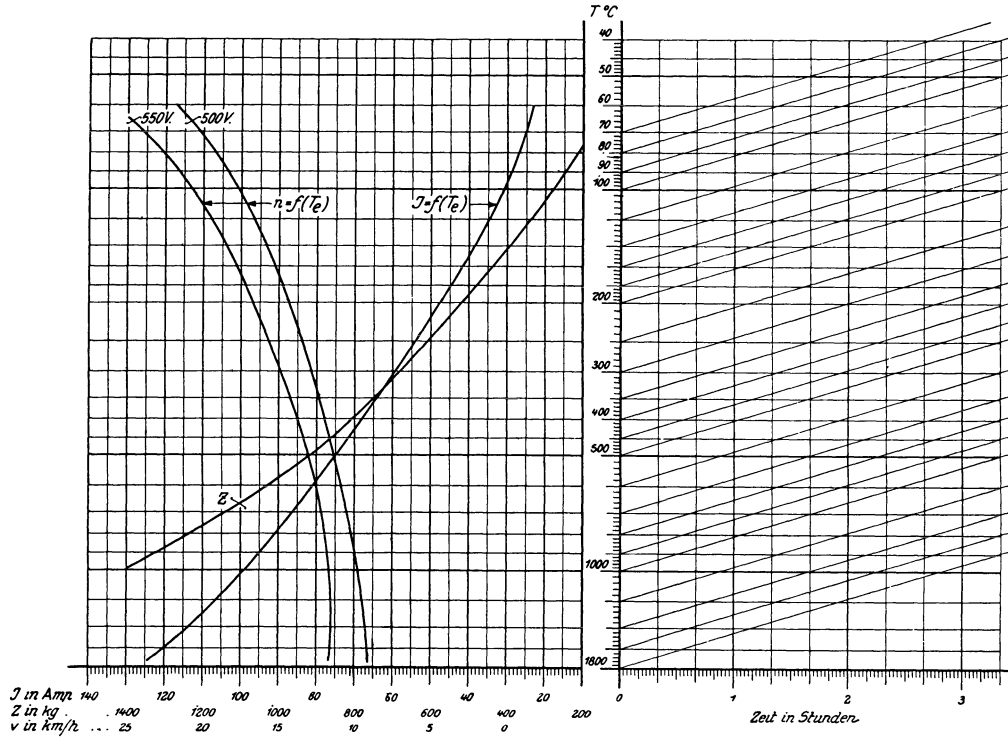


Abb. 207. Thermisch-elektromechanische Kennlinien eines Gleichstrom-Bahnmotors.

Stundenleistung	40 PS
Stundenstromstärke	65 A
Zeitkonstante	4,8 h

den Vorteil, daß jeder Belastung gleich die durch sie verursachte Erwärmung gegenübergestellt werden kann. Die Abbildungen 206 bis 209 geben einige Beispiele für diese erstmalig vom Verfasser angegebene vereinigte Darstellungsart der thermischen und elektromechanischen Charakteristiken.

In der Netztafel $T_e = f(t)$ können die einer bestimmten Temperaturgrenze entsprechenden Zeitwerte für die verschiedenen Belastungen durch eine Kurve kenntlich gemacht werden, die sich der Temperaturgeraden für die Dauerleistung asymptotisch nähert. Die Kurve für die laut Verbandsvorschriften zulässige Höchsttemperatur von 75° grenzt dasjenige Gebiet der Netztafel ab, welches alle betriebsmäßig überhaupt zulässigen Werte enthält; denn Belastungszeiten, die mit irgendeiner Belastung zu höheren Temperaturen führen, sind eben unzulässig.

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. 208), 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 Wert T_{e1} mit der Neigung β entsprechend τ , 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 $L_3 = 0$, so ist $T_a = T_2$; die zugehörige Temperaturlinie gibt in ihrer Ordinate am Ende der Zeit t_3 unmittelbar die erreichte Temperatur T_3 an; usw.

Wenn umgekehrt die Frage zu beantworten ist, welche Belastung eine gegebene Maschine innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen verträgt, so ist die Antwort der Charakteristik ohne weiteres zu entnehmen, vorausgesetzt, daß 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 Ordinaten-skala denjenigen Bereich auf, 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 eingehen 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 und in

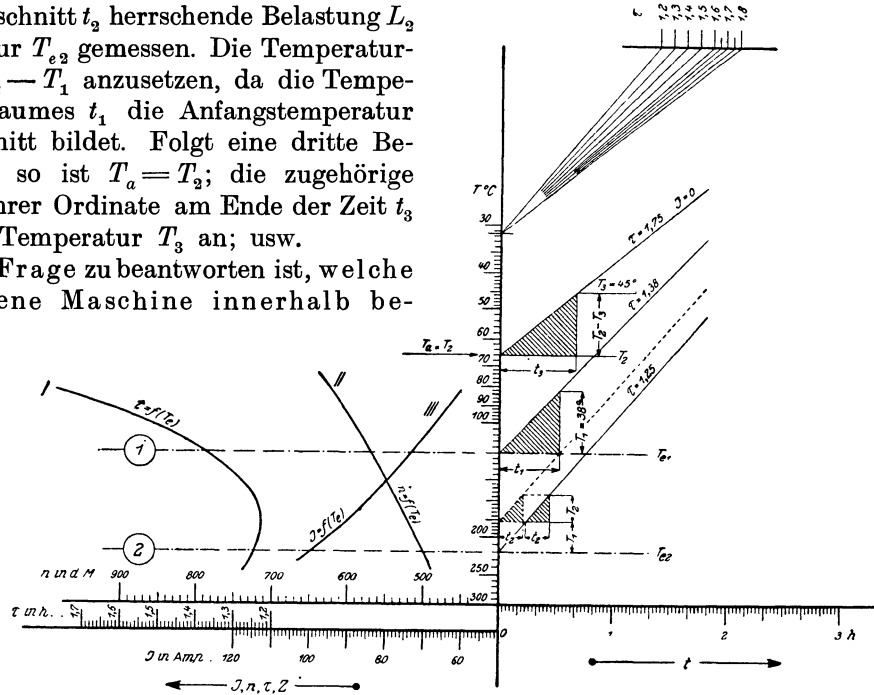


Abb. 208. Darstellung des Verfahrens zur Ermittlung einer Erwärmungskurve für wechselnde Belastung und mit veränderlicher Zeitkonstante.

Beispiel:

$J_1 = 73,5 \text{ A}$	$t_1 = 32'$	$\tau = 1,38 \text{ h}$	$T_{e1} = 120^\circ \text{ C}$	$T_2 = 66^\circ \text{ C}$
$J_2 = 100,0 \text{ „}$	$t_2 = 13'$	$\tau = 1,28 \text{ „}$	$T_{e2} = 220^\circ \text{ „}$	$T_1 + T_2 = 66^\circ \text{ „}$
$J_3 = 0,0 \text{ „}$	$t_3 = 40'$	$\tau = 1,75 \text{ „}$	$T_a = 66^\circ \text{ „}$	$T_3 = 45^\circ \text{ „}$

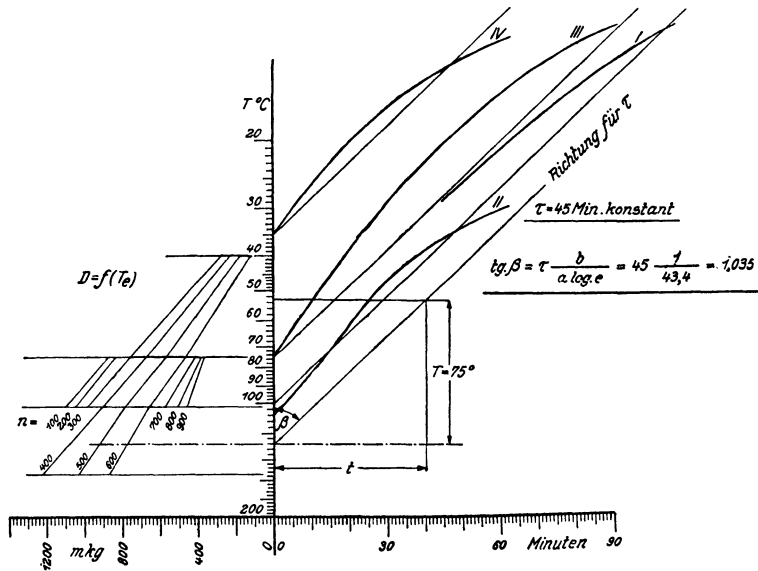


Abb. 209. Thermische und elektromechanische Kennlinien eines $\sim 600 \text{ PS } (16\frac{2}{3}) \sim$ Wechselstrom-Bahnmotors mit künstlicher Kühlung.

Drehmomente (D) in Abhängigkeit von der Endtemperatur T_e . $\tau = 45 \text{ min}$.
Erwärmungslinien für

- I. 600 m/kg Belastung bei 550 Umdr./min.
- II. 780 „ „ „ 550 „
- III. 0 „ „ „ 550 „
- IV. 407 „ „ „ 550 „

welchem Zeitpunkt der Eintritt der höchsten Temperatur zu gewärtigen ist. Diesem Punkt mißt man vorweg die zugelassene Höchsttemperatur T_n 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.

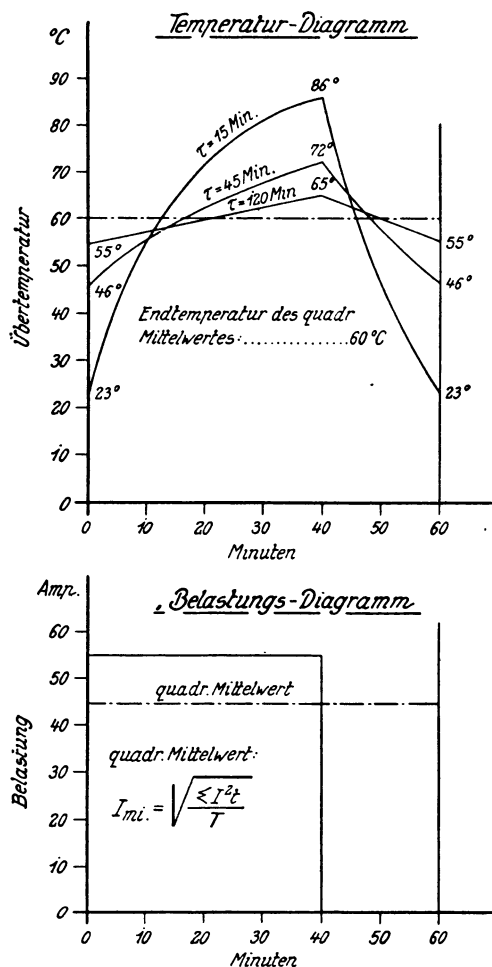


Abb. 210. Darstellung der Abhängigkeit der Höchsttemperaturen von der Zeitkonstante für unveränderlichen geometrischen Mittelwert.

Ist die Temperatur am Ende der Betriebsperiode höher als die eben festgestellte Anfangstemperatur, so kann kurzerhand 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 Eigenschaften der Maschinen. Die thermische Zeitkonstante ist eine Eigentümlichkeit der Maschine. Sie ist für gegebene Belastungsfälle zeitlich oft nicht streng unveränderlich, weil die Einwirkung der verschiedenartig beanspruchten Teile der Maschine diesen den Charakter eines homogenen Körpers nimmt. Immerhin sind die Abweichungen in den Erwärmungskurven von der Exponentiallinie im 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 λ 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 Motor-kühlung kommt auch in der Größenordnung der Zeitkonstante und damit auch in 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 verschieden geartete Gruppen.

Die eine Gruppe bilden die gekapselten, nicht besonders gekühlten Motoren, die durch eine große thermische Trägheit gekennzeichnet sind. Diese weisen vergleichsweise hohe Werte ($3-6^h$) für die Zeitkonstante auf.

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 ermitteln. Dieser quadratische Mittelwert der Strom-(Drehmoment)-Zeitkurve über einen Zeitabschnitt wird hinsichtlich der Verlustarbeit als 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. 210 stellt für einen einfachen Fall aussetzenden Betriebes den Temperaturverlauf von Maschinen und Apparaten bei verschiedenen Werten der Zeitkonstanten dar, welche mittelst des quadratischen Mittelwertes für eine Endtemperatur von 60°C berechnet wurden. Der Wert $\tau = 120$ Min. gilt für geschlossene Bahn- oder Kranmotoren, $\tau = 45$ Min. für stark ventilerte Maschinen (Turbogeneratoren und -motoren, stark ventilerte, schnell laufende Lokomotivmotoren), $\tau = 15$ Min. für Apparate und Kabel. Der Temperaturverlauf folgt dem Belastungswechsel um so rascher, je kleiner die Zeitkonstante (die Wärmekapazität) ist und verläuft um so träger, je größer die letztere ist.

Das Verfahren des quadratischen Mittelwertes erscheint hiernach für geschlossene Gleichstrom-Bahn- und Kranmotoren mit großer Zeitkonstanter und in kurzen Zeiträumen wiederkehrenden Belastungs- und 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. 211). Die

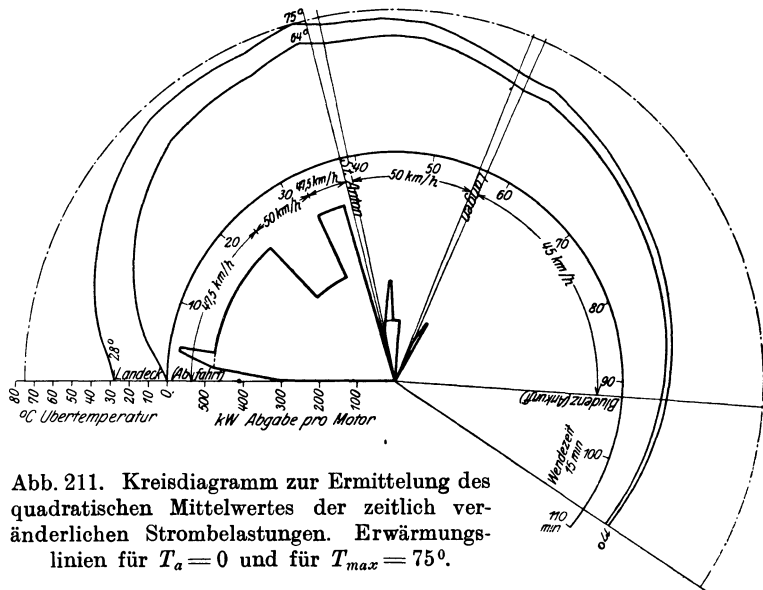


Abb. 211. Kreisdiagramm zur Ermittlung des quadratischen Mittelwertes der zeitlich veränderlichen Strombelastungen. Erwärmungslinien für $T_a = 0$ und für $T_{max} = 75^{\circ}$.

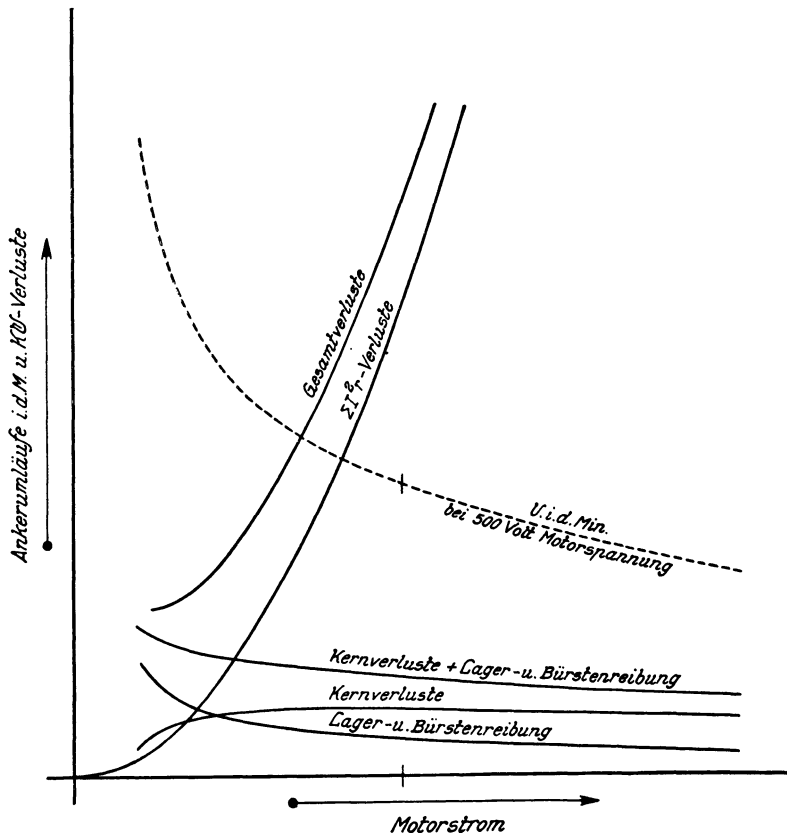


Abb. 212. Verluste eines geschlossenen Gleichstrom-Bahnmotors von 36 PS/h Regelleistung.

Winkelteilung ist ein Maß für die Zeit. Durch Planimetrieren der von der Belastungslinie umschlossenen Fläche erhält man den Halbmesser des auf gleichen Zeitabschnitt (Zentriwinkel) bezogenen, flächengleichen 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.

In die zweite Gruppe sind Maschinen zu zählen, die dank der angewandten wirksamen Kühlung eine vergleichsweise kleine Zeitkonstante aufweisen, daher

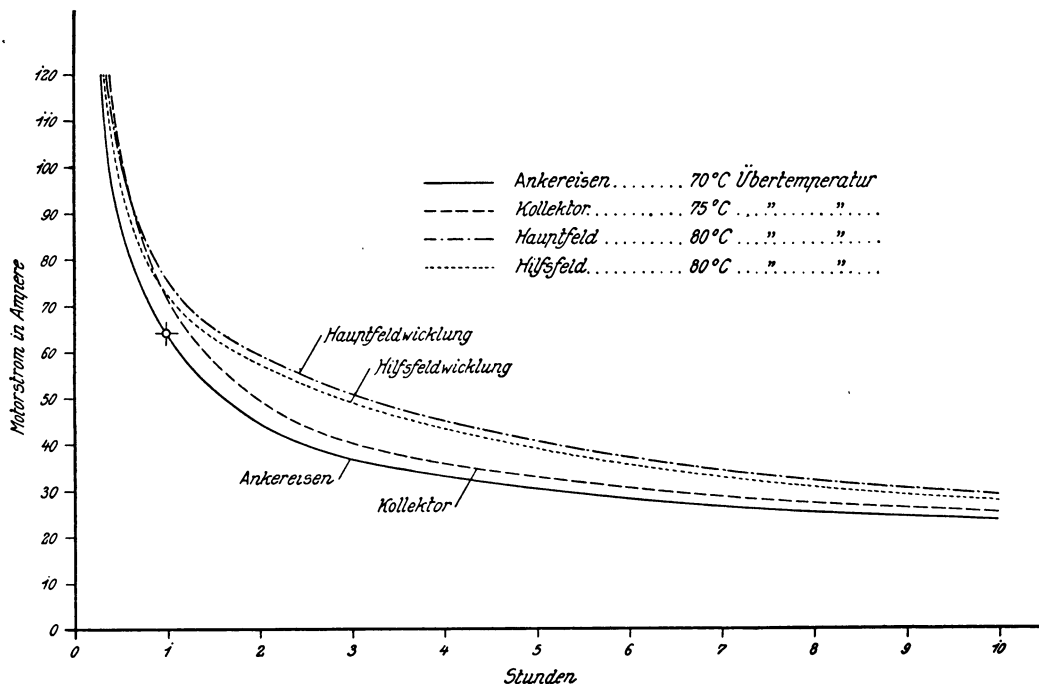


Abb. 213. Thermische Charakteristik eines geschlossenen 36 PS/h-Gleichstrom-Bahnmotors.

in ihrer Temperaturänderung rasch dem kurzzeitigen Belastungswechsel folgen. Diese Bauart, gleichgültig ob Eigenkühlung oder eine von der Motordrehzahl unabhängige Fremdbelüftung vorgesehen wird, weist Zeitkonstante von der Größenordnung $\tau = 40 - 90$ Min. auf.

Bei Fremdlüftung bleibt τ unabhängig von der Belastung, wogegen bei den mit Selbstkühlung laufenden Motoren eine Abhängigkeit von der Belastung (Drehzahl) 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. 212 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. 213) läßt die bessere Kühlung von Ankereisen und Kollektor gegenüber den Feldwicklungen erkennen (steiler ansteigende und am Knie stärker abgeboogene Erwärmungskurven); in der Tat entsprechen die Kurven den nachstehenden Werten der Zeitkonstanten (Subtangenten):

- für das Ankereisen = etwa 3 Std.
- „ den Kollektor = „ 3 „
- „ die Hauptfeldwicklung = „ 4¹/₂ „
- „ die Hilfsfeldwicklung = „ 5 „

Die Kurven der Abb. 214, 215 kennzeichnen den Anker als den für alle Belastungsfälle hinsichtlich Erwärmung maßgebenden Teil der Maschine.

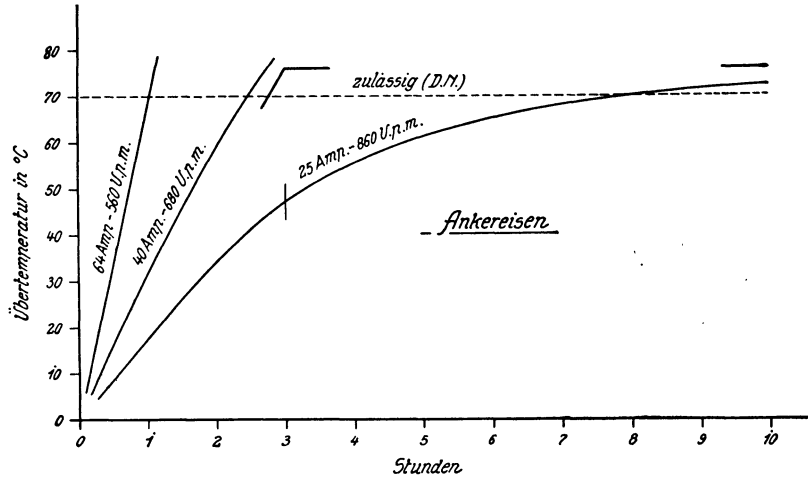


Abb. 214. Erwärmungskurven eines 36 PS-Bahnmotors (Ankereisen).

Die zehnstündige (dauernde) Belastbarkeit des Motors mit 23 A für eine Übertemperatur des Ankereisens von 70 °C ergibt den spezifischen Wärmeverlust des Ankers wie folgt:

$$\begin{array}{r}
 \text{aus den Kernverlusten} & 440 \text{ W} \\
 \text{und den } I^2 r\text{-Verlusten im Ankerkupfer} & 220 \text{ „} \\
 \hline
 & W = 660 \text{ W}
 \end{array}$$

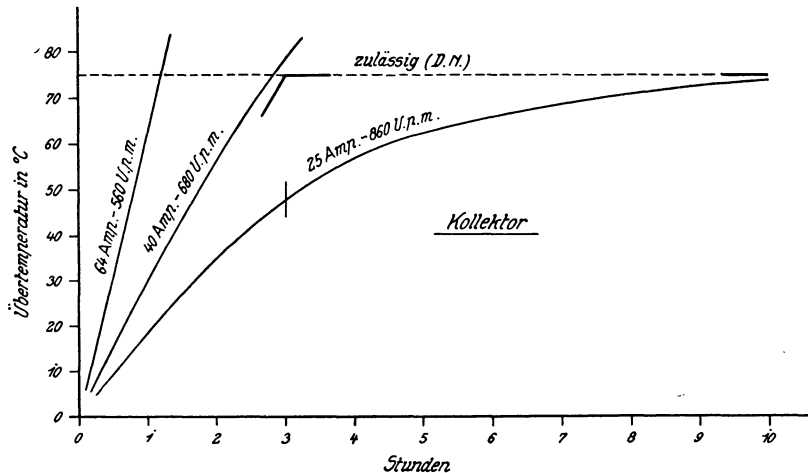


Abb. 215. Berechnete Erwärmungskurven eines 36 PS-Bahnmotors (Kollektor).

daher $A = \frac{W}{T_e} = 9,4 \text{ W/}^\circ\text{C}$ bei 890 Ankerumläufen je Min. Setzt man für die Abhängigkeit von der Umlaufzahl das Gesetz nach Gleichung 3 an, so folgt:

	für $I = 25$	40	64	120	A
entsprechend		860	680	560	410 U.p.M.
	ist $A = 9,3$	8,6	8,0	7,1	$\text{W/}^\circ\text{C}$.

Der Anstieg der Temperaturkurven zu Beginn der Erwärmung (nach der Ursprungstangente) ergibt die Wärmekapazität des Ankers:

	für $I = 25$	40	64	120 A
ist $\frac{dT}{dt}$ für $t = 0$	0,42	0,7	1,3	4 °C/min
Kernverluste	440	500	500	440 W
$I^2 r$ im Ankerkupfer	270	680	1750	6140 „
$W = 710$	1180	2250	6580 „	
$A = \frac{W}{dT dt}$	28,4	28,2	28,8	27,4 Wh/°C.

Entsprechend den vorstehenden Werten variiert die Zeitkonstante $\tau = \frac{A}{\Delta}$ zwischen 3 und 4 h.

Für die Hauptfeldwicklung ergibt sich auf gleiche Weise wie vorhin für den Anker der spezifische Wärmeverlust $\Delta = 2,7 \text{ W/}^\circ\text{C}$, die Wärmekapazität $A = 12,2 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$, die Zeitkonstante $\tau = 4\frac{1}{2}$ Stunden; für die Hilfsfeldwicklung betragen die entsprechenden Werte $\Delta = 1,5 \text{ W/}^\circ\text{C}$, $A = 7,5 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$, $\tau = 5$ Stunden; alle Werte sind praktisch Festwerte.

Mit Hilfe dieser Festwerte sind die Erwärmungslinien Abb. 214 u. 215 berechnet.

II. Die thermischen Festwerte A und Δ eines fremd ventilierten Wechselstrom-Lokomotivmotors 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. 209). 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 Motorinneren maßgebend sind, (d. i. abzüglich der Verluste am Kollektor, in den Lagern und im Wendefeldwiderstand) eingesetzt. Eine Veränderung der thermischen Festwerte A und Δ mit der Umlaufzahl ist in

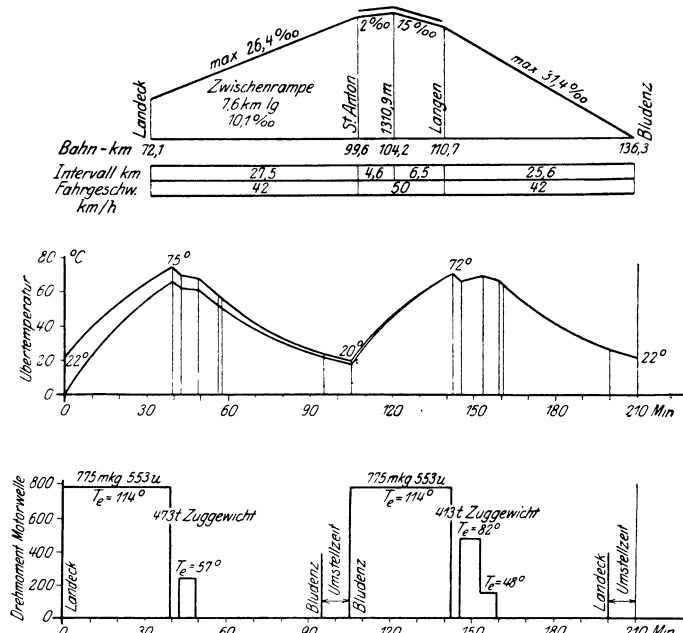


Abb. 216. Höhenplan, Stromdiagramm und Erwärmungslinien für eine Hin- und Rückfahrt über die Arlbergpaß-Strecke.

weiten Grenzen nicht feststellbar, worin der Einfluß der künstlichen Kühlung zum Ausdruck zu kommen scheint.

Die thermischen Festwerte betragen am fremd ventilierten Motor:

$$A = 360 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$$

$$\Delta = 480 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

am Motor ohne künstliche Kühlung, laufend bei 400 U.p.M.:

$$A = 360 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$$

$$\Delta = 330 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Die den Prüfungskurven entsprechenden Linien sind im halblogarithmischen Bezugssystem Abb. 209 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 Zeitkonstanten gerechnet werden kann.

III. Die Auswertung der Temperaturlinien (Abb. 216) der elektrischen Einrichtung, der Triebmotoren usw. eines Fahrzeuges für einen durch den Fahrplan und das Zuggewicht, dementsprechend durch die Bewegungsbilder gekennzeichneten Belastungsfall, kann kurz zusammengefaßt auf folgenden Grundlagen erfolgen:

1. Kennlinien des Motors: n , Z , L als Funktion von J mit Angabe der Stunden- und Dauerleistung und deren Temperaturlinien (Erwärmung und Abkühlung).

2. Aus dem Verlauf der Erwärmungs- und Abkühlungskurven, aufgetragen im halblogarithmischen Bezugssystem, findet man τ und für eine Anzahl von Belastungen T_e . Für zwischenliegende Werte kann T_e durch Wahl eines τ unter Festhaltung der gemessenen Temperaturwerte mit Hilfe einer Rechentafel ermittelt werden.

3. Die thermischen und elektromechanischen Kennlinien werden, mit T_e als gemeinsamer Veränderlicher, in einem Diagramm mit rechtwinkligem halblogarithmischem Bezugssystem vereinigt, aus dem für jede Belastung die in einem Zeitabschnitt auftretende Temperaturänderung abgelesen werden kann.

VI. Die Bauformen des Bahnmotors.

Das Getriebe.

- Adler: Luftgekühlte Straßenbahnmotoren. Eu.M 1915, H. 49. — EKB 1915, H. 32.
- Auvert: Übertragung vom Motor zur Triebachse. RGCF 1921, Nr. 8. — Ref. ZVDI 1921, Bd. 65, Nr. 49.
- Bacqueyrisse und Eisig. Erfahrungen mit Wendepolmotoren im Straßenbahnbetriebe. ISKBK 1912.
- Batchelder: Types and systems of drives of electric locomotives. GER 1914, Nr. 7.
- Bianchi: Nouveau type de transmission par bielles pour locomotives électriques. RGCF 1923, Nr. 2. — Ref. RGE 1923, Bd. 13, Nr. 15.
- Bolstorff: Die Wirkungsweise der Kreisel im Einschienenwagen. GA 1910, Nr. 784.
- BBCM. Einphasen-Motoren für Grubenbahnen. 1907, Nr. 6.
- Brecht: Neuere Bauarten von Wechselstrom-Lokomotiven. ZVDI 1909. — Sanzin: Bemerkungen hierzu ebendort. — Brecht: Erwiderung. ZVDI 1910.
- Brecht: Schwerpunkt- und Kreiselwirkungen bei elektrischen Lokomotiven. EKB 1910, H. 7.
- Brecht: Die günstigste Motoraufhängung bei elektrischen Fahrzeugen. EKB 1909, H. 10.
- Breslauer: Die Elektrotechnik auf der Technischen Messe in Leipzig vom März 1922. ETZ 1922, H. 17.
- Buchli: Kuppelstangenantrieb nach Bauart Brown, Boveri & Cie. für elektrische Lokomotiven mit hochgelagerten Antriebsmotoren. SBZ 1912, Bd. 60, Nr. 2.
- Buchli: Studie über Kuppelstangenantrieb bei elektrischen Lokomotiven. ETZ 1914, H. 22.
- Buchli-Couwenhoven: Theoretische und analytische Betrachtungen über die Kupplung Bauart BBC. BBCM 1922, H. 5.
- Cooper: Ventilierte Bahnmotoren. LI 1918, H. 10. — Ref. Eu.M 1919, H. 18.
- Couwenhoven: Über die Schüttelerscheinungen elektrischer Lokomotiven mit Kurbelantrieb. Forschungsarbeiten des VDI Nr. 218. — Dissertation Nr. 200 der Eidg. TH Zürich.
- Dodd: A review of some European electric locomotive designs. GER 1914, Nr. 1.
- Döry: Über Schüttelerscheinungen des Parallelkurbelantriebes elektrischer Lokomotiven. ETZ 1920 H. 16. — SBZ 1921, Bd. 78, Nr. 6. — Braunschweig: Vieweg 1923.
- Eaton: Chattering wheel in electric motive power. Proc. 1916, Nr. 2.
- Eaton: Gears and side rods of electric locomotives. West. Bull.
- Föppl: Verdrehungsschwingungen von Wellen. SBZ 1922, Bd. 79, H. 5. — Ref. Eu.M 1922, H. 21.
- Geiger: Über den Torsigraphen und seine Anwendung im Dampfmaschinenbetriebe. Eu.M 1922, H. 4.
- Gibbs: Electric traction on heavy traffic lines. ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 4. — BIEKV 1921, Nr. 11.
- Gümbel: Verdrehungsschwingungen und ihre Dämpfung. ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 12.
- Heyden: Beitrag zur Frage des Antriebes elektrischer Vollbahnlokomotiven. EKB 1909, H. 16.
- Hipple: Why modern motors should supersede older types. ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 3.
- Hoepner: Neuer Antrieb für elektrische Lokomotiven. VT 1921, Nr. 35.
- Holzer: Die Berechnung von Drehschwingungen. Berlin: Springer 1921.
- Kleinow: Das Parallelkurbelgetriebe als Antriebsmittel für elektrische Lokomotiven. EKB 1910, H. 25.
- Kleinow: Der Kuppelrahmen und verwandte Getriebe als Antriebsmittel für elektrische Lokomotiven. EKB 1913, H. 17.
- Kummer: Über Triebwerksbeanspruchung bei elektrischen Lokomotiven mit besonderer Berücksichtigung des Kurbelantriebes. SBZ 1914, Bd. 63, Nr. 14 und Bd. 64.
- Kummer: Die Beanspruchung der Lokomotiv-Parallelkurbelgetriebe. ETZ 1915, H. 25.
- Kummer: Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung. Berlin: Springer 1915.
- Kummer: Die kritischen Drehzahlen der Kurbelgetriebe elektrischer Lokomotiven. BSEV 1920, Nr. 9. — Ref. ETZ 1920, H. 52. — SBZ 1921, Bd. 78, Nr. 6. — Ref. RGE 1922, Bd. 12, Nr. 70.
- Kummer: Trägheitskräfte und Eigenschwingungszahlen von Maschinenwellen. SBZ 1922, Bd. 80, Nr. 11.
- Leboucher: Lokomotivgetriebe. RGE 1918, Bd. 4, S. 910.
- L'Hoest: Note sur le fonctionnement des bielles d'accouplement. BIEKV 1912, Bd. 26, S. 889.
- Liljeblad: Resonanzvibrationen bei elektrischen Lokomotiven. Asras Egen Tidning 1923, Nr. 1.

- Mecke: Getriebe für Bahnmotoren. AEGM 1922, Nr. 12.
 Mecke: Wälzlager für Bahnmotoren. ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 12.
 Mecke: Die AEG-Verzahnung. AEGM 1920, Nr. 7.
 Mecke: Selbstlüftender Straßenbahnmotor mit Wendepolen. AEGZ 1922, Nr. 2.
 Mecke: Doppelseitiger Antrieb für Motoren S 351. AEGZ 1922, Nr. 2.
 Mecke: Wälzlager für Bahnmotoren. AEGM 1923, Nr. 9.
 Mecke: Getriebe für Bahnmotoren. EB 1923, H. 21.
 Meißner: Über Schüttelerscheinungen in Systemen mit periodisch veränderlicher Elastizität. SBZ 1918, Bd. 72, Nr. 11.
 Müller: Über die Schüttelschwingungen des Kuppelstangenantriebes. SBZ 1919, Bd. 74, Nr. 12.
 Müller: Die kritische Geschwindigkeit der Lötschberg-Lokomotive 1-E-1, analytisch und graphisch berechnet. SBZ 1920, Bd. 75, Nr. 10.
 Pfeleiderer: Dynamische Vorgänge beim Anlauf von Maschinen mit besonderer Berücksichtigung von Hebemaschinen. Stuttgart: Witwer 1906. — Ref. ETZ 1914, Nr. 36/37.
 Pforte: Rollenlager im Betriebe der Hagener Straßenbahn. VT 1922, Nr. 7.
 Priest: Improvements in the design and construction of railway motors. GER 1920, Nr. 4.
 Rau: Kugel- und Rollenlager für Bahnmotore. EKB 1912, Nr. 18.
 Reichel: Vorläufige Grenzen im Elektromaschinenbau. ZVDI 1920, S. 1105.
 Sachs: Der gegenwärtige Stand im Bau von Bahnmotoren. Eu.M 1923, H. 1.
 Seefehlner: Entwicklungsmöglichkeiten der elektrischen Vollbahnlokomotive. SBZ 1921, Bd. 78, Nr. 2. — Eu.M 1921, H. 38.
 Seefehlner: Das mechanische Triebwerk elektrischer Vollbahnlokomotiven. ZVDI 1920, Nr. 28. — Eu.M 1920, Nr. 29.
 Stengel: Große Wechselstromlokomotivmotoren. EKB 1920, H. 27.
 Symanzyk: Die Belastung der Kugellager. Der Betrieb. 1921, H. 18.
 Thielers: Motoren der D und 2 — B + B — 2-Lokomotiven der Ricksgränsenbahn und der B + B-Lokomotiven der Christiana-Drammenbahn. Ascas Egen Tidning 1923, Nr. 1.
 Tischendörfer: Der Eikemeyer-Field-Straßenbahnmotor. ETZ 1892, Nr. 37.
 Tobias: Kugel- und Rollenlager im Straßen- und Kleinbahnbetrieb. ZÖIAV 1922, H. 11—12.
 Wichert: Über den Einfluß des Lagerspieles bei Kurbelgetrieben elektrischer Lokomotiven. EKB 1914, H. 17. — Ref. ETZ H. 32.
 Wichert: Über den Einfluß von Stichmaßfehlern bei Kurbelgetrieben elektrischer Lokomotiven. ETZ 1915, H. 2.
 Wichert: Über Schüttelschwingungen bei elektrischen Lokomotiven mit Parallelkurbelgetriebe. Ref. ETZ 1920, H. 49. — ETZ 1921, H. 6 u. 1921, H. 17. — BSEV 1921, H. 2.
 Wichert: Über die Normung der Leistung von Grubenbahnmotoren. ETZ 1922, H. 15. — Ref. Eu.M 1922, H. 34.
 Wiesinger: Untersuchungen über das betriebssichere Durchfahren der Kurven mit elektrischen Lokomotiven unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der drehenden Lokomotivmassen. EKB 1910, H. 19.
 Wittfeld: Das Lentz-Getriebe. Mb 1922, H. 8. — ETZ 1922, Bd. 43, H. 22. — EKB 1922, H. 1. — ZVDI 1921, Bd. 65, Nr. 45.
 Wolters: Bestimmung des Zahndruckes von Vorgelegen unter Berücksichtigung des Verdrehungswinkels. Mb. 1922, H. 4.
 Die Entwicklung des Bahnmotors. IE 1912, Bd. 9, H. 10. — Ref. EKB 1913, H. 5.
 Les vitesses critiques des transmissions par bielles dans les locomotives électriques. GC 1920, S. 490.
 SKF-Rollenlager. ZÖIAV 1922, H. 118.
 Die Grenzleistung des Einphasenbahnmotors mit Zahnradantrieb. SBZ 1922, Bd. 79, Nr. 13. — Eu.M 1922, H. 13. — Ref. ZVDI 1912, Bd. 66, Nr. 21.
 Kugel- und Rollenlager für Bahnmotoren. EKB 1912, H. 18.
 Stangenloser Ein- und Zweiachsenantrieb für raschlaufende Gestellmotoren. BO 1922, Nr. 9. — Ref. Eu.M 1922, H. 38.
 Nouveau type de transmission par bielles pour locomotives électriques. RGE 1923, Nr. 15.

1. Die Bauformen der Triebmaschine. In der über 40 jährigen 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 vollen Wert, oder mit einem entsprechenden Anteil 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 vom 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 zwischen der treibenden und getriebenen Achse durch das Vorgelege gesichert ist.

2. Verwendungsgebiete. Der Baustoff- und 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 nicht übersetzte 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 Fahrgeschwindigkeit 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 axiale 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 Triebachse folgt, daß der Untergestellmotor, zumindest wenn mehrere Motoren vorhanden sind, jede Achse einzeln 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 der gleichen Anordnung 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 in den Jahren 1918 bis 1920 entstandenen großen amerikanischen Lokomotiven. Diejenigen Typen, die als

Summe mehrerer kleiner Maschinen anzusehen sind, sind verhältnismäßig sehr schwer. Andererseits wurden Maschinen, die nach einem System gebaut sind, das an sich hohe Gewichte bedingt, mit Parallelkurbelgetriebe und nur vier Motoren ausgeführt, wobei

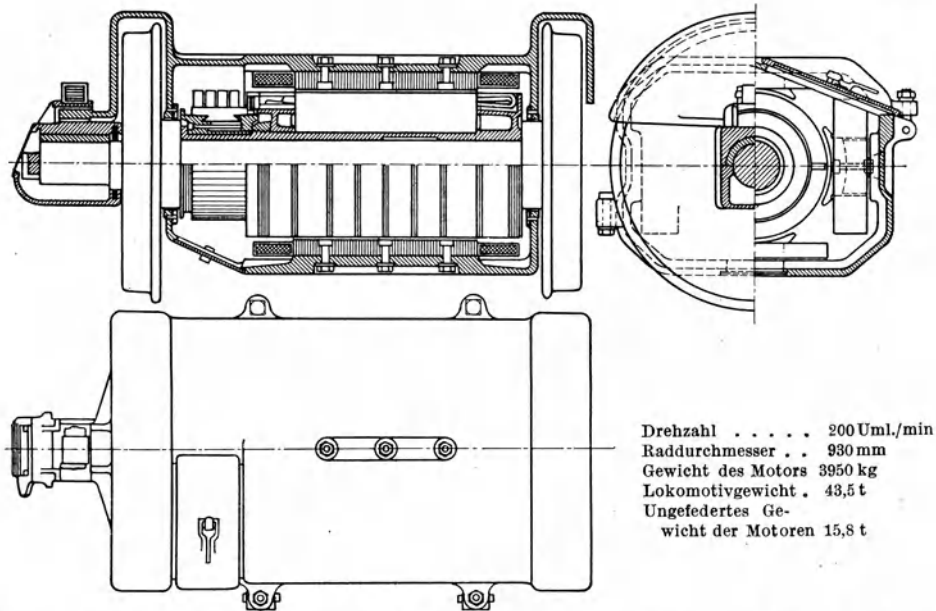


Abb. 217. 85 PS-Achsmotor der Lokomotive 2 A + 2 A der ersten Reihe der Londoner Untergrundbahn.

hierdurch an Gewicht so viel erspart wurde, daß die schwere Umformungseinrichtung untergebracht werden konnte.

Das Kurbelgetriebe ist daher ein erwünschter Behelf zur Kraftverteilung und -übertragung auf der Lokomotive, wenn nur geringe Achsdrücke zugelassen und große Leistungen verlangt werden. Es ist mit demselben möglich, mit wenigen großen Motoren, die zur Gänze gefedert im Rahmen ruhen, eine hohe Baustoffwirtschaft und einfache Schaltung zu erzielen.

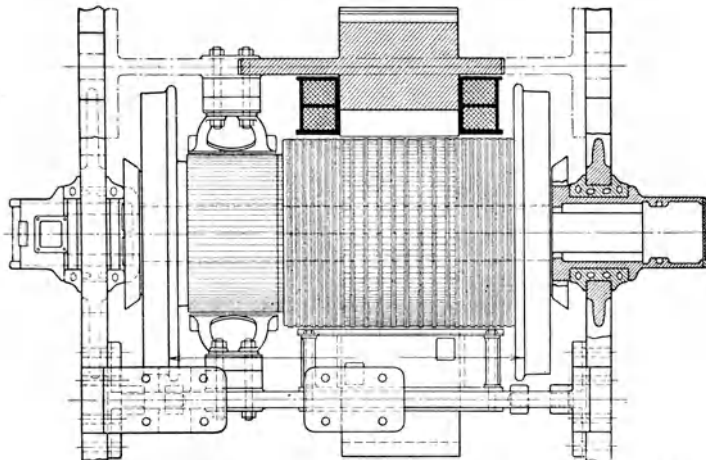


Abb. 218. Ungefederter Achsmotor der Lokomotiven Reihe 6000 der New York-Zentralbahn (GEC).

Welche Bedeutung im übrigen der Getriebemechanik zukommt, dafür spricht die historische Tatsache, daß die Entwicklung des elektrischen Straßenbahnwesens mit dem Zeitpunkte

einsetzte, 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. 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 unmittelbar auf der Achse (Abb. 217). Die dynamischen Wirkungen werden durch die verhältnismäßige Größe der in ihrer Gesamtheit ungefederten Masse des Motors sehr beträchtlich. 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. 218).

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 entsprechend der Lokomotivfederung frei im Luftraum der Polschuhe. Das ungefederte Gewicht ist gegenüber der erstgenannten Anordnung wesentlich verringert. Es beträgt bei den Ch.-M. und St. P.-Lokomotiven nur mehr 4,35 t

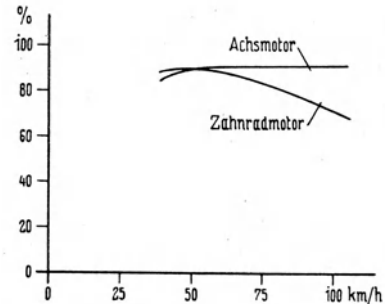


Abb. 219. Vergleich der Wirkungsgradkennlinien eines Achsmotors und eines Vergleichsmotors.

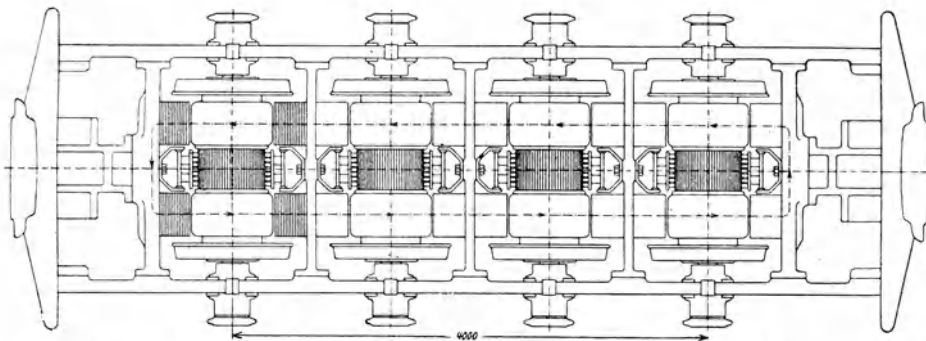


Abb. 220. Untergestell mit Achsmotoren mit doppelter Ankerwicklung und je einem Kollektor (Amerik. Pat.).

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 und die Achslast nur etwa 17 t erreicht, kann gegen diese Anordnung mit Rücksicht auf die zulässige Beanspruchung kein Einwand erhoben werden. Ein Nachteil dieser Anordnung ist, daß der Anker nur nach Abpressen zumindest 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.

Der unmittelbare Antrieb ist auch aus diesem Grunde so gut wie ganz verdrängt worden, wenn auch der mechanische Wirkungsgrad infolge Fehlens jeglicher Übersetzung den denkbar günstigsten Wert erreicht.

Dieser hohe Wirkungsgrad wird allerdings nur in einem vergleichsweise kleinen Bereich

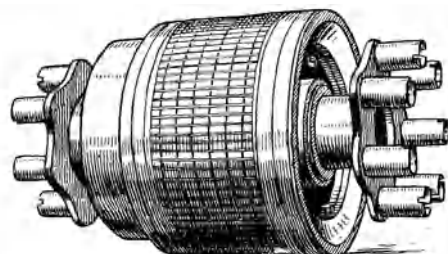


Abb. 221. Anker mit Hohlwelle und Mitnehmer der Lokomotiven Reihe 1—40 der New Haven-Bahn (West.).

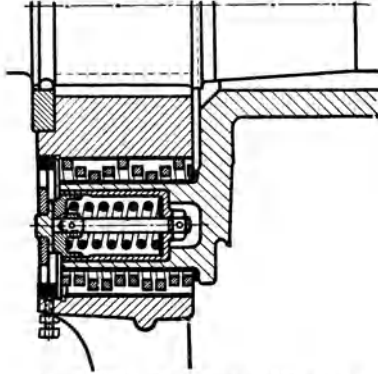


Abb. 222. Gefederter Mitnehmer der Hohlachse der Lokomotiven Reihe 1—40 (1907) der New Haven-Bahn.

Leistung eines Motors . . . 350 PS
 Triebraddurchmesser . . . 1575 mm
 Regeldrehzahl 296 Uml./min

hoher Geschwindigkeiten erzielt. Die Gegenüberstellung zu der Wirkungsgradkurve eines Zahnradmotors für die gleiche Betriebsaufgabe erläutert die diesbezügliche Sachlage (Abb. 219).

Dem steht jedoch gegenüber, daß die Fahrzeuge mit unmittelbar treibenden Motoren, eben weil die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers angenähert an die Fahrgeschwindigkeit gebunden ist, verhältnismäßig kleine Raddurchmesser erhalten müssen. Die $1 + 2A + 4A + 4A + 2A - 1$ -Lokomotiven Reihe 10251 der Ch.-M. u. St. P.-Bahn (1918, Abb. 218) mit unmittelbarem Antrieb haben Räder von 1118 mm Durchmesser, wogegen die für die gleichen Geschwindigkeitsverhältnisse (100 km/h) gebauten $2 - 3A - 1 + 1 - 3A - 1$ -Lokomotiven mit Zahnradmotoren (Abb. 235) Räder von 1727 mm Durchmesser aufweisen. Der Zugwiderstand wächst mit abnehmendem Raddurchmesser; außerdem nimmt die Ver-

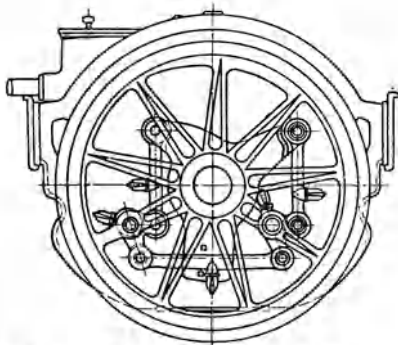


Abb. 223. Treibstangenkupplung des Achsmotors mit Hohlwelle der Lokomotiven, Reihe 34 (1902) der italienischen Staatsbahnen (Ganz.).

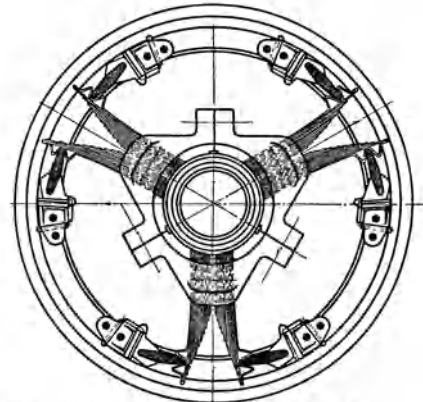


Abb. 224. Federkupplung des Achsmotors des AEG-Schnellbahnwagens (Berlin-Zossen).

lustarbeit 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. Es beträgt 73 bzw. 86 kg pro Einstunden- 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 jeder Achse werden zwei Anker mit gemeinsamem Kommutator angeordnet (Abb. 220), so daß eine besondere Bodenplatte zur Schließung des magnetischen Kreises 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. 221), die mit gefederten Greifern (Abb. 222) zwischen den Radspeichen sitzt. Das Federspiel der Achse ist bei dieser Anordnung unbehindert.

Grundsätzlich der gleichen Bauart gehört die von Ganz & Co., Budapest, schon früher für die Lokomotiven der ersten Reihe und die Motorwagen der Valtellinabahn ausgeführte Anordnung (Abb. 223) an, bei welcher die Verbindung zwischen der hohlen Ankerwelle und den Triebradscheiben durch eine Treibstangenkupplung bewirkt wird.

In diese Gruppe ist auch die mit radial angeordneten Federpaketen ausgeführte Kupplung der AEG für die Achsmotoren des Schnellbahnwagens Berlin-Zossen (Abb. 224) zu zählen.

4. Der Vorgelegemotor ruht einerseits auf der Triebachse, andererseits ist er federnd im Gestell aufgehängt; senkrechte Stöße der Achse haben daher nur den auf der Achse ruhenden Anteil des Motorgewichtes anzuheben, wobei der Weg des Schwerpunktes der Motormasse entsprechend der Entfernung von der Triebachse vermindert ist (Abb. 225 bis 232).

Zur Kraftübertragung von der Ankerachse zur Triebachse dient eine Zahnradübersetzung, durch die das Drehmoment auf den gewünschten Wert erhöht werden kann,

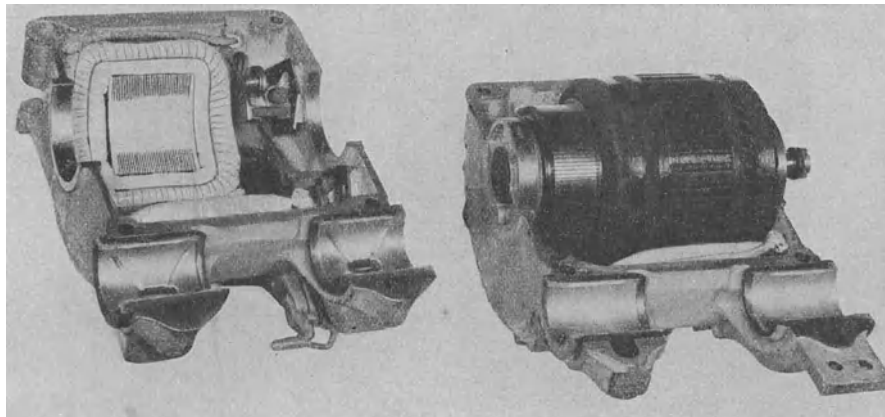


Abb. 225. Untergestellmotor für Industriebahn-Lokomotiven.

Regelleistung	10 PS	Spurweite	500 mm
Spannung	550 V	Kleinster Raddurchmesser	560 mm
Uml. i. Min.	720	Gewicht kompl.	305 kg

Gehäuse: geteilt, nach oben aufklappbar (AEG).

wodurch die Ausnützung des Motors gesteigert wird. Durch die Übersetzung, die in gewissen Grenzen verändert werden kann, wird der Vorgelegemotor für verschiedene Zwecke verwendbar.

Diese Bauform, die durch ein das Magnetjoch bildendes, geschlossenes Stahlgußgehäuse, innigen Zusammenbau mit dem Vorgelege, gedrängte Anordnung und namentlich bei höheren Leistungen durch weitgetriebene Beanspruchungen gekennzeichnet ist, bildet jene eigentümliche Sondergruppe elektrischer Triebmaschinen, die im allgemeinen als Bahnmotoren bezeichnet werden.

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 haltenden Abstand von der Schienenoberkante a bestimmt ist. Es bestehen folgende geometrische Beziehungen (Abb. 233):

$$\frac{R}{r} = \ddot{u}$$

ist die Übersetzung, wenn r der Halbmesser des Ritzels ist;

$$R_t = R + a \quad \text{und} \quad R_m + b = R + r,$$

wobei R_m den Motorhalbmesser und b den in der Verbindungslinie der Zentralen zur Unterbringung der Vorgelegewelle (\varnothing 95 bis 125 mm) nötigen Abstand bezeichnet.

$$R_m = R + r - b = R_t + r - (a + b).$$

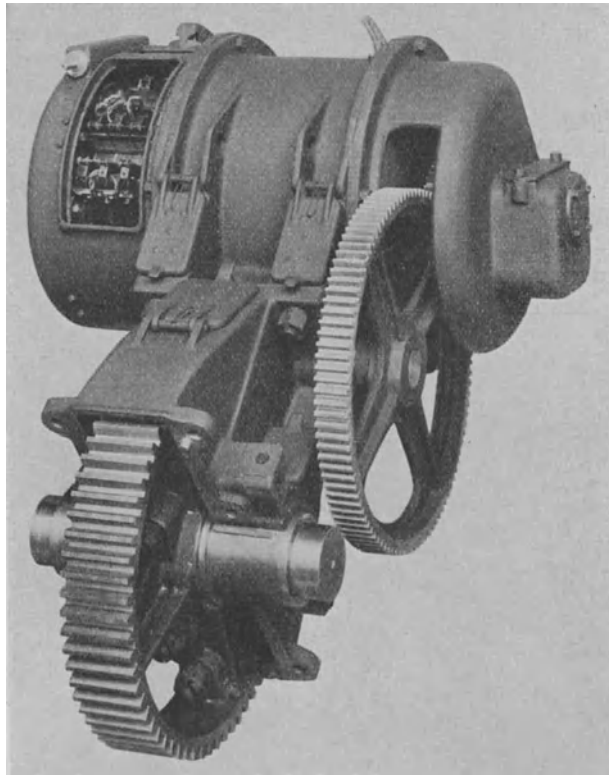


Abb. 226. Einphasen-Grubenlokomotivmotor mit doppelter Übersetzung (BBC).

Leistung	25	20 PS
Spurweite	600	550 mm
Übersetzung maximal		1 : 26,5
minimal		1 : 11,0
Umlaufzahl/min		1500

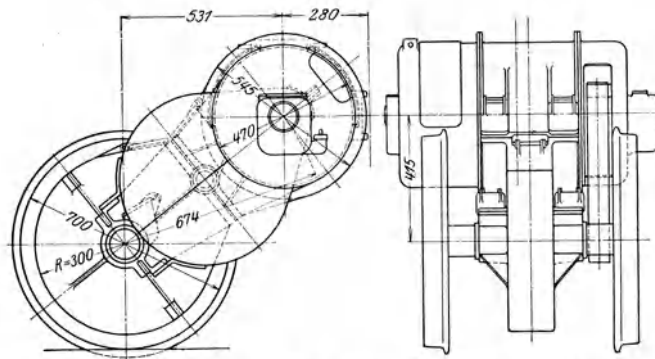


Abb. 227. Einbauzeichnung des Motors Abb. 226.

Die Fahrgeschwindigkeit ist:

$$v_{\text{km/h}} = \frac{3,6 n \pi R_t}{30 \cdot \ddot{u}} = \frac{3,6 n \pi r R_t}{30 (R_t - a)},$$

bzw., da $r = R_m - R_t + a + b$,

$$v_{\text{km/h}} = 0,12 n \pi \cdot \frac{R_t (R_m - R_t + a + b)}{R_t - a};$$

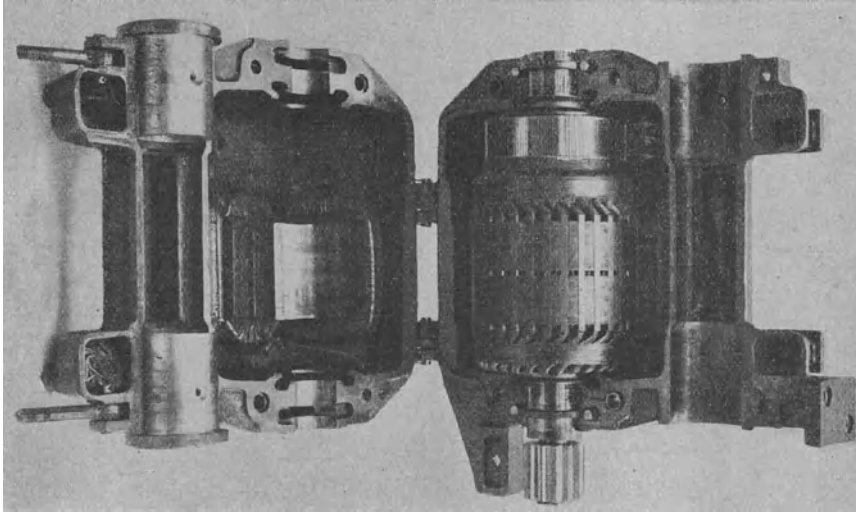


Abb. 228. Straßenbahnmotor nach unten aufklappbar (SSW).

Regelleistung	45 PS
Spannung	550 V
Uml./min	530

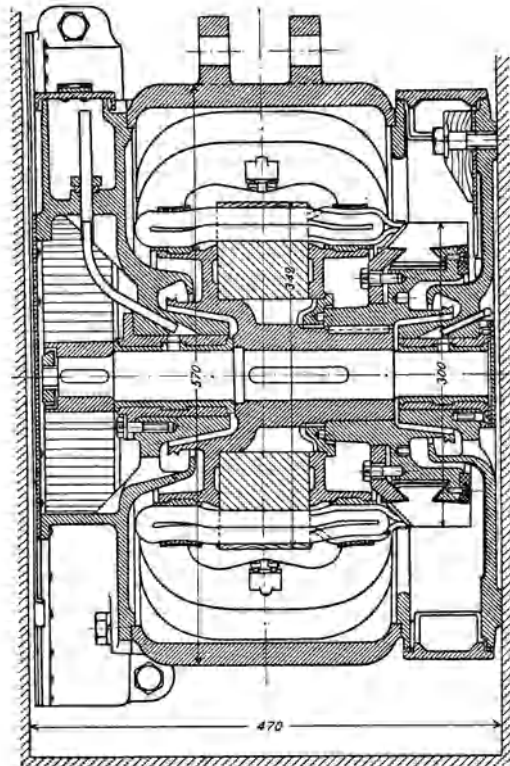


Abb. 229. Längsschnitt eines Grubenlokomotivmotors für 500 mm Spurweite (SSW).

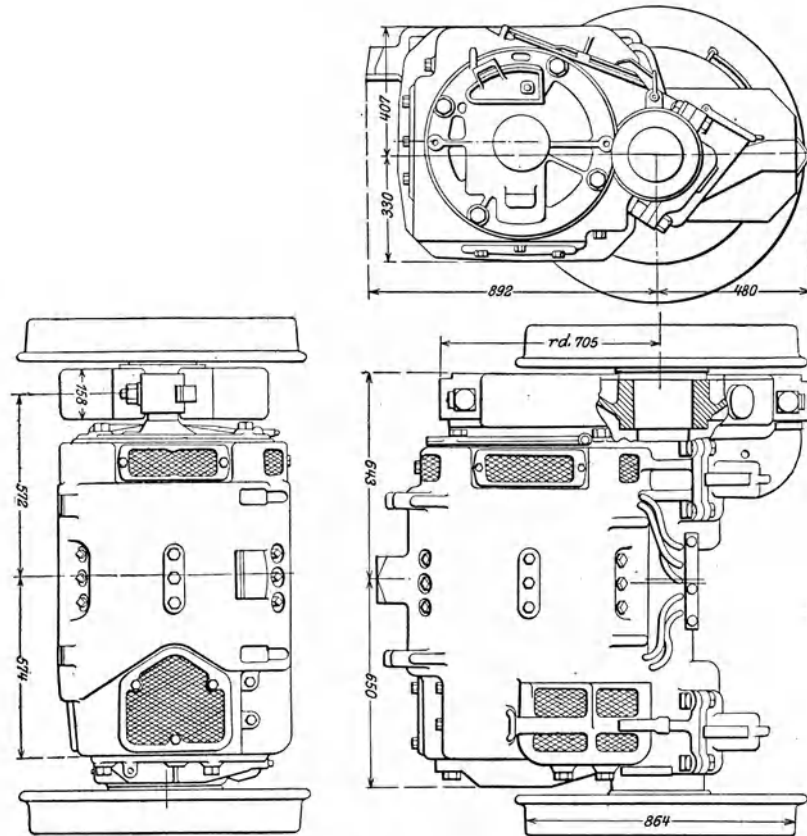


Abb. 230. Triebmaschine für die New Yorker Städtische Untergrundbahn.
Leistung 160 PS. 650 V, 500 Uml./min.

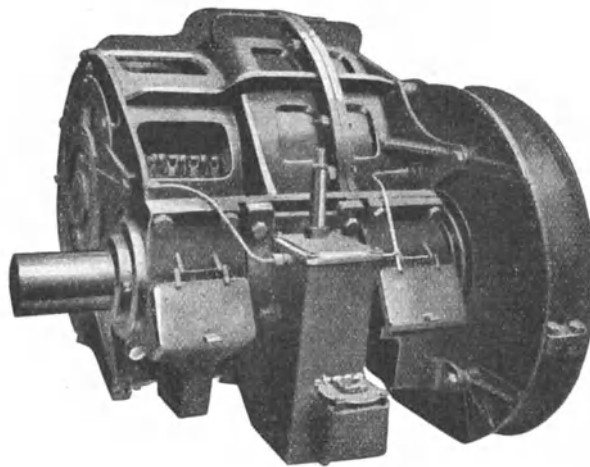


Abb. 231. Ansicht des 350 PS-Wechselstrommotors der Abb. 232 (AEG).

hieraus folgt

$$R_m = R_t - (a + b) + v \frac{1 - \frac{a}{R_t}}{0,12 n \pi},$$

diejenige Gleichung, die den Einfluß des Triebradhalbmessers auf den Motordurchmesser zum Ausdruck bringt.

Die durch sie dargestellte Zwangsverbindung zwischen Motordurchmesser, Triebraddurchmesser und Umlaufzahl hat zur Folge, daß man vergleichsweise große Triebräder anwenden muß, um die Triebmaschine unterbringen zu können. Zur Aufhebung dieser Wirkung muß eine entsprechend größere Übersetzung vorgesehen werden, um die verlangte Zugkraft zu erzielen. Es werden somit zwei sich gegenseitig aufhebende konstruktive Maßregeln nötig, was unwirtschaftlich ist.

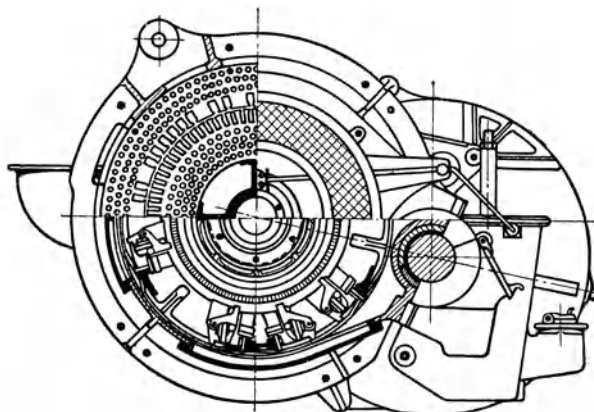


Abb. 232. 350 PS-25 ~ Einphasen-Vorlegemotor mit einseitigem Zahnradgetriebe, Versuchslokomotive der Preuß. Staatsbahnen 1908 (AEG).

Triebraddurchmesser	1400 mm
Umläufe des Motors	370 U. p. M.
Übersetzung	1:3.5

Der Zahnradantrieb, welcher in einem geschlossenen Ölkasten läuft, wird für Leistungen bis etwa 350 PS einseitig ausgeführt (Abb. 231 u. 232).

Die Verwendung des Zahnradvorgeleges blieb nicht auf den Untergestellmotor beschränkt; es wird vielmehr auch bei Gestellmotoren, selbst für Leistungen von über 1000 PS je Triebmaschine, ausgeführt.

Aus der Geometrie der Zahnradübersetzung und den bahnmäßigen Raumbeschränkungen folgt, daß der aus fahrzeugtechnischen Gründen meist gegebene Raddurchmesser einen tiefgreifenden Einfluß auf die Auslegung der Triebmaschine ausübt. Bei den im Motorwagenbetrieb der Straßen- und Überlandbahnen vorkommenden Leistungen zwingt dieser Zusammenhang zu keinen unerwünscht weitgehenden Beanspruchungen und zu keiner übertrieben beengten Formgebung der Triebmaschine. Um so ungünstiger macht sich diese Sachlage bei den hohen Einzelleistungen der Triebachsen von Vollbahnlokomotiven geltend. Hier führt die Geometrie der Zahnradübersetzung nicht nur zu ungünstig gedrängter Bauart und unerwünscht tiefer Absenkung der Motoren im Gestell, sie zwingt vielmehr auch zur Einschränkung der Leistung einer Triebmaschine

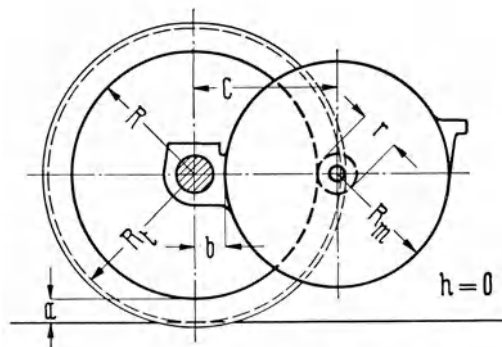


Abb. 233. Geometrie der Zahnradübersetzung des Untergestellmotors.

auf etwa 450 PS, obwohl 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 kW am Radumfang	n Uml./min.	Übersetzung	Durchmesser mm	Gewicht kg ohne mit Zahnrädern
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. Pannell über Gleichstrom-Bahnmotoren mit Vorgelege
Drehzahl $n = 600$

Leistung kWh	40	80	100	160	200
Gewicht kg	1200	1700	2200	1600	3000
kg je kW	30	21,3	22,0	13,3	15,0

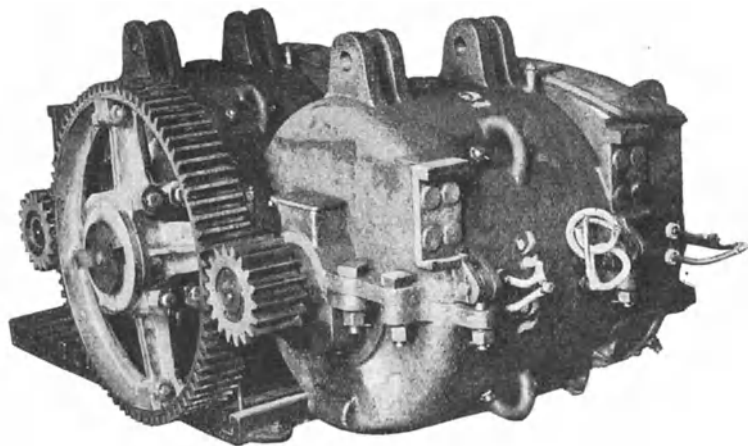


Abb. 234. Gleichstrom-Untergestell-Doppelmotor der 2A-Versuchslokomotive für die Wiener Stadtbahn, Bauart Krizik, Prag.

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 zufolge der axial 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 wird verdoppelt, wenn man auf das große Zahnrad zwei Motoren arbeiten läßt. Auf diese Art sind die Doppelmotoren von Krizik (Abb. 234) entstanden. Hierdurch wird unter einem die mechanische Kupplung zweier in Reihe geschalteter Anker bewirkt, so daß auch die Aufteilung der Spannung auf diese stabil wird.

Einige Lokomotiven der New Haven-Bahn (Reihe 1919) und die $2 - 3A + 2 + 3A - 1$ -Lokomotiven der Chic.-Milw.- u. St. Paul-Bahn (3000 V Gleichstrom) sind mit Motoren dieser Bauart ausgerüstet worden (Abb. 235).

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 Haven-Bahn

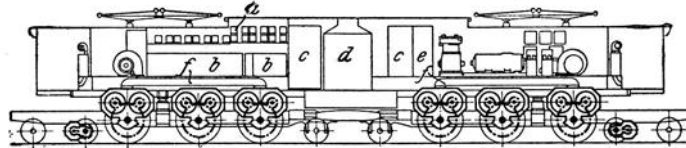


Abb. 235. Laufwerk und Getriebe der Lokomotiven, Reihe 1919, Achsanordnung, $2 - 3A + 2 + 3A - 2$ der Chicago—Milwaukee- und St. Paul-Bahn.

Leistung	4200/3360 PS
Geschwindigkeit	38.3/41,8 km/h
Leistung eines Doppelmotors	700/560 PS
Triebrad-Durchmesser	1725 mm
Drehzahl (max.)	1090/min

a) Hochspannungsabteil, Widerstände; b) Schalter; c) Heizwasserbehälter; d) Heizkessel; e) Heizöl;
f) Kühlluftverteiler für die Motoren.

Reihe 73—75 an Stelle eines Motors der gleichen Leistung, ist der Motordurchmesser im ersten Fall halb so groß als im zweiten, bei um etwa 33% gesteigerter Leistung einer Achse. Die allgemeine Gültigkeit dieser Feststellung besteht zwar nicht genau, doch trifft sie 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 Abnützung bemerkbar; es hat sich daher als zweckmäßig erwiesen, die Zahnräder mit gefedertem Zahnkranz zu bauen (Abb. 236, 237, 238).

Der Zahnkranz wird lose, mit Reibung auf den Stern aufgesetzt und greift mit Knaggen in die Radspeichen. Zwischen beiden befinden sich Spiralfedern.

Um diese Anordnung, die im übrigen in großer Zahl bei amerikanischen Lokomotiven angewendet wurde und verhältnismäßig viele der Abnützung unterliegende Bestandteile aufweist, zu umgehen, zieht man die natürliche Elastizität der Achsen zur Federung heran. Zu diesem Zwecke wird das große Zahnrad auf eine Hohlachse aufgezogen, die ihrerseits in der Mitte ihrer Länge gelenkig mit der Achse der Treibkurbel verbunden wird (Abb. 239).

Es liegen Bestrebungen vor, auch bei den verhältnismäßig kleinen Straßenbahnmotoren die Starrheit des Getriebes zu mildern.

Diesem Zwecke dienen die Zahnräder System Duffing, deren Speichen aus elastischem Material hergestellt sind, so daß die Federung ohne umständliche Mechanik erzielt wird.

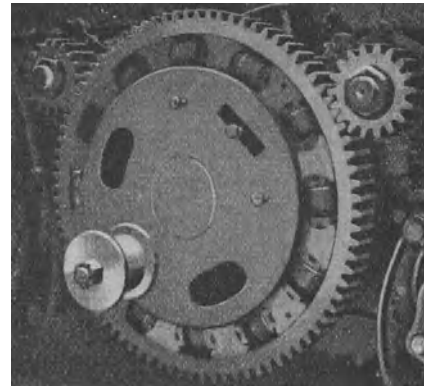


Abb. 236. Gefedertes Zahnrad für einen Doppelmotor der $1 - B + B - 1$ -Lokomotive der Norfolk- und Westernbahn. Leistung je Motor 420 PS.

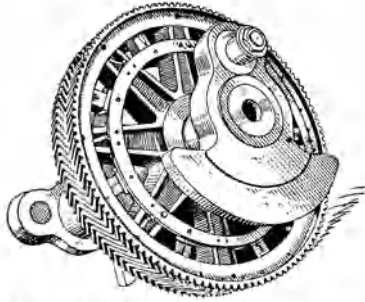


Abb. 237. Gefedertes Zahnrad des 1250 PS-Motors der Lötseberg-Lokomotiven, Reihe 1—E—1, Übersetzung 1:2,23.



Abb. 238. Gefedertes Zahnrad für den 452 PS-Motor der Ch.-M. und St. P.-Lokomotive, Reihe 1914, Übersetzung 1:4,56.

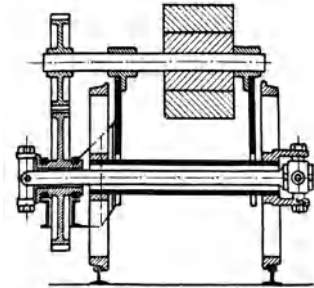


Abb. 239. Gestellmotor für Einzel-Achsantrieb mit federnder Welle, Bauart Tschanz.

Bei ausgeführten Motoren findet man folgende Zahndrücke angewendet:

Drehmoment/h mkg	Zahndruck kg/cm Breite	Zahngeschwindigkeit m/sek	
		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

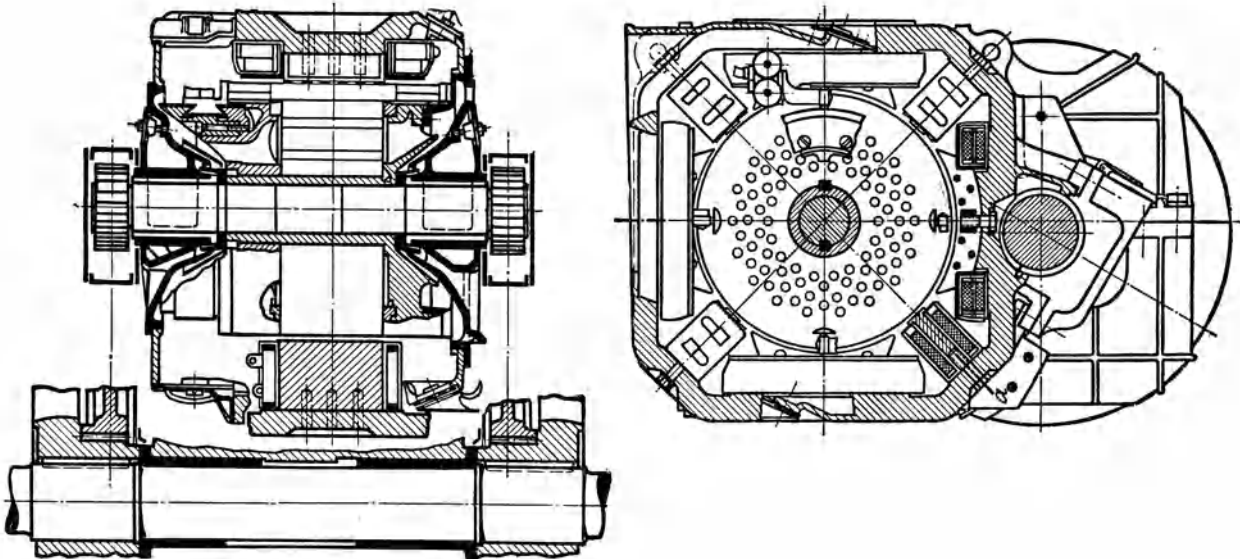


Abb. 240. 452 PS, 1500 V-Gleichstromvorlegemotor der Reihe 1914 der Ch.-M.- u. St. P.-Bahn (GEC).

Triebraddurchmesser	1500 mm
Umläufe des Motors	{ (regel) 375/min (höchst) 755/min
Übersetzung	1:4,56
Gewicht	6550 kg

Günstigere Konstruktionsverhältnisse und bessere axiale Raumaussnutzung ist durch zweiseitige Anordnung der Zahnräder zu erzielen (Abb. 240).

Der einseitig auf die Hälfte herabgesetzte Zahndruck gestattet kürzere Ankerlager, das größere Biegemoment bei einseitigem Antrieb verlangt größere Achs-

dimensionen; weiter ist bei einseitigem Antrieb die genaue Parallellage der Anker- und Vorgelegeachse nicht erzielbar. Daher sind kleinere Zahndrücke als bei zweiseitigem Antrieb vorzusehen, bei welchem die Zähne stets mit voller Breite arbeiten.

Die zweiseitige Anordnung der Zahnräder ist auch vom Standpunkt der Ausnützung der Radreibung zu befürworten. Jede Treibachse ist als Drehungsfeder anzusehen.

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

$$f = \frac{32}{\pi} (PR) \frac{Rl}{Gd^4}.$$

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 wird, muß die Verdrehung der beiderseits des Zahnrades vorhandenen Achslängen l_1 und l_2 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

$$l_1 = 4 l_2 \text{ für Normalspur und}$$

$$l_1 \cong 6 \text{ bis } 8 l_2 \text{ für Meterspur.}$$

Wird die Reibung der Achse rechnermäßig mit 250 kg je t ausgenützt, so würde das dem Zahnrad näherliegende 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 diejenige des Rollens.

Die Federung der Achse verursacht somit eine zeitweilig ungleiche Verteilung des Drehmomentes auf die beiden Reibungsräder, wodurch in weiterer Folge Gleiten und Reibungsschwingungen auftreten. Das Ergebnis dieser dem gleichmäßigen Radumlauf 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 Achsmittle angebracht werden, so würde die Federung die gleichmäßige Aufteilung des Drehmomentes auf beide Räder nicht stören und demgemäß die Radreibung nicht gefährden. Das gleiche ist bei symmetrischer Anordnung von zwei Triebzahnradern auf einer Achse, also beiderseits der Triebmaschine, zwischen dieser und den Rädern der Fall. 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 gleiche Verdrehung der beiden Achsschenkel die Durchmesser der letzteren nach der Gleichung

$$d_1 = \sqrt[4]{\frac{l_1}{l_2}} d_2$$

abgestuft werden müssen. 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 $d_1 = 1,565 d_2$ sein. Diese Querschnittsänderungen lassen sich aus konstruktiven Gründen schwer durchführen.

Zur Verminderung des spez. Zahndruckes haben die 1250 PS-Motoren der Lötschbergbahn Pfeilräder erhalten (Abb. 237), deren Zahnkränze mit Federn versehen sind. Diese Type hat den Nachteil, daß das axiale Ankerspiel behindert ist; für einen jedoch 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 sie etwa 50 bis 55 m/sek nicht überschreiten.

Für die mechanische Beanspruchung der Anker ist streng genommen nicht die Umfangsgeschwindigkeit, sondern die bei der zu gewärtigenden höchsten Geschwindigkeit auftretende Fliehkraft

$$P = \frac{m v^2}{r}$$

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 p und die Umfangsgeschwindigkeit v m/sek ausdrücken; dann wird

$$P_1 = 0,1036 n v.$$

Man findet folgende Werte an ausgeführten Maschinen:

	P_1 kg	v m/sek	n Uml./min
Straßenbahn-Vorgelegemotoren	720	11,6	600
Batcheldermotor (Achsmotor)	990	19,0	500
600 PS Wechselstrommotor der AEG (B+B-Lok. der Preuß. Staatsb.) (Gestellmotor mit Übersetzung)	4770	51,0	900
750 PS Wechselstrommotor der AEGU für die 1-B-1-Lokomotive der Wien—Preßburger Bahn (Gestellmotor, dir. Antrieb)	1250	34,0	360
1250 PS Wechselstrommotor der MFÖ der Lötschberg-Lokomotive (Gestellmotor mit Übersetzung)	4070	57,0	690
350 PS Wechselstrommotor der AEG der Rhät. Bahnlokomotive (Gestellmotor mit Übersetzung)	2720	39,0	660
450 PS Gleichstrommotor der GEC der Chic.-Milw. u. St. Paulbahn (Untergestell-Vorgelege-Motor)	3170	34,0	900
1250 PS Wechselstrommotor von Maffei-Schwarz. (direkter Antrieb)	2430	54,0	430
2000 PS Gleichstrommotor von West. der 2-B-Pennsylvania-Lokomo- tive (direkter Antrieb)	1130	29,0	375

Durch die bessere Ausnützung der aktiven Baustoffe bei der übersetzten Triebmaschine erzielt man bei dieser 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. Es ist zweckmäßig, 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-Lokomotiven und Motorwagen mit geteiltem Gehäuse gebaut, und zwar für jene nach oben, für diese nach unten aufklappbar.

Neuerdings geht man von der Teilung der Gehäuse ab, weil die sichere Lagerführung bei geteiltem Gehäuse mit der Zeit eingebüßt wird.

Die Motoren mit ungeteiltem, sog. Kastengehäuse — Abb. 241, 242 — müssen samt dem Anker ausgebunden werden. Dieser kann nach Entfernung der Schilder in einen Spindelstock gespannt und dann axial herausgeschoben werden (Abb. 244).

Die wachsende Bedeutung der hohen Dauerleistung, der Überlastungsfähigkeit und Schonung des Stromwendeapparates führte dazu, daß moderne Gleichstrom-Bahnmotoren mit Wendepolen (Abb. 240, 241) und mit Einrichtungen zur Selbstkühlung (Abb. 243, 245, 446) bzw. für äußere Luftzufuhr (Fremdbelüftung) ausgeführt werden.

Durch die Wendepole ist es möglich geworden, einen für etwa 500 V 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 Selbstkühlung mit Kreiselpumpe 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.

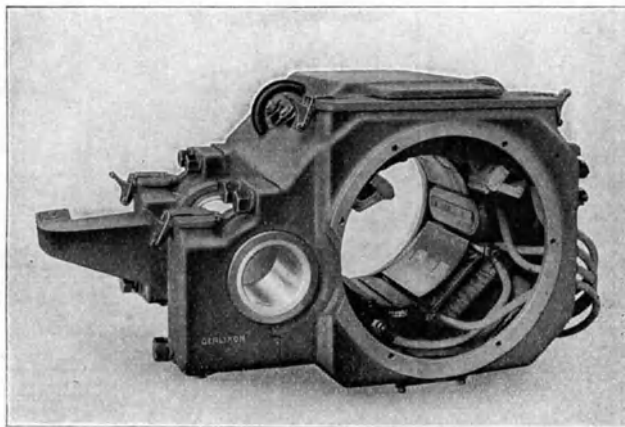


Abb. 241. Gleichstrom-Untergestell-Motor, Kastengehäuse, Wendepole, Kugellager (MFO).

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

Bei der Bewertung der Selbstkühlung mit Schleuderrad ist zu beachten, daß die Zufuhr frischer Luft gerade bei den hohen Belastungen, also niedrigen Umlauffzahlen vergleichsweise gering ist. Die Selbstkühlung ist daher bei Straßenbahnen vergleichsweise weniger wirksam als bei Überlandbahnen mit höherer Reisegeschwindigkeit.

Bei Untergestellmotoren mäßiger Leistung wird die Kühlung dadurch erzielt, daß an die Zahnradseite des Ankers ein Schleuderrad angebaut wird, das durch entsprechend

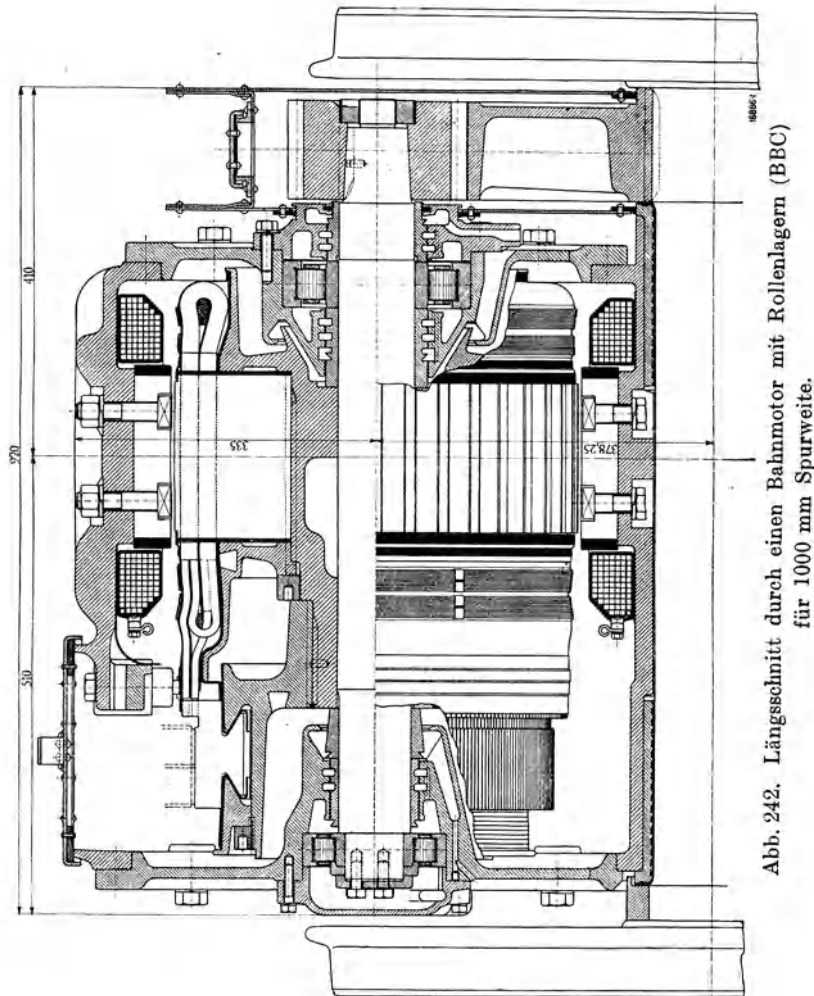


Abb. 242. Längsschnitt durch einen Bahnmotor mit Rollenlagern (BBC) für 1000 mm Spurweite.

angeordnete axiale Kanäle die Warmluft aus dem Ankerkörper absaugt. Da auch die Kühlung der Feldwicklung von Bedeutung ist, wird hierauf ebenfalls Rücksicht genommen. Bei der Einfachführung streicht die Luft über den Anker hinweg und zwischen den Feldspulen durch. Bei der Doppelluftführung — Abb. 246 — durchzieht die abgesaugte Luftmenge Anker und Feld hintereinander oder gleichzeitig in parallelen Luftströmen. Versuche haben die letztere Art als die wirksamste erwiesen, wobei es von Wichtigkeit ist, daß die Kühlung im Ankerinnern und nicht nur auf der Außenfläche erfolgt.

Diese Kühlungsarten können auch mit äußerer Kaltluftzufuhr (Fremdbelüftung) erreicht werden. Bei Großmotoren ist diese Anordnung die Regel, weil die volle axiale Breite für aktives Material benötigt wird.

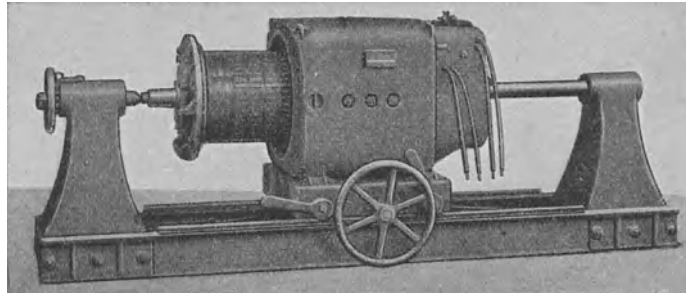


Abb. 244. Spindelstock zum Herausnehmen des Ankers aus einem Motor mit einteiligem Kastengehäuse.

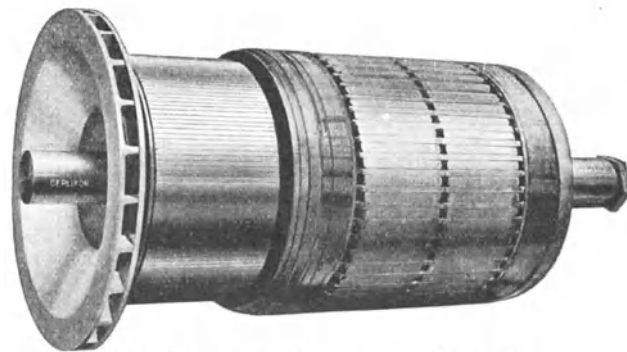


Abb. 245. Untergestell-Motoranker mit angebautem Schleuderrad (MFO).

Stundenleistung	250 PS bei 6:0 Uml./min	Übersetzung	1:3,3
Dauerleistung	120 „ „ 840 „	Gewicht des Motors ohne Vorgelege	3015 kg
Spannung	575 V	Gewicht des Ankers ohne Kolben .	850 „

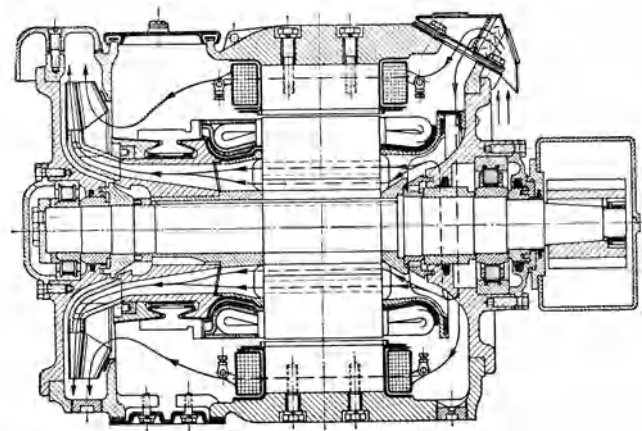


Abb. 246. Lüftungsplan eines Straßenbahnmotors mit Parallel-Luftführung (AEG).

5. Der Gestellmotor. Der Leistung des Untergestellmotors sind durch Raddurchmesser und Spurweite Grenzen gesetzt, andererseits begrenzt auch der gegebene Achsdruck, namentlich bei großer Geschwindigkeit, diejenige Leistung, die von einer Achse entwickelt werden kann. Dieser Umstand zwingt dazu, das Triebfahrzeug mit verhältnismäßig kleinen Motoren auszurüsten, wodurch die Baustoffwirtschaft und die

Kosten der Erhaltung im Betriebe (zufolge tiefer Schwerpunktslage) ungünstig beeinflusst werden.

Die Untergestellmotoren führen im allgemeinen auch zu vergleichsweise langen Fahrzeugen, weil deren Unterbringung große Radstände bedingt.

Dieser Übelstand kann vermieden werden, wenn man die Motoren senkrecht über den Achsen anordnet (Abb. 247).

Diese Anordnung setzt jedoch unbedingt voraus, daß Hohlachsen mit Federung vorgesehen werden, weil sonst das Gewicht des ganzen Motors samt Vorgelege ungefedert auf den Achsen lasten würde.

Durch diese räumliche Anordnung des Motors ist bereits der Übergang zum Gestellmotor geschaffen, nur mit dem Unterschied, daß dieser keine eigene Federung aufweist, sondern fest im Gestell ruht.

Der Gestellmotor hat sich in zwei grundsätzlich verschiedenen Bauformen entwickelt. Der ohne Übersetzung 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 nicht durch den Raddurchmesser, unterliegen (Abb. 248, 249, 250).

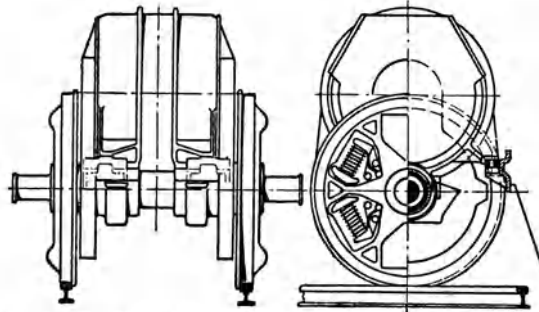


Abb. 247. Vorgelegemotor, senkrecht über der Treibachse, mit gefederter Hohlwelle, Reihe 71—72 (1910) der New Haven-Bahn. (West.)

Leistung 315 PS/h
 Übersetzung 1:2,33
 Triebraddurchmesser . 1600 mm

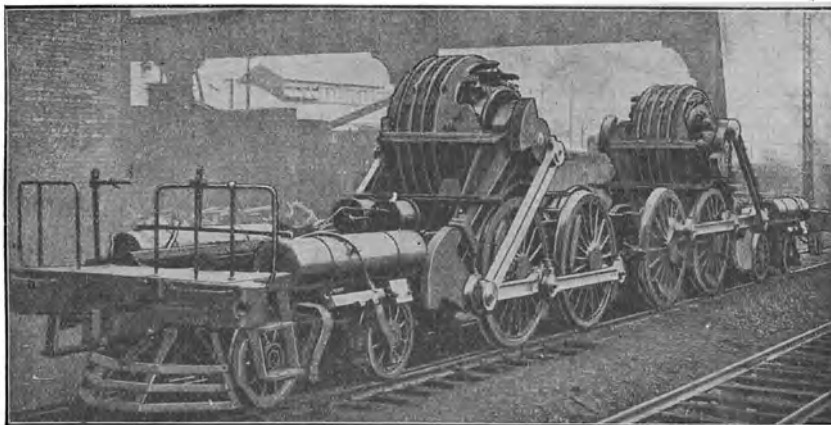


Abb. 248. Gestelle der 2500 PS-Pennsylvanialokomotiven 2 — B + B — 2.
 Höchstleistung 4000 PS/20 min, Höchstgeschwindigkeit 128,5 km.

Dienstgewicht 150 t Triebraddurchmesser 1830 mm
 Reibungsgewicht 94,5 t Drehzahl (max.) 220 Uml./min

Die 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.

Weiters ist für diese Bauart eine starke Näherung an die Bauformen ortsfester Maschinen kennzeichnend. Eine gute Durchlüftung und allseitige Zugänglichkeit, namentlich der Stromwendeinrichtung, kann ebenfalls erzielt werden.

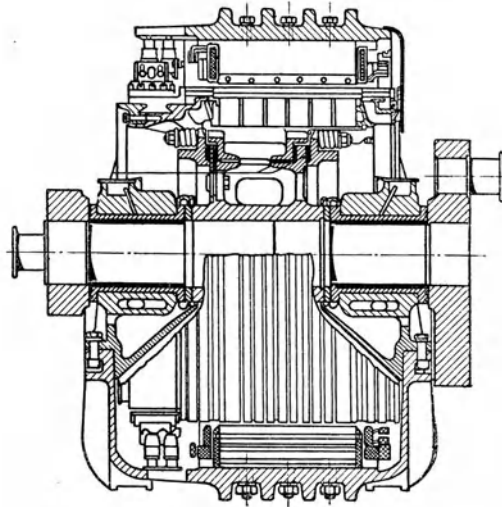


Abb. 249. Längsschnitt durch den Motor der Lokomotive Abb. 248 (Rutschkupplung).

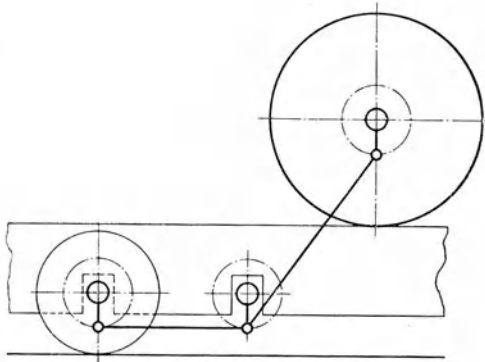


Abb. 250. Schema der Kraftübertragung mit Kurbelgetriebe vom Gestellmotor über eine Blindwelle zur Treibachse.

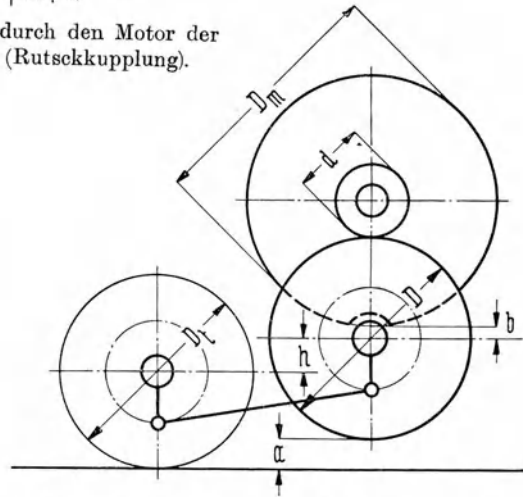


Abb. 251. Geometrie der Kraftübertragung mit Zahnradübersetzung und Kurbelgetriebe vom Gestellmotor zur Treibachse.

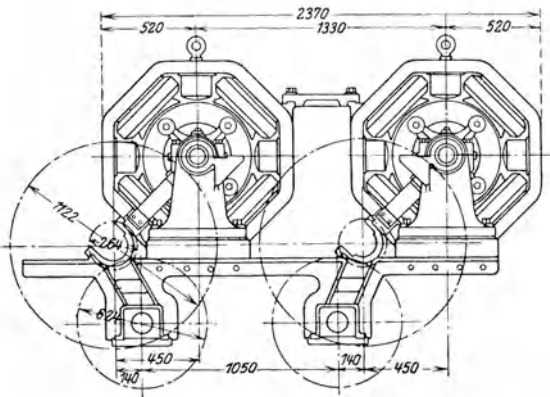
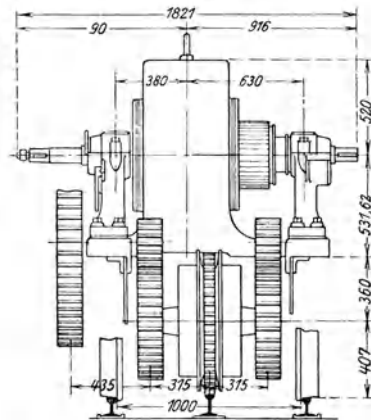


Abb. 252. 150 PS-Gestellmotoren mit doppelter Übersetzung einer Zahnbahnlokomotive (AEGU Rittnerbahn).



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.

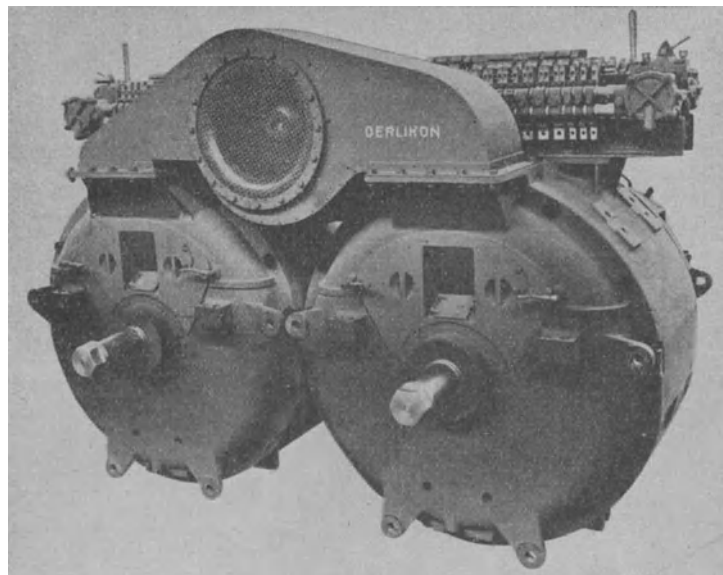


Abb. 253. Wechselstrom-Gestell-Doppelmotor mit Zahnradübersetzung für 1 - C + C - 1-Lokomotiven Reihe 12251 der SBB (MFO).

Leistung 1 1/2 h . . . je 560 PS	Umlauf in Min . . . 560
Dauerleistung . . . „ 425 „	Periodenzahl 16 2/3
Spannung 400/380 V	

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. 250).

Die zweite Gruppe der Gestellmotoren bilden Typen, die sich in der Hauptsache zum Zwecke der bei Eisenbahnfahrzeugen wichtigen Baustoffwirtschaft einer Zahnradübersetzung bedienen (Abb. 251 bis 256). 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 einer oder zweier Triebmaschinen auf mehrere Treib- bzw. Kuppelachsen übertragen wird. Die Zahl der Triebmaschinen braucht daher nicht mehr mit der Zahl der angetriebenen Achsen übereinzustimmen.

Je nach der Art des angewendeten Getriebes kann auch bei den übersetzten Motoren in gewissem Maße eine Unabhängigkeit

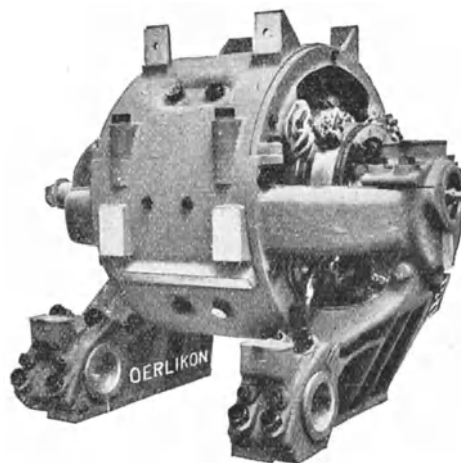


Abb. 254. Gestellmotor mit Vorgelege (MFO).

Stundenleistung . . . 400 PS, 570 Uml./min
Dauerleistung 250 PS, 650 Uml./min
Spannung 1500 V
Übersetzung 1 : 4,77

der Bemessung der Triebmaschine vom Raddurchmesser erzielt werden. Dies wird auch durch die bei Zahnradlokomotiven meist nicht fehlende doppelte Übersetzung erreicht (Abb. 252). Sofern jedoch die Vorgelegewelle 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

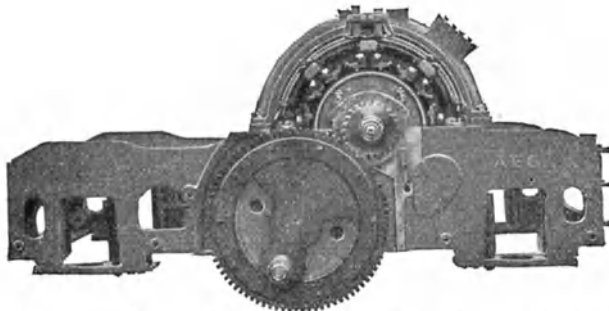


Abb. 255. Motor, Getriebe und Gestell der B + B-Lokomotive der preuß. Staatsbahnen, Reihe 511 (AEG).
Leistung . . 600/500 PS Drehzahl . . 600 Uml./min

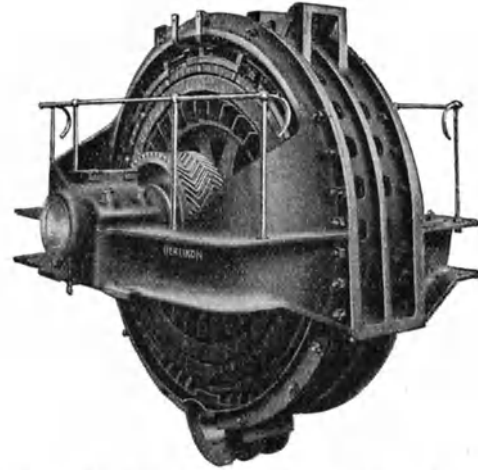


Abb. 256. Gestellmotor der 1 — E — 1-Lokomotiven der Lötschbergbahn mit einseitigem Zahnradantrieb (MFO).

Leistung (1 1/2 h) 1250 PS
Spannung 500 V
Übersetzung 1 : 2,23
Gewicht einschl. Zahnradgetriebe 14 t

Gestellmotors: freie Dimensionierung, niedrige Beanspruchungen, nicht gedrängte Bauart, allseitige Zugänglichkeit und Hochlage des Schwerpunktes preisgegeben.

Wie aus Abb. 251 zu entnehmen ist, bestehen folgende geometrische Beziehungen, wenn für den allgemeinen Fall eine Überhöhung h der Vorgelegewelle angenommen wird:

$$D_t + 2h = D + 2a; \quad \ddot{u} = \frac{D}{d};$$

$$D + d = D_m + 2b,$$

somit

$$D_m = D_t + 2[h - (a + b)] + d.$$

Für die Fahrgeschwindigkeit v km/h gilt

$$v = \frac{3,6 n \pi D_t}{60 \cdot \ddot{u}} = \frac{0,06 d n \pi D_t}{D_m}.$$

Die obigen Werte substituiert, findet man

$$v = 0,06 n \pi \frac{D_m - D_t + 2(a + b - h)}{1 + \frac{2(h - a)}{D_t}};$$

hieraus folgt der anwendbare Motordurchmesser im Zusammenhang mit den Betriebs- und Konstruktionsgrößen des Fahrzeuges:

$$D_m = D_t - 2(a + b - h) + v \frac{1 + \frac{2(h - a)}{D_t}}{0,06 n \pi}.$$

Man sieht, daß unter Beibehaltung der übrigen Größen in der Hauptsache durch Vergrößerung der Überhöhung h den geometrischen Wirkungen der Herabsetzung der

drehmomentes auf die Treibachsen rein umlaufender Maschinenelemente, obzwar schon eine der ersten Ausführungen zu diesem Zweck das Kurbelgetriebe verwendete (Abb. 262). Kinematisch folgt hieraus, daß bei einer Kraftübertragung mit rein umlaufenden Bestandteilen 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 keine nennenswerten Störungserscheinungen auftreten.

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 verlangt ebenso wie die Zahnradübersetzung im Hinblick auf die allgemeinen, für Bahnfahrzeuge bestehenden räumlichen Einschränkungen eine bestimmte Formgebung und räumliche Bemessung der Triebmaschinen, so daß die Bahnmotoren, wie schon erwähnt, eine eigene Sondergruppe der maschinellen Konstruktionen der Elektrotechnik bilden.

Mit Steigerung der Leistung über etwa 200 PS/h zwingt diese Raumbeschränkung und Getriebeanordnung zu erhöhten Beanspruchungen in mechanischer und elektrischer Beziehung. Hieraus ergibt sich eine Erschwerung der Bedienung und Erhaltung der Triebmaschinen, indem die einer Wartung bedürftigen Bestandteile schwer zugänglich werden.

Diese Sachlage steht im Widerspruch mit den strengen Anforderungen des Bahnbetriebes, welcher zur Wahrung der Ordnung 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 Anschauung. Er 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 im Untergestell verfügbaren Raum 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; daher müssen, um die zulässigen Achsdrücke überhaupt ausnützen zu können, hohe mechanische und elektrische Beanspruchungen gewählt werden, die auch wegen der räumlichen Einschränkungen des Zahngetriebes nötig sind.

Den Anforderungen des Bahnbetriebes werden demnach Triebmaschinen, deren Bauformen frei gewählt werden können und die sich denjenigen der ortsfesten Maschinen nähern, aber in bezug auf ihr Eigengewicht sparsam ausgelegt sind, am besten entsprechen. Derartige Maschinen erhalten jedoch Ausmaße, denen zufolge zur Verbindung der Ankerwelle mit dem Laufwerk Getriebe besonderer Art notwendig werden. Für diesen Zweck ist vornehmlich das den Dampflokomotiven entlehnte Parallelkurbelgetriebe verwendet worden. Dieses Getriebe ermöglicht es, eine Verbindung zwischen der im Gestell fest gelagerten Triebmaschine und dem Laufwerk derart durchzuführen,

das vor allem möglich ist, die Störung der Kinematik des Getriebes durch die Federung in unbedenklichen Grenzen zu halten, ohne dabei die Federung der Achsen zu beeinträchtigen.

Das Parallelkurbelgetriebe mit zwei um 90° versetzten Kurbelpaaren ändert die bei rein umlaufenden Getrieben bestehende Sachlage. Der stetige Umlauf der treibenden und getriebenen Massen erfährt bei dem im allgemeinen nicht ideal-genauen Getriebe 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.

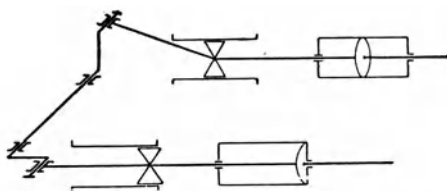


Abb. 260. Offenes Kurbelgetriebe einer Dampflok.

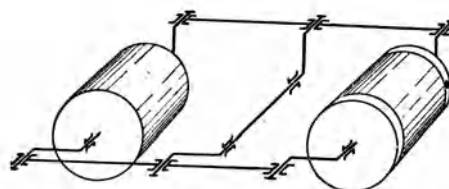


Abb. 261. Geschlossenes Parallelkurbelgetriebe für zwei Motoren mit Blindwelle.

Das aus zwei um je 90° versetzten Kurbelsystemen bestehende Kurbelgetriebe ist bei der Dampflok in zwei Formen in Gebrauch: zur Verbindung der Dampfmaschine mit der Treibachse (Abb. 260) 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. Für das geschlossene Parallelkurbelgetriebe ist in geometrischer Beziehung die Tatsache kennzeichnend, daß der synchrone, gleichphasige und ungestörte Umlauf jeder Seite und der beiden gekuppelten Systeme nur dann entstehen kann, wenn die Pleuellern und Pleuellern streng genau parallel und gleich lang sind. Ist dies nicht der Fall, so müssen bei jedem Durchlauf der Totlagen Zwängungen entstehen, um die Übereinstimmung der Umlauffahlen aufrechtzuerhalten.

Diesen Zwängungen und Streckungen des Getriebes entspricht Formveränderungsarbeit in den beteiligten Maschinenelementen, die einerseits den Nutzeffekt der Kraftübertragung beeinträchtigt, andererseits durch die damit verbundenen Impulse gefährliche Schwingungen des ganzen umlaufenden Systems verursachen kann.

Die Kinematik der Kuppelachsen arbeitet trotz gefederter Führung der Achsen im Gestell einwandfrei, weil die Lagerung aller gekuppelten Achsen gleichartig beschaffen ist und dem Federspiel nur äußerst geringfügige Längungen entsprechen. 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 die praktisch starr geschlossene Form des Parallelkurbelgetriebes zur Verbindung der Triebmaschinen untereinander und mit den Treibachsen gebräuchlich ist (Abb. 261).

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 jene oft schwerwiegenden Störungen zurückzuführen, die sich bei zahlreichen elektrischen Lokomotiven eingestellt haben. Es hat sich gezeigt, daß derartige Lokomotiven in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen heftigen Schüttelerscheinungen unterworfen sind, die in manchen Fällen sogar zu Brüchen des Getriebes geführt haben.

Die Ursachen dieser Erscheinungen können dem Wesen und ihrem Charakter nach als physikalisch erfaßt angesehen werden, wogegen die mathematische Bearbeitung noch zu keinem abgeschlossenen Ergebnis gelangt ist.

Der wesentlichste Unterschied zwischen dem offenen Kurbelgetriebe der Dampflokomotive und dem geschlossenen Parallelkurbelgetriebe des elektrischen Triebfahrzeuges

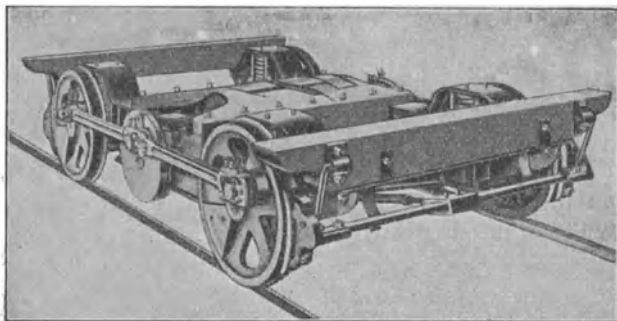


Abb. 262. Gestellmotor von Eikemeyer mit Parallelkurbelgetriebe (1890).

besteht darin, daß im ersteren nennenswerte, mit Trägheitskräften behaftete Massen überhaupt fehlen, wogegen für die elektrische Lokomotive das Vorhandensein vergleichsweise großer, schwingungsfähiger Massen innerhalb des Getriebes kennzeichnend ist. 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 Kurbelgetriebe

der Dampflokomotive die Zylinder- und Kreuzkopfreibung dämpfend wirkt, 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 des stationären Zustandes, 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 zwei Kurbeln tragenden Blindwelle verbunden wird.

Ein ebensolches Kurbel- und Stangensystem dient zur Kraftübertragung zu einer Treibachse. Es besteht zwischen diesen beiden Getrieben insofern ein Unterschied, als im ersten Fall beide gekuppelten 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, also ohne Überhöhung, erwünscht (Abb. 248, 257, 262), denn nur in diesem Fall entspricht dem Federspiel eine unbeträchtliche Streckung der Treibstange (Abs. b). Aus dem gleichen Grunde ist es ratsam, die Blindwelle nur mit einer Kuppelachse zu verbinden.

Die $1 - C + C - 1$ -Umformerlokomotive der Pennsylvaniabahn ist ein Beispiel für ein derartiges einwandfreies Getriebe (Abb. 263).

Bei zweiachsigen Fahrzeugen mit einer Treibwelle läßt sich manchmal beides — Überhöhung und Verbindung mit zwei Kuppelachsen — nicht umgehen; man ordnet

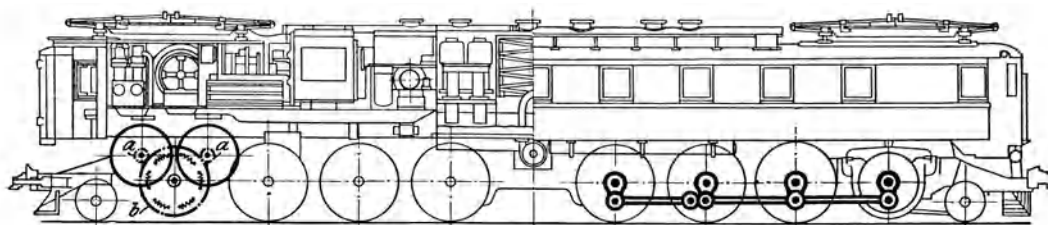


Abb. 263. Lokomotive Reihe 1917 der Pennsylvaniabahn, gefederte Zahnradübersetzung, Parallelkurbelgetriebe ohne Überhöhung.

Leistung	4800 PS	Triebgewicht	201 t
Achsfolge	$1 - C + C - 1$	Raddurchmesser	1830 mm
Gesamtgewicht	244 t	Zahnradübersetzung	1 : 5

dann die Schergabeln der Achsen nicht senkrecht, sondern schief, im rechten Winkel zur schiefen Stangenrichtung an (Lokomotiven der I. Reihe der Burgdorf-Thunbahn), wodurch die Geometrie der geradlinig gegliederten Kuppelstangen erzielt wird (Abb. 264).

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.

Kräfte spiel im Parallelkurbelgetriebe. Die als unveränderlich gedachte Umfangskraft P der Triebmaschine zerlegt sich, wie aus dem Schema (Abb. 265) 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

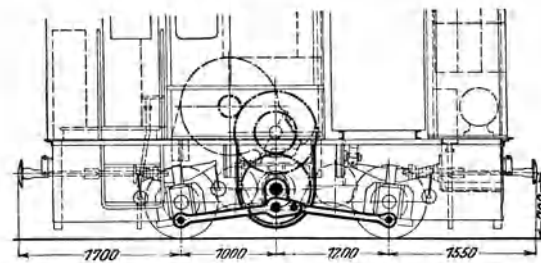


Abb. 264. Zweiachsige Schmalspurlokomotive mit doppelt übersetztem Gestellmotor, überhöhter Treibwelle, schiefen Schergabeln (AEGU).

$$\alpha = \omega t$$

gekennzeichnet ist.

$$P = S_1 \sin(\omega t) + S_2 \cos(\omega t) = S \dots \dots \dots (1)$$

Hier sind S_1 und S_2 vorläufig noch unbestimmte Größen; die Gleichung hat für ein ideell starres Getriebe als statisch unbestimmtes System unendlich viele Lösungen.

Die ausgeführten Parallelkurbelgetriebe sind im physikalischen Sinne keine starren Gebilde. Man kann vielmehr annehmen, daß in ihnen den Stangenkräften proportionale Längenänderungen vor sich gehen, da 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 auf die Stangenrichtung einer am Kurbelkreis in der Tangentenrichtung gemessenen Strecke dx angesehen werden (Abb. 265).

Die Längenänderung der Stange entspricht den Stangenkräften, so daß

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{dx \sin \alpha}{dx \cos \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \dots \dots \dots (2)$$

Substituiert man den sich hieraus für S_2 ergebenden Wert

$$S_2 = S_1 \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}$$

in die Gl. 1, so 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

$$S_1 = S \sin \alpha, \quad \text{ebenso} \quad S_2 = S \cos \alpha$$

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.

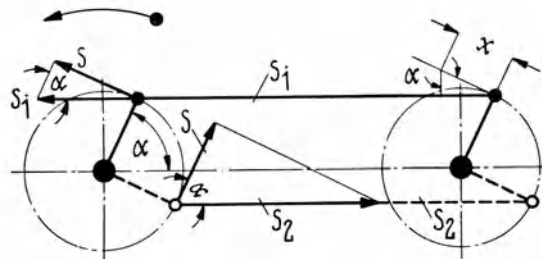


Abb. 265. Zerlegung der stetigen Umfangskraft in periodisch wechselnde Stangenkräfte.

Die an den beiden Pleuelzapfen angreifenden Kräfte, in die sich die stetige Umfangskraft der Triebmaschine unter Voraussetzung verhältnismäßiger Verformungen der Stangen zerlegt, folgen dem \sin^2 - bzw. \cos^2 -Gesetz.

Da die in der Hauptsache in Frage kommende Verformung der Stangen $dx \sin \alpha$ und $dy \cos \alpha$ am Pleuelkreisumfang in der Tangentenrichtung durch die Länge dx und diese durch den Voreilwinkel φ bzw. die Bogenlänge $r\varphi$ gemessen

wird, so folgt, daß in Hinblick auf die geometrischen Voraussetzungen des Parallelkurbelgetriebes eine Störung der Kinematik der durch elastische Stangen geschlossenen Kette nur dann nicht eintritt, wenn, trotz harmonisch wechselnder Stangenkräfte, die an den beiden Getriebeseiten nur in den 45° igen Sonderstellungen gleich groß sind, den beiden Getriebeseiten gleich große Voreilwinkel entsprechen. Wäre dies nicht der Fall, so müßten die Pleueln und Wellen durch entsprechende Verdrehung die Unterschiede der Winkel ausgleichen, was ohne gewaltsame Zwängungen nicht möglich ist.

Entsprechend den gemachten Voraussetzungen wird die Stangenkraft gemessen durch die Verformung der Stange, somit ist

$$S_1 = \gamma dx \sin \alpha,$$

wo γ den Nachgiebigkeitsgrad des Systems bezeichnet; es ist

$$dx = r\varphi,$$

daher

$$S_1 = \gamma r\varphi \sin \alpha.$$

Früher wurde abgeleitet, daß

$$S_1 = S \sin \alpha, \quad \text{somit} \quad S = \gamma r\varphi = \text{konst.}$$

Für ein System mit zeitlich unveränderlicher Elastizität ($\gamma = \text{konst.}$) ist der Voreilwinkel der treibenden Pleueln unveränderlich und nur von der Summe der Stangen-

kräfte abhängig; die Kraftübertragung ist stetig. Die Phase der treibenden Kurbeln eilt dem Winkel der angetriebenen Kurbeln um den zeitlich unveränderlichen und dem übertragenen Drehmoment verhältnismäßigen Winkel φ vor.

Die vorstehende Ableitung gilt für ein aus zwei Stangen und zwei Kurbelwellen mit um 90° versetzten Kurbeln bestehendes System, somit vor allem für das die Kuppelachsen verbindende, einebenige Kurbelgetriebe, wobei die Wirkung des Feder-spieles außer Acht bleiben kann.

Aus obigem Ergebnis folgt, daß selbst das ideale Parallelkurbelgetriebe, bei welchem beide, um 90° gegeneinander versetzte Stangensysteme in gleicher Weise an der Kraftübertragung teilnehmen, insofern unvollkommen ist, als bei halbem mittleren Drehmoment einer Seite, jede Seite für die volle Umfangskraft bemessen werden muß.

Der Kurbelwellen-Lagerdruck schwankt in der Stangenrichtung zwischen den Grenzwerten $\pm 0,707 S$.

Kennzeichnend für dieses Getriebe ist das dem Kräftespiel in den Stangen entsprechende Pendeln der Leistung durch die Kurbelwelle, und zwar 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

$$S_1 = \frac{K}{\sin \alpha} \quad \text{und} \quad S_2 = \frac{K}{\cos \alpha},$$

wobei 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 Wirkungsweise des Kurbelgetriebes der Dampflokomotive und desjenigen der elektrischen Lokomotive augenfällig. Bei dem 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 Parallelkurbelgetriebe elektrischer Lokomotiven ihren festen endlichen Wert in jeder Kurbelstellung beibehält.

In den Stellungen

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad \text{und} \quad \frac{3\pi}{2} \quad \text{usw.}$$

stimmen die Stangenkräfte des ideal vollkommenen und ideal unvollkommenen Getriebes überein und sind gleich der Umfangskraft.

Die Getriebe können tatsächlich mit der für die Ausmittlung des Kräfteplanes angenommenen, idealen Geometrie nicht hergestellt werden, vielmehr sind Stichmaßfehler, Abweichungen in der Winkelstellung und Länge der Kurbeln, zeitlich veränderliche elastische Verformungen und schließlich Lagerspiele unvermeidlich. Die Folge dieser Abweichungen von der für die geschlossene kinematische Kette vorausgesetzten Geometrie ist eine wesentliche Änderung des Kräftespieles in den Stangen innerhalb der Grenzen der beiden betrachteten Sonderfälle, selbst ohne Berücksichtigung der Massenwirkungen und Störungskräfte, die ihrerseits tiefgreifende Folgen haben können.

Von besonderem Einfluß auf den Verlauf der Kraftübertragung hat sich das unter praktischen Verhältnissen unvermeidliche Lagerspiel des Getriebes erwiesen.

Die in der Hauptsache in Betracht kommenden Verformung der Stangen kann, wie gezeigt wurde, in Abhängigkeit von der Kurbelstellung durch den Ausdruck

$$r \varphi \sin \alpha \quad \text{und} \quad r \varphi \cos \alpha$$

dargestellt werden, wenn $r\varphi$ die am Kurbelkreis gemessene Voreilung des antreibenden Kurbelsystems gegenüber dem getriebenen System ist.

Diese Annahme enthält dann einen Widerspruch, wenn für die Stangenkräfte das Sinusgesetz vorausgesetzt wird, trotzdem eben im Zusammenhang mit dem Lagerspiel ein mindestens teilweise veränderter Verlauf derselben eintritt. Die Annahme eines

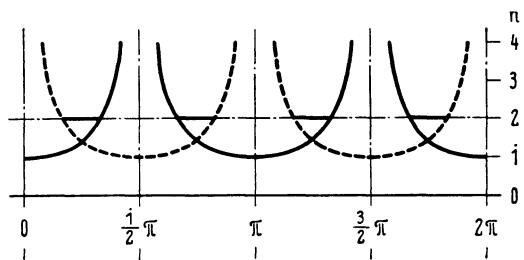


Abb. 266. Verlauf des Stangeneingriffes in Abhängigkeit von der Winkelstellung der Kurbeln; Voreilwinkel im Kurbelkreis gemessen (Ordinaten).

harmonischen Kräftespieles darf nur für den Bereich gleichzeitigen Eingriffes beider Getriebeseiten aufrechterhalten werden.

Bei Lagerspiel (a) vermindert sich die obige Verformung.

Für die Stangenkräfte gelten, wenn der als unveränderlich angenommene Nachgiebigkeitsgrad des Systems γ ist, die Gleichungen

$$S_1 = \gamma (r\varphi \sin \alpha - a);$$

$$S_2 = \gamma (r\varphi \cos \alpha - a),$$

vorausgesetzt, daß das Lagerspiel beider Seiten gleich groß ist.

Das zu übertragende Drehmoment kann sodann wie folgt 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

$$r\varphi \sin \alpha > a$$

und

$$r\varphi \cos \alpha > a,$$

denn nur in diesem Falle gelangt der Kurbelzapfen mit dem Stangenlager in Eingriff (Abb. 266).

Wenn

$$r\varphi < \frac{a}{\sin \alpha} \quad \text{und} \quad r\varphi < \frac{a}{\cos \alpha},$$

ist ein Eingriff überhaupt, also auch für den Fall, daß $\sin \alpha$ und $\cos \alpha$ ihren Höchstwert 1 erreichen, nicht möglich.

Für die Werte $a < r\varphi < 1,41 a$ setzt die Kraftübertragung zeitweilig aus, die Triebmaschine wird in den eingrifflosen 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. 267 ist erkenntlich, daß die ideale Kraftverteilung im Getriebe mit um so größerer Annäherung erreicht wird, je größer die elastische Verformung im Vergleich zum Lagerspiel ist, denn um so mehr überdecken sich die gegenseitigen Arbeitsgebiete beider Stangenseiten.

In Abb. 267 ist der Verlauf der Stangenkräfte sowohl für ein ideal gutes Getriebe mit harmonischem Kräftespiel als auch für nur einseitigen Eingriff dargestellt. Unter der Annahme, daß $r\varphi = 2a$ ergeben sich gemäß Abb. 266 die Bereiche des gleichzeitigen und einseitigen Stangeneingriffes. Im ersten Fall gilt das Sinusgesetz, im zweiten Fall

das $1:\sin\alpha$ -Gesetz, was in Abb. 267 durch den stark gezeichneten Linienzug zum Ausdruck gebracht ist.

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 zum Eingriff kommen kann.

Die Bedeutung der Elastizität des Getriebes tritt durch diese Betrachtung in Erscheinung.

Der Verlauf der der Eingriffslinie $r\varphi = na$ entsprechenden $n=2$ Kräftespieles (Abb. 267) 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 durch wesentliche Steigerung der Beanspruchungen verursachte Veränderung erfahren kann. Getriebeanordnungen, die in diesem Belange einwandfrei ausgelegt sind, sollen daher angestrebt werden.

Daß bei dem mit Herstellungsfehlern behafteten Kurbelgetriebe Lagerspiele notwendigerweise auftreten müssen, beweist die Nachrechnung eines bestimmten und zwar günstig ausgelegten Falles. Die durch Längen- oder Kurbelfehler verursachten Abweichungen von den genauen geometrischen Bedingungen des Kurbelviereckes treten augenfällig und unmittelbar meßbar in der Strecklage, d. i. im Totpunkt in Erscheinung. Dieser Fehler, also der Unterschied zwischen Wellenmitteabstand + Treibkurbellänge einerseits und Stangenlänge und getriebener Kurbel andererseits betrage 2 mm. Die

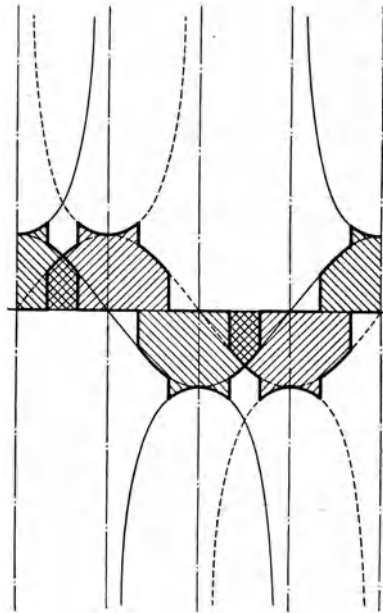


Abb. 267. Verlauf der Stangenkräfte in einem aus zwei gegeneinander um 90° versetzten Systemen bestehenden Kurbelgetriebe für $r\varphi = 2a$ in Abhängigkeit von der Kurbelstellung.

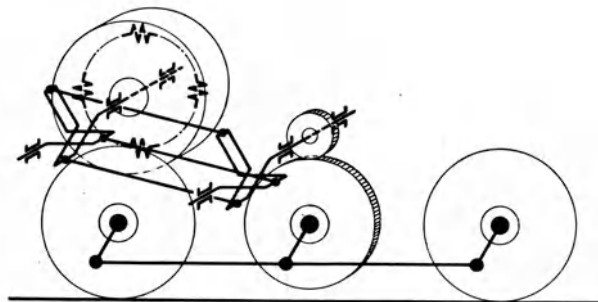


Abb. 268. Massenfreies Kurbelgetriebe.

Stangenlänge sei 3000 mm, der Querschnitt 60 cm^2 , die Proportionalitätsgrenze des verwendeten Stahles $\sigma_P = 1300\text{ kg/cm}^2$, der Elastizitätsmodul $E = \frac{1}{\alpha} = 2000000\text{ kg/cm}^2$, dann ist die absolute Dehnung $\Delta l = \frac{1300 \cdot 3000}{2000000} \cong 2\text{ mm}$ und die entsprechende Stangenkraft 78000 kg, d. i. etwa das 2,5fache derjenigen Beanspruchung, für welche diese Stange bemessen wurde.

Die zerstörende Wirkung einer derartigen, während jeder Umdrehung zweimal in

der Totlage auftretenden Beanspruchung liegt auf der Hand. Dynamisch verursacht sie durch die Entladung in die treibende Masse Stetigkeitsstörungen des Umlaufes.

Die Auflösung des starren Schlusses der kinematischen Kette des Kurbelgetriebes erweist sich als zweckdienliche Maßregel, um auf diesem Wege den Stangenkräften und damit der Größe der Impulse eine bestimmte Grenze zu setzen.

Von diesem Standpunkt ist auch der Zweistangenantrieb ohne Blindwelle bemerkens-

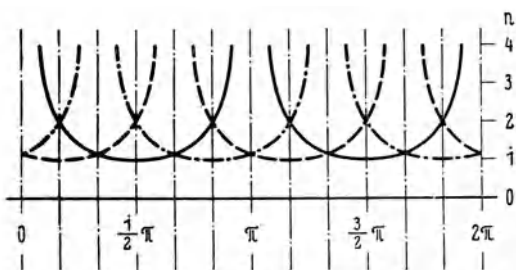


Abb. 269. Eingriffslinien des Dreiphasengetriebes in Abhängigkeit von der Kurbelstellung.

wert. Bei dieser Anordnung ist der starre Schluß zwischen den beiden Getriebeseiten aufgelöst. Da außerdem jeder Schwingung ein Spiel des Zapfens in der Kulisie entspricht, wird durch die Seitenreibung des Steines in den Führungen eine wirksame Dämpfung erzielt.

Die Auflösung der geschlossenen kinematischen Kette des Kurbelgetriebes ist von der MFO bei den 1—C+C—1-Lokomotiven Reihe 12251, Abb. 293, der SBB mit Erfolg versucht worden; die hier vorgesehene

federnde Lagerung der Blindwelle ist gleichwertig einer in die Stangen gelegten Federung.

Den späteren Betrachtungen vorgreifend ist ein aus drei gegeneinander um je 120° versetzten Kurbeln und drei Stangen bestehendes Dreiphasengetriebe (Abb. 268) zu erwähnen.

Aus dem Kräfteplan dieses Systems geht hervor, daß unter Voraussetzung einer gleichgroßen Elastizität der drei Kurbelsysteme und eines harmonischen Spieles der Stangenkräfte jede Stange mit $\frac{2}{3}$ der Umfangskraft beansprucht wird.

Daß das System für sich schon ausgewuchtet ist, wenn man davon absieht, daß die drei Stangen nicht in einer Ebene liegen, 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

$$M = \frac{3}{2} Kr \quad K = \frac{2}{3} \left(\frac{M}{r} \right).$$

Die Summe zweier Stangenkräfte ist 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.

Auch bei Lagerspiel sind die Eingriffsverhältnisse augenfällig günstiger als beim gewöhnlichen Parallelkurbelgetriebe. Der Eingriff wird schon für $r\varphi \leq 1,07 a$ stetig (früher erst bei $r\varphi \geq 1,41 a$); bei $r \geq 2 a$ sind stets zwei Stangen an der Kraftübertragung beteiligt (Abb. 269).

Wenn man sich weiter vor Augen hält, daß beim Zweikurbelsystem die 45° Kurbelstellungen insofern ausgesprochen bevorzugte Lagen sind, als in diesen der gleichzeitige Eingriff beider Stangen am ehesten eintritt und die beiden Stangenkräfte gleich groß sind, so können daraus für das Dreiphasengetriebe insofern noch günstigere Eingriffsverhältnisse gefolgert werden, als bei diesem die Gleichheit der Stangenkräfte dauernd besteht.

Die praktische Ausführung eines derartigen Getriebes scheidet allerdings an konstruktiven Schwierigkeiten.

b) Die Schlitzkuppelstange. Das mit den Kuppelachsen einebenige Parallelkurbelgetriebe arbeitet nur bei einseitiger Verbindung mit den Achsen einwandfrei,

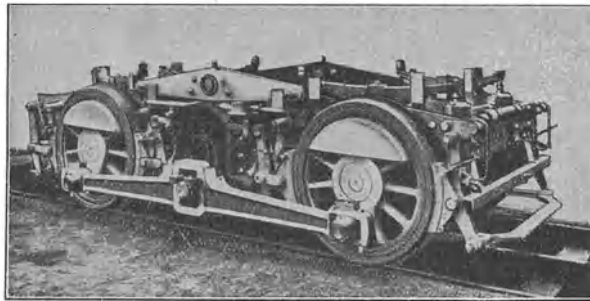


Abb. 270. Kurbelgetriebe mit Schlitzkuppelstange der Triebwagen der Preußischen Staatsbahnen (AEG).

Überhöhung h 80 mm
 Stangenlänge l 2500 „
 $\frac{l}{h} \approx 31$

andererseits schließen die Außenmaße der Triebmaschine oder des großen Zahnrades oft die einebenige Anordnung aus. Die Treibwelle muß in diesem Fall überhöht über

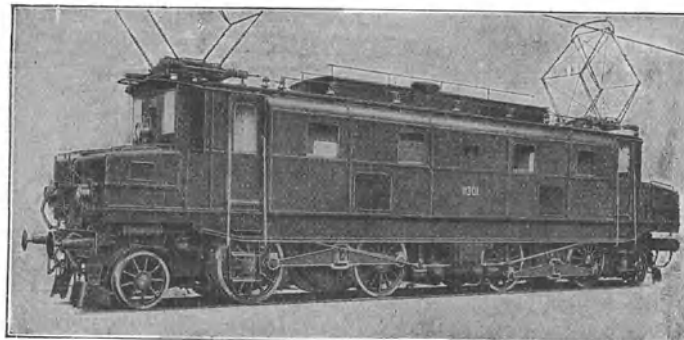


Abb. 271. 1 — B + B — 1-Lokomotive, Reihe 11301, der SBB mit Schlitzkuppelstange. (MFO — SLFW).

Stangenlänge 2900 mm Überhöhung 120 mm
 $\frac{l}{h} \approx 24$

den Kuppelachsen angeordnet werden (Abb. 270, 271). In beiden Fällen bietet die Schlitzkuppelstange einen Ausweg, da diese vom Federspiel unbeeinflusst bleibt, daher ein zweiseitiger Anschluß der Treibkurbel an die Kuppelachsen zulässig erscheint; andererseits können, wie gezeigt werden soll, mäßige Überhöhungen der Treibwelle zugelassen werden.

Abb. 272 stellt schematisch die Schlitzkuppelstange mit einer Überhöhung h der Treibwelle dar.

Dem Federspiel f entspricht eine wagrechte Wanderung x des Scheitelpunktes, an dem die treibende Kurbel angreift.

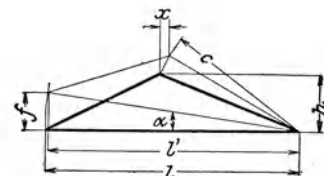


Abb. 272. Geometrie der Schlitzkuppelstange.

Aus der Geometrie des Systems folgt:

$$\begin{aligned}
 x &= b - c \cos(\alpha + \beta) \\
 x &= b - c [\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta] \quad \text{und} \quad b = \sqrt{c^2 - h^2} \\
 \cos \alpha &= \frac{l'}{l} = \frac{\sqrt{l^2 - f^2}}{l}, \quad \sin \alpha = \frac{f}{l} \\
 \cos \beta &= \frac{b}{c} = \frac{b}{\sqrt{h^2 + b^2}}, \quad \sin \beta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + b^2}} \\
 x &= b - \left(\sqrt{h^2 + b^2} \left[\frac{b}{l} \sqrt{\frac{l^2 - f^2}{h^2 + b^2}} - \frac{h}{l} \frac{f}{\sqrt{h^2 + b^2}} \right] \right) \\
 x &= b - \left(\frac{b}{l} \sqrt{l^2 - f^2} - \frac{h}{l} f \right) \\
 x &= b - b \frac{l'}{l} + \frac{h}{l} \cdot f.
 \end{aligned}$$

Angenähert ist $\frac{l'}{l} \cong 1$, daher

$$x \cong \frac{h}{l} \cdot f;$$

z. B.: für

$$\frac{h}{l} = \frac{1}{10} \quad \text{und} \quad f = 20 \text{ mm}$$

entspricht der Federung eine wagrechte Längenänderung von etwa 2 mm.

Es ist einleuchtend, daß eine derartige Längenänderung den zulässigen Wert der Lagerspiele und die elastischen Dehnungen des Systems weit übertrifft. Schon eine Überhöhung von $\frac{1}{20}$ verlangt eine harte Federung des Fahrzeuges.

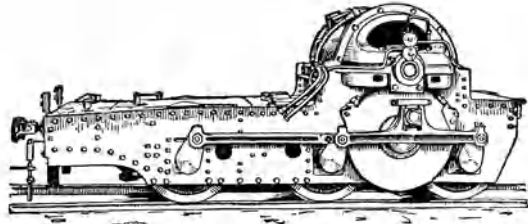


Abb. 273. Untergestell der 300 PS-C+C-Lokomotive der Mariazellerbahn, 1. Reihe, mit kurzer Schlitzkuppelstange (ÖSSW).

Die Schlitzkuppelstangen der beiden Reihen der Lokomotiven der Mariazeller-Bahn bilden ein anschauliches Beispiel dafür, wie bei dreiachsigen Gestellen und kleinen Radständen die ursprünglichen Maßverhältnisse (Abb. 273) behoben werden können (Abb. 274). Die Überhöhung der Treibwelle beträgt bei diesen Lokomotiven etwa 190 mm; in der ursprünglichen Anordnung war die Stangenlänge 1200 mm, das Verhältnis $\frac{l}{h} = \frac{120}{19} \cong 6$. Durch Übergreifen der Stange auf die erste Achse wurde unter

Beibehaltung aller andern Anordnungen ein Verhältnis $\frac{2400}{19} \cong 12$ 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 das gesamte Drehmoment der Triebmaschine übertragen, weil die treibende Kurbel im Schlitz angreift.

Den gleichen geometrischen Gesetzen ist der Antrieb einer schräg liegenden, an einem Kurbelzapfen angreifenden Treibstange unterworfen (Abb. 275), wobei jedoch nur die Federung einer Achse auf die Treibwelle von Einfluß sein kann.

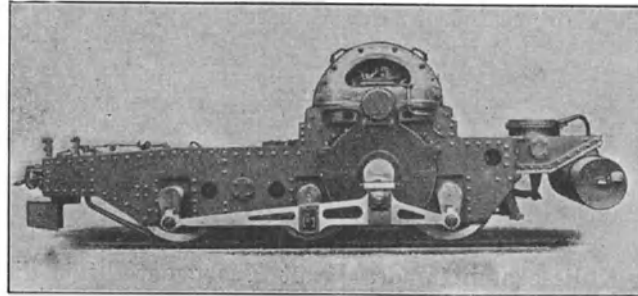


Abb. 274. Untergestell der 300 PS- $C+C$ -Lokomotiven der Mariazellerbahn, 2. Reihe, mit langer Schlitzkuppelstange (OSSW).

Praktisch kommt bei dieser Mechanik der Vorteil zur Geltung, daß die Stange eine vergleichsweise große Länge erhält und nachstellbar eingerichtet werden kann. In den bisherigen Ausführungen ($C+C$ -Lokomotive der Lötschbergbahn Abb. 275 und $1-C+C-1$ -Lokomotive von B.B.C. für die S.B.B. Abb. 503) hat man einem

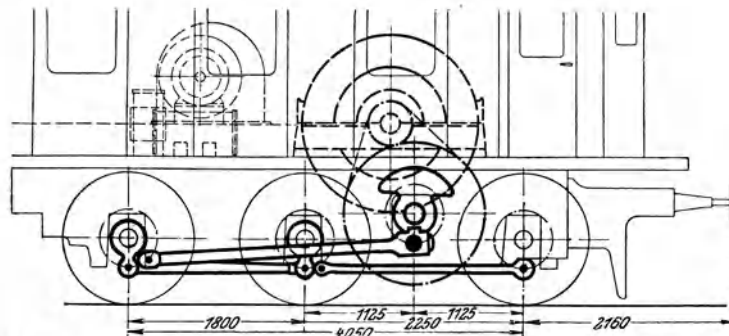


Abb. 275. Untergestell und Getriebe der $C+C$ -Lokomotive der Lötschbergbahn, 1910. Angelenkte Treibstange, Überhöhung der Blindwelle 253 mm. Treibraddurchmesser 1350 mm, Motorleistung 1000 PS/h (MFO —SLFW).

einebenen Getriebe den Vorzug gegeben und die Treibstange mit einem Auge an eine Kuppelstange angelenkt, wahrscheinlich um die beim zweiebenen Getriebe nötigen langen Zapfen zu vermeiden und den Zapfen der Kurbel des Treibrades zu entlasten.

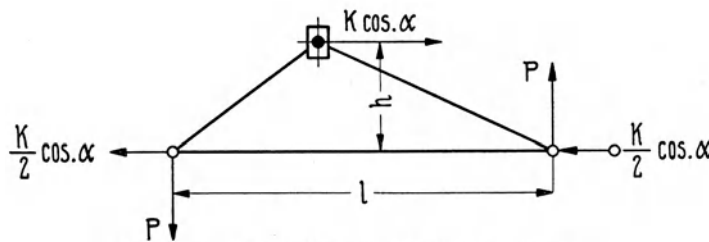


Abb. 276. Kräfteplan der Schlitzkuppelstange.

Der Kräfteplan der Schlitzkuppelstange ist in Abb. 276 dargestellt. Das an den Treibachsen angreifende Gegendrehmoment ist

$$M_w = Kr = Q_1 r \cos \alpha + Q_2 r \sin \alpha;$$

auf Grund der Ableitung für das Parallelkurbelgetriebe gilt:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha},$$

wobei Q_1 und Q_2 die Kurbelkräfte in der Kulisse sind; daher ist

$$M_w = Q_1 r \left(\cos \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right) = Q_1 r \frac{1}{\cos \alpha},$$

$$K r = Q_1 r \frac{1}{\cos \alpha},$$

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

$$P l = K \cos \alpha h,$$

$$P = K \cos \alpha \frac{h}{l}$$

bestimmt.

Die Lagerdrücke (R) in den beiden Stangen entsprechen den Mittelkräften aus P und $\frac{K}{2} \cos \alpha$; daraus folgt:

$$R = \frac{K}{3} \cos \alpha \sqrt{1 + \frac{4h^2}{l^2}}.$$

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 Verbindungslinien der Stange.

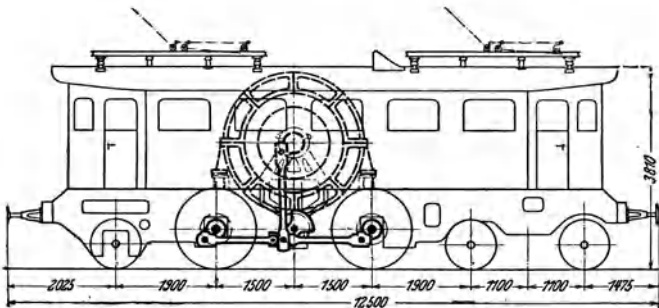


Abb. 277. 1—B—2 S.-Z.-Lokomotive der Preuß. Staatsbahnen mit senkrechter Treibstange und Blindwelle.

Den senkrechten Reaktionen entspricht einerseits eine Belastung, andererseits eine Entlastung der Federn, wodurch bei bestimmten Drehzahlen störende Bewegungen (Nicken des Fahrzeuges) verursacht werden können. Diese Wirkung stört den ruhigen Gang um so mehr, als die Momente an den beiden Maschinenseiten um 90° in der Phase verschoben sind.

Diese Umstände sprechen dafür, geringe Überhöhungen anzustreben.

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. 534.)

c) Das Parallelkurbelgetriebe mit Blindwelle. Die beiden vorbehandelten Getriebearten setzen keine oder eine vergleichsweise geringe Überhöhung der treibenden Kurbelwelle über die Kuppelachsen voraus. Sofern eine Hochlage unvermeidlich oder erwünscht ist, müssen zur Verbindung der Treibwelle mit den Kuppelachsen zwei Parallelkurbelgetriebe und eine Blindwelle vorgesehen werden. Die 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. 277).

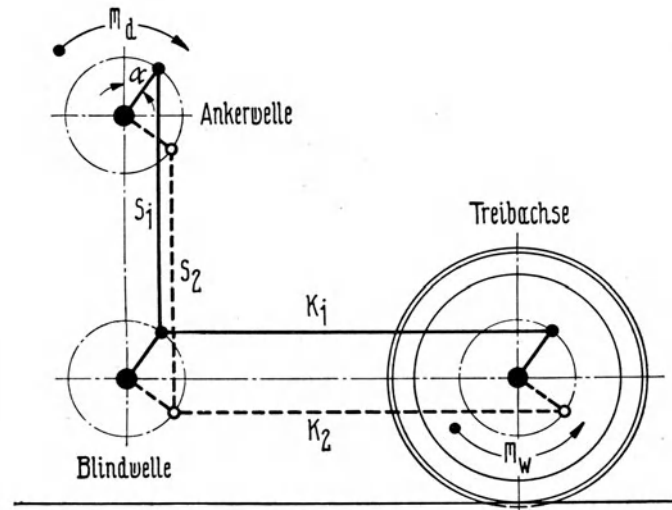


Abb. 278. Schema der Kraftübertragung mit senkrechter Treibstange und Blindwelle.

Unter den früheren Voraussetzungen kann man für beide Stangensysteme das gleiche Gesetz für die Zerlegung der Kuppelstangenkräfte annehmen; es wird dann

$$K_2 = K \cos \alpha, \quad K_1 = K \sin \alpha \quad \text{und} \quad S_1 = K \sin \alpha, \quad S_2 = K \cos \alpha.$$

An einem Zapfen greifen die zueinander senkrechten Stangenkräfte (Abb. 278) 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 daher 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 eines Umlaufs auch umläuft.

Die Richtung der Kraft gegen die Wagrechte ist bestimmt durch die Gleichung

$$\frac{K \sin \alpha}{K \cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha,$$

d. h. die Neigung der Mittelkraft entspricht dem Winkel α . Der Zapfendruck von der unveränderlichen Größe K dreht sich um den ruhend gedachten Zapfen, 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 Lager spielen, 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.

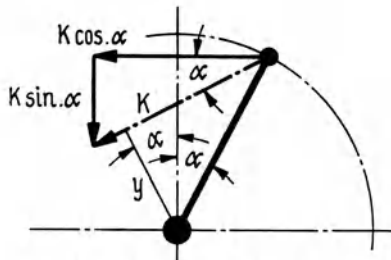


Abb. 279. Kräfteplan für den Blindwellen-Kurbelzapfen für das Getriebe
Abb. 272.

Da die Umfangskraft der elektrischen Triebmaschine konstant ist und die Kurbeln in den beiden Totlagen keine Kräfte an die Stange übertragen können, folgt, daß das zu übertragende Drehmoment zwischen den beiden Kurbeln der Blindwelle durch diese 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. 279).

$$M = K y, \text{ wobei } y = r \cos 2\alpha$$

$$M = K r \cos 2\alpha = M_w \cos 2\alpha.$$

Diese ungünstige Art der Beanspruchung der Blindwelle setzt reichliche Bemessung hochwertiger Baustoffe und sorgfältige Erzeugung voraus.

Für den allgemeinen Fall eines beliebigen Winkels β der Stangenrichtung zwischen Motor und Blindwelle gegenüber der Senkrechten gilt bezüglich der Stangenkräfte (Abb. 280):

$$P_1 = K \cos \alpha, \quad P_2 = K \sin \alpha$$

$$Q_1 = K \sin(\alpha + \beta), \quad Q_2 = K \cos(\alpha + \beta).$$

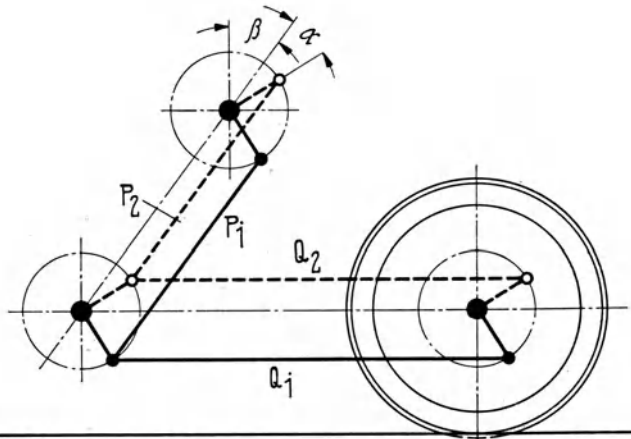


Abb. 280. Kurbelgetriebe mit schräger Treibstange und Blindwelle.

Hieraus folgt:

$$S = K \cos \beta,$$

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.

Das gleiche Ergebnis läßt sich auch für das Lager der Kurbelwelle ableiten.

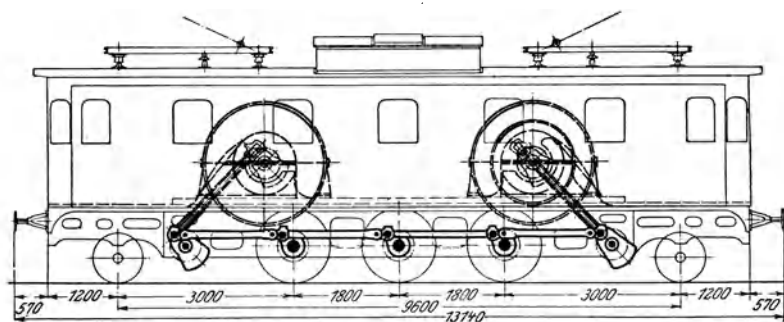


Abb. 281. Lokomotive der Französischen Südbahn mit zwei Schrägstangenantrieben und zwei Blindwellen.

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, dem die Blindwelle dienen soll: die freie Bemessung der Motoren und die Hochlage der Triebmaschinen im Gestell.

Der Schrägantrieb ist in Verbindung mit zwei Triebmaschinen auch doppelt mit zwei Blindwellen, die untereinander über die Kuppelachsen durch gegliederte Stangen

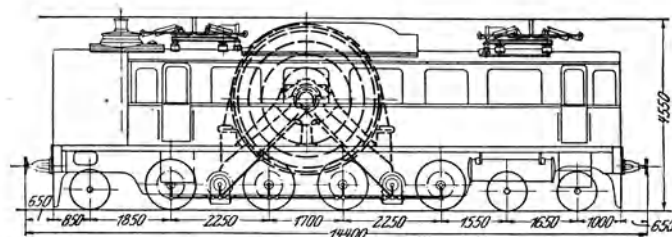


Abb. 282. Schema der Kraftübertragung mit zwei schrägen Stangen und zwei Blindwellen. Schnellzugslokomotive Reihe EP 235 der preuß. Staatsbahnen (BEW).

Achsfolge	2 - D - 1	Rezeleistung	3000 PS
Dienstgewicht	108 t	Raddurchmesser	1250 mm
Reibungsgewicht	66 t	Höchste Drehzahl	360/min

oder durch Schlitzkuppelstangen verbunden sind, ausgeführt worden (Abb. 281). 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. 282) die Leistung eines 3000-PS-Motors auf zwei Blindwellen mit zwei von jeder Kurbel gegeneinander unter 90° Neigung abgehenden Schrägstangen. Obzwar 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 Schwebungen. 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 weiters ein besonderes Merkmal dieses Getriebes sein: die vom Verfasser vertretene, stetige Kraftübertragung durch Stangen, die hier zum ersten mal, wenn auch unvollkommen, versucht wurde.

Es ist offenkundig, daß die von einem Ankerkurbelzapfen abgehenden, gegeneinander 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 die gleiche ist, erfolgt die Kraftabgabe vom Anker an beide Seiten stetig mit je der halben Leistung. In bezug auf die Blindwellen, die einseitig je

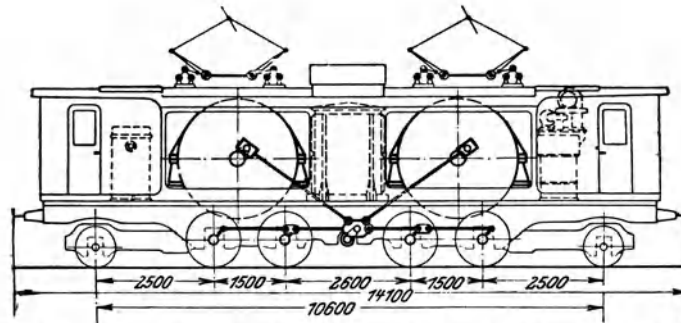


Abb. 283. Lokomotive. Reihe EP 201, der preuß. Staatsbahnen, mit Zweistangenantrieb und Blindwelle.

Achsfolge	1—D—1	Reibungsgewicht	64 t
Dienstgewicht	92 t	Triebraddurchmesser	1050 mm
Höchste Drehzahl	455/min		

nur eine Stangenkraft übernehmen, ist dies nicht mehr der Fall, jedoch in bezug auf den gesamten Dreieckrahmen bzw. auf die beiden Blindwellen zusammen.

Aus der auch einseitig stetigen Kraftabgabe dieses Antriebes folgt weiter, daß es eigentlich unnötig ist, den rechtwinkeligen Dreiecksantrieb zweiseitig zu wiederholen, es genügt, den Anker der Triebmaschine einseitig mit einer Kurbel zu versehen und von dieser über das Dreieck die beiden, der Sicherheit halber zweiseitig mit Kurbeln versehenen Blindwellen anzutreiben, mit denen die Achsen zu kuppeln sind. Lediglich um die Totlage der Achskurbeln zu überholen, und so auch für unvorhergesehene Fälle die Stabilität des Antriebes zu sichern, ist es zweckmäßig, die Kuppelachsen ein zweites Mal über um 90° versetzte Kurbeln zu verbinden. Die einseitige Kraftübertragung durch das Dreieck hätte den Vorteil, daß die sonst in zweiseitig gekuppelten Parallelkurbelantrieben vorhandene statische Unbestimmtheit umgangen ist; allerdings treten größere Verdrehungsbeanspruchungen in den Wellen auf.

Lotter verwendet in weiterer Ausnützung der Vorteile der durch den rechtwinkeligen Dreiecksantrieb erzielbaren stetigen Kraftübertragung diesen Antrieb in Verbindung mit Zahnradmotoren; in diesem Fall kann jede Zahnradseite für das halbe Drehmoment bemessen werden.

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 an Augen der Treibstange angelenkt. Will man die Beeinflussung der Blindwelle durch die angeschlossenen Kuppelstangen vermeiden, so kann das Getriebe zweiebenig ausgeführt

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° dieses Zapfendruckes, gemessen in bezug auf die Wagerechte, ist

$$\varepsilon = \alpha + \beta - \vartheta.$$

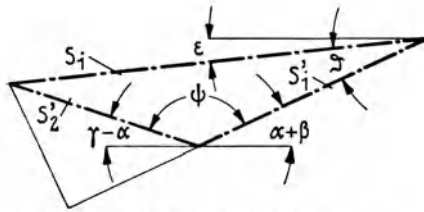


Abb. 285. Kräfteplan der Beanspruchung des Blindwellen-Kurbelzapfens beim Zweistangenantrieb.

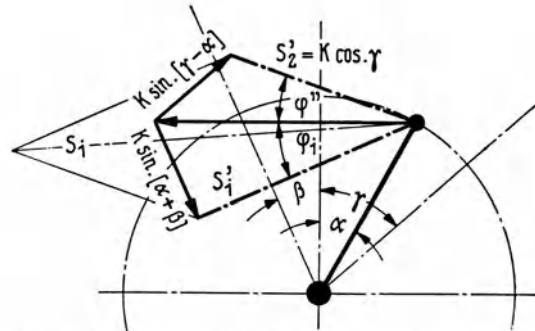


Abb. 286. Kräfteplan für den Kurbelzapfen der Blindwelle beim Zweistangenantrieb.

Aus den Abb. 285, 286 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 $\beta = \gamma$, dann wird

$$S_2' \sin 2\beta = S_1 \sin \vartheta$$

und

$$\frac{\sin \vartheta}{\sin 2\beta} = \frac{S_2'}{S_1} = \frac{K \cos \beta}{2 K \cos^2 \beta},$$

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 Triebkraft 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 weiters, daß

$$\varepsilon = \alpha + \beta - \vartheta \quad \text{und da } \vartheta = \beta \quad \text{auch } \varepsilon = \alpha,$$

d. h. der Zapfendruck wandert entsprechend dem Winkel α in entgegengesetzter Richtung um den Zapfen.

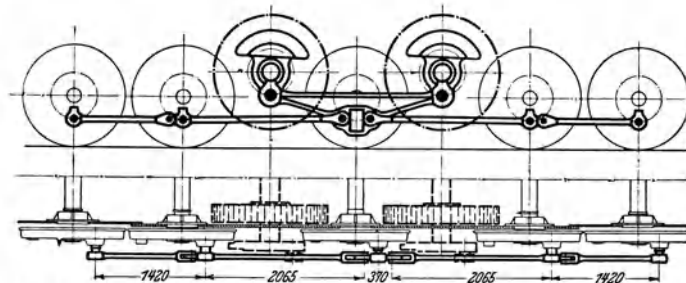


Abb. 287. Laufwerk mit Kandórahmen der 1-E-1-Lötschberglokomotive, Abb. 555.

Betrachtet man das Kurbelgetriebe einer Seite, so müssen, entsprechend dem Moment der Stangenkraft

$$2 K h \cos \alpha ,$$

an den oberen Ecken zwei entgegengesetzt 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 beim elementaren Parallelkurbelgetriebe kann auch hier angenommen werden, daß die beiden Kräfte gleich groß sind. Zur Herstellung des Gleichgewichtes werden an den oberen Ecken aber noch zwei gleich große, entgegengesetzt gerichtete vertikale Kräfte P_1 auftreten müssen, deren Moment

$$P_1 l = 2 K h \cos \alpha$$

ist. 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:

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(K \cos \alpha)^2 + P_1^2} \\ &= K \cos \alpha \sqrt{1 + \frac{4 h^2}{l^2}}. \end{aligned}$$

Der Höchstwert des Treibkurbelzapfendruckes

$$K \sqrt{1 + \frac{4 h^2}{l^2}}$$

wächst demnach mit der Überhöhung des Kuppelrahmens, die durch h und durch das Verhältnis $\frac{h}{l}$ gemessen wird.

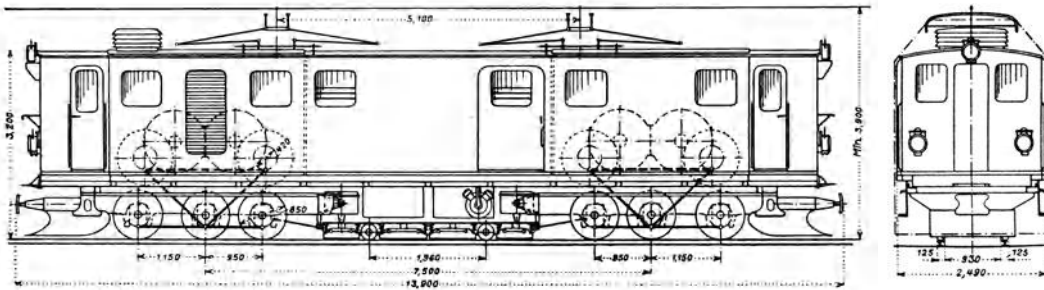


Abb. 289. C + C-Lokomotive der Berninabahn mit Schlitzkuppelrahmenantrieb; besonderes Laufgestell für Schienenbremsen (BBC).

Bei ausgeführten Rahmen ist $\frac{h}{l} = \frac{1}{6}$ bis $\frac{1}{8}$, so daß $R_{max} = 1,03$ 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 stimmt bei symmetrischem Kuppelrahmen mit der Seitenrichtung des Dreieckes überein.

Der Schlitzkuppelrahmen ist von BBC mit unter rechtem Winkel vom Schlitz abgehenden Seiten und vergleichsweise großer Höhe $\left(\frac{h}{l} = \frac{1}{2}\right)$ für die $C + C$ -Lokomotiven der Berninabahn ausgeführt worden. (Abb. 289.)

Wählt man nach Kleinow (dessen Ableitung hier wiedergegeben wurde) im Kräfteplan der Triebwerksdrücke $l = 2K$ (Abb. 290) und errichtet auf dieser Basis ein gleichschenkeliges Dreieck mit der Höhe h , so stellen im Sinne der vorstehenden Ableitung die Seiten des Kraffteckes AD und BD die Zapfendrucke R_{1A} und R_{1B} 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 wagrechte Teilkraft CD stellt die Beanspruchung des Rahmens in der wagrechten Verbindungsstange dar. Im symmetrischen Rahmen wird $CD = 0$, die Stangenkräfte S und T stimmen nach Richtung und Größe mit den Zapfendrucke R_{1A} und R_{1B} überein.

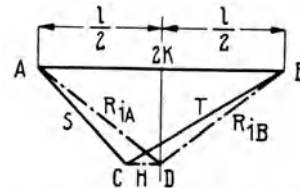


Abb. 290. Kräfteplan des Schlitzkuppelrahmens.

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

$$M = R_1 r \cos(\varphi - \alpha)$$

$$M = Kr \sqrt{1 + \frac{4h^2}{l^2}} \cos \alpha \cos(\varphi - \alpha),$$

wobei nur die Winkelstellung α 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 Federspiel des Fahrzeuges entgegengesetzt gerichtete

Längenänderungen der Kuppelstangen entsprechen. Dieser Mangel kann gemildert werden, wenn vergleichsweise lange Kuppelstangen vorgesehen werden.

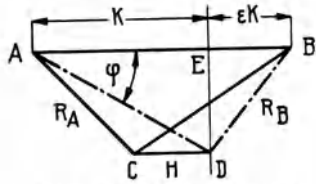


Abb. 291. Kräfteplan der Schlitzkuppelstange für ungleiche Belastung der gekuppelten Motoren.

Richtiger wäre es, die Kupplung von dem 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 gleich große Drehmomente entwickeln. Das Drehmoment des Motors II sei z. B.

$$M_{di} = \epsilon M_d, \text{ wo } 0 < \epsilon < 1.$$

Die einschlägigen Verhältnisse lassen sich am besten in einem Kräfteplan übersehen (Abb. 291). Die Stangenkraft am Zapfenlager des Motors I setzt sich aus der wagrechten Stangenkraft $K \cos \alpha$ und der senkrechten Teilkraft

$$P_1 = K(1 + \epsilon) \frac{h}{l} \cos \alpha$$

zusammen.

Am Kurbelzapfen des Motors II wirkt die Mittelkraft, ebenso eine wagrechte Stangenkraft $\epsilon K \cos \alpha$ und eine lotrechte Teilkraft

$$P_1(1 + \epsilon) \frac{h}{l} \cos \alpha.$$

Stellt in Abb. 291 die Länge AB im Längenmaßstab die Länge l des Kuppelrahmens ABC bzw. im Kräftemaßstab die Kraft $K(1 + \epsilon)$ dar und errichtet man in E ein Lot auf AB , so ist AD ein Maß für den Lagerdruck in A und ebenso BD für den Lagerdruck beim Zapfen B ; ferner ist AC die Stangenkraft S , BC die Stangenkraft T und $CD = H$ die Kraft in der wagrecht gedachten Rahmenseite.

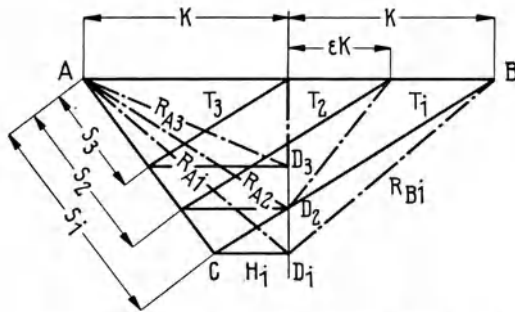


Abb. 292. Zerlegung der Stangenkräfte in der Schlitzkuppelstange.

Behält man den Kräftemaßstab für verschiedene Werte von ϵ bei, so wird der Längenmaßstab sich fallweise ändern. Die Vereinigung der verschiedenen Belastungsfälle in einem Bilde gibt eine gute Übersicht über die Folgen einer ungleichen Arbeitsleistung der beiden Motoren.

In Abb. 292 sind drei Fälle dargestellt:

$\epsilon = 1, 0, 0,5, 0,0$. 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.

Kleinow hat aus dieser Ableitung den Schluß gezogen, daß der Kuppelrahmen auch bei Vorhandensein nur einer Triebwelle angewendet werden kann.

Unter Zugrundelegung dieses Gedankens ist der unsymmetrische Kuppelrahmen mit einer Vorgelege- und einer Blindwelle, außerdem mit schief gelegter Seite zwischen deren Kurbeln von der SLF, Winterthur, für die 1 — C + C — 1-Lokomotiven Reihe 12251 der SBB ausgeführt worden (Abb. 293). Es verlautet, daß für diese immerhin umständliche Mechanik die später noch eingehend zu erörternde Tatsache maßgebend war, daß Versuche mit den ursprünglich starken Schüttelerscheinungen unterworfenen

1—E—1-Lokomotiven der Lötschbergbahn die einwandfreie Arbeitsweise dieser Anordnung bewiesen haben. Wenn auch diese Tatsache mitbestimmend gewesen sein

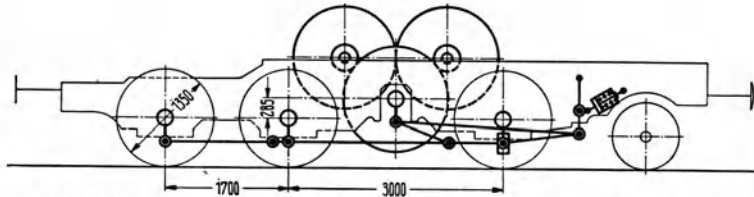


Abb. 293. Gestell mit Getriebe mit unsymmetrischem Schlitzkuppelrahmen der 1—C + C—1-Lokomotive der Reihe 12251 der SBB (MFO—SLFW).

mag, so zeigt doch 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. 294) nicht einwandfrei zu beherrschen gewesen wäre.

Da 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 dessen ruhigen Lauf dürfte mitbestimmend sein, daß die eine der gekuppelten Kurbelwellen massenfrei ist.

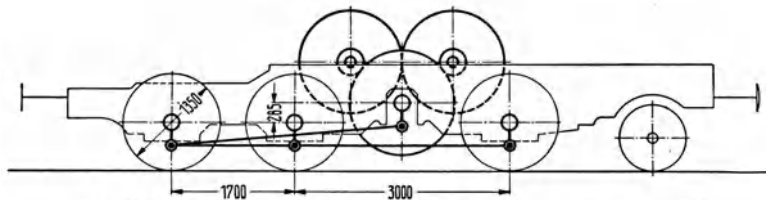


Abb. 294. Gestell der Lokomotive mit Schrägstangenantrieb.

Von Kandó selbst ist der Kuppelrahmen für die 1—C—1-Lokomotiven Reihe 50 der Italienischen Staatsbahnen mit spitzem Winkel an der Kulisse, Überhöhung $h = 1000 \left(\frac{h}{l} = 1,8 \right)$ ausgeführt worden. An neueren Lokomotiven dieser Reihe wurde der Rahmen in einzelne Stangen aufgelöst, wobei die Seiten des Rahmens über Kniehebel an die Kuppelstangen angelenkt sind. Die Kulisse ist bei dieser Anordnung

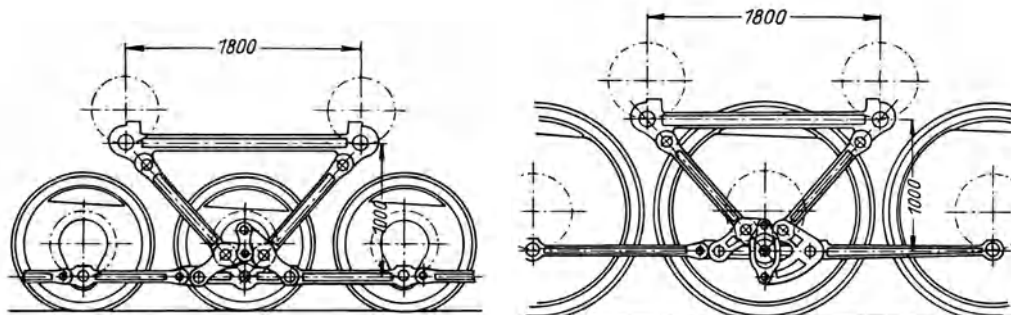


Abb. 295. In Stangen aufgelöster Kandórahmen.

vermieden, das Federspiel kann sich durch Verformung des Rahmens ausgleichen (Abb. 295). Von dieser Bauart etwas abweichend ist der Kandórahmen bei den Reihen 552 (Achsfolge E) und 333 (Achsfolge 1—C—1), ausgeführt von Ing. N. Romeo, Mailand (Abb. 521), aufgelöst worden; der Dreieckrahmen erscheint hier zu einem trapezgestaltigen

Stangenviereck umgebildet. Das „Kandó-Viereck“ greift an einem Auge einer Kuppelstange an; das durch die Federung der Achsen verursachte Spiel dieser Stange kommt in einer entsprechenden Verformung des Viereckes zum Ausdruck.

Von BBC ist eine Auflösung des Kuppelrahmens in einen Zweistangenantrieb mit Kulisse für den Kurbelzapfen 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 die Verbindung zwischen den beiden Motoren aufgelöst.

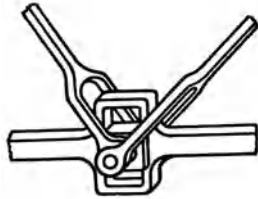


Abb. 296. Kulisse für Zweistangenantrieb ohne Blindwelle, Bauart BBC. Lokomotive Abb. 566.

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. 296).

Beim Zweistangenantrieb mit Schlitz können die vom Kurbelzapfen bzw. den etwa angelenkten Kuppelstangen ausgeübten Kräfte nur wagrecht gerichtet sein; das Gegendrehmoment des Fahrzeuges muß daher die beiden wagrechten Kräfte ebenso wie beim Kuppelrahmen aufheben. Ein Unterschied besteht hier insoferne, als eine wagrechte Verbindung zwischen den treibenden Kurbeln fehlt. Den wohl ausschließlich in Betracht kommenden Fall einer symmetrischen Stangenordnung ins Auge fassend, ist zunächst feststehend, daß ein Gleichgewicht nur dann bestehen kann, wenn die Mittelkraft der beiden Stangenkräfte wagrecht gerichtet und gleich groß wie die Kuppelstangenkräfte Q_1 bzw. Q_2 sind. Die beiden Stangenkräfte müssen daher stets gleich groß und einander entgegengesetzt gerichtet sein, so daß jeweils die eine Stange auf Zug, die andere auf Druck beansprucht 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 Zapfendrucke bei gleich großer Arbeitsleistung beider Triebmaschinen — gleiche geometrische Verhältnisse vorausgesetzt — beim Zweistangen- und Kuppelrahmenantrieb übereinstimmen. Mit abnehmender Leistung eines Motors nimmt beim Kuppelrahmen der betreffende Zapfendruck ab, beim Zweistangengetriebe bleiben die Lagerdrücke einander immer gleich.

7. Schüttelschwingungen des massenreichen Parallelkurbelgetriebes¹⁾. Die vorhergehenden Betrachtungen setzen massenlose Gebilde voraus und behandeln die Kräfteverhältnisse im Parallelkurbelgetriebe demgemäß auf statischer Grundlage. In Wirklichkeit stehen die Getriebe elektrischer Lokomotiven mit den vergleichsweise großen Massen der Motoranker, die, auf den Triebtradumfang bezogen, 20 bis 50 v. H. (und mehr) des gesamten Lokomotivgewichtes betragen können, in Verbindung und bilden mit diesen zusammen schwingungsfähige Systeme, die sowohl zu freien (Eigen-)Schwingungen befähigt sind, als auch durch regelmäßig wiederkehrende Störungserreger in erzwungene Schwingungen versetzt werden können, für welche letztere bei geeignetem Takt der Störung die Gefahr ungemessen vergrößerter Schwingungsauslässe besteht (Resonanz).

Solche vom Zusammenwirken der Motoranker mit der Getriebeelastizität herrührende Störungsbewegungen sind an elektrischen Lokomotiven bei bestimmten, der Lokomotivtype eigentümlichen („kritischen“) Fahrgeschwindigkeiten vielfach beobachtet worden und äußerten sich in Erschütterungen der Lokomotive, verbunden mit erhöhter Beanspruchung, Erwärmung und Abnutzung des Getriebes, u. U. auch in Triebwerks-

¹⁾ Aus einer Originalarbeit von Dr. techn. A. Winkler, Wien.

beschädigungen. Sie traten nur an Lokomotiven mit Stangenantrieb, unter diesen besonders an solchen mit zweimotorigem Antrieb einer Rädergruppe, auf. Sie sind unter Verallgemeinerung des ursprünglich für eine bestimmte (nämlich die pseudoharmonische) Schwingungsart geprägten Wortes unter dem Namen „Schüttelschwingungen“ bekannt geworden.

Schüttelschwingungen wurden an Lokomotiven aller Stromarten, besonders auch im stromlosen Lauf, beobachtet, woraus ihr rein mechanischer Ursprung erhellt.

Nach Kummer sind bei einer Reihe Lokomotiven die in der nachstehenden Tabelle angegebenen kritischen Geschwindigkeiten beobachtet worden.

Bahnanlage	Lokomotive	Achsfolge	Getriebe	v_e /km/h	v_k /km/h	μ
Valtellinabahn	Reihe 38 (1906)	1—C—1	Abb. 523	256	64	4
Milano-Varese	" 37 (1912)	1—C—1	" 526	312	78	4
Lötschberg	" 130 (1913)	1—E—1	" 287	164	41	4
Schles. Gebirgsbahn	E.P. 235 (1917)	2—D—1	" 282	80	40	2
Paris—Orleans	E 25 (1921)	1—D—1	" 518	—	35	—

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.

Der Einfluß der Stromart tritt nur insofern hervor, als Systeme mit starrer Geschwindigkeitscharakteristik der Motoren (Drehstrom-Induktionsmotoren auf Drehstrom- und Umformerlokomotiven) bei Fahrt unter Strom einer starken Dämpfung unterliegen und die Anwendung von Antriebsanordnungen gestatten, die bei Motoren mit Reihenschlußcharakteristik wegen ihrer Schwingungsgefährlichkeit weniger geeignet sind. In dieser Hinsicht ist die an den Lokomotiven Reihe 38 der Italienischen Staatsbahnen (zweimotorig mit Drehstrominduktionsmotoren verschiedener Polzahl, die zur Erzielung von drei Geschwindigkeitsstufen je einzeln und in Kaskade laufen sollten) gemachte Erfahrung bemerkenswert, dahingehend, daß diese Lokomotiven in Kaskadenschaltung einwandfrei liefen, während bei einmotoriger Fahrt unter stromloser und infolgedessen ungedämpfter Mitnahme des anderen Motorankers heftige Schüttelschwingungen auftraten.

Als technisches Mittel zur Beherrschung der Schüttelschwingungen ist die Getriebefederung (Abb. 297) zu allgemeiner Anwendung gelangt, deren Wirkung darin besteht, daß sie die Ankermasse aus dem starren Zusammenhange mit dem übrigen Getriebe loslöst und die Eigenfrequenz des Systems und damit die Höhe der beim Schwingungsvorgang pulsierenden Energie herabsetzt, wobei die Energie einer einmal eingeleiteten Schwingung durch die dämpfende Wirkung der Federreibung aufgezehrt wird. Die Getriebefederung wirkt als Arbeitsspeicher für die beim Schwingungsvorgang hin und her wandernde Energie und tritt in ihrer Wirkung an die Stelle der Formänderung des ungedeferten Getriebes, dessen Ermüdung und schließliche Zerstörung auf diesem Wege hintangehalten wird.

Die Erkenntnis und Erforschung der Schüttelschwingungen ist an die Namen Buchli, Couwenhoven, Döry, Kummer, Meißner, Müller, Wichert u. a. geknüpft.

Das Parallelkurbelgetriebe in seiner geometrisch richtigen Form, wie sie an früherer Stelle (Abb. 265) unter der weiteren Annahme, daß lediglich die Stangen elastisch ver-

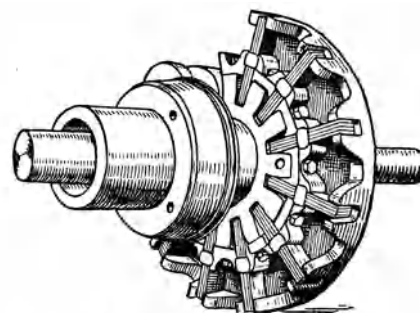


Abb. 297. Elastische Kupplung einer Versuchslokomotive mit Blindwelle und Parallelkurbelgetriebe der GEC.

formbar seien und diese in die Zapfen spielfrei eingreifen, betrachtet wurde, — das Getriebe dieser Art wird als „ideal“ bezeichnet — ist ein fehlerfreies Übertragungsmittel umlaufender Bewegungen; einer gleichförmigen Bewegung der treibenden Welle entspricht eine ebensolche der getriebenen Welle; es ist gleichwertig jedem anderen Getriebe mit unmittelbarer Übertragung der Umfangskraft durch Zahneingriff, Reibung oder Riemenzug; es haften ihm keinerlei Störungserreger an, trotzdem die Übertragung von Umfangskraft und Drehmoment auf dem Wege über zwei sinusförmige Stangenkräfte und zwei dem Sinusquadratgesetz folgende Teilmomente erfolgt.

Beim idealen Parallelkurbelgetriebe ist das übertragene Moment (M) verhältnismäßig dem Voreilwinkel (φ) der treibenden Welle ($M = c\varphi$). Wird der gleichförmige Umlauf des Systems durch einen äußeren Einfluß gestört, so tritt vermöge der Elastizität des Getriebes das als Richtkraft oder Rückstellkraft bezeichnete Moment in Erscheinung, das den Ruhezustand (die Mittellage) wieder herzustellen strebt; auch dieses ist verhältnismäßig der Abweichung des Systems aus der Mittellage. Man sagt: das ideale Parallelkurbelgetriebe ist ein System mit unveränderlicher Richtkonstante (c). Als Verbindungsglied umlaufender Massen besitzt es als einzige Bewegungsmöglichkeit die harmonische Eigenschwingung; da diese, wenn sie durch äußere Einflüsse, z. B. Belastungswechsel, Erschütterungen u. a. eingeleitet wurde, infolge der stets vorhandenen Dämpfung allmählich abklingt, ist der Lauf stabil.

Die praktische Ausführung weicht von der idealen Form des Getriebes in mehrfacher Hinsicht ab. Die innerhalb gewisser Grenzen unvermeidlichen Fehler der Herstellung, die sogenannten Stichmaßfehler (Fehler in den Stangenlängen, im Kurbelwinkel und in den Kurbellängen) sind gleichbedeutend mit geometrischer Ungenauigkeit des Getriebes. Abweichend von der als ideal angenommenen Form unterliegen weiters nicht nur die Stangen, sondern auch alle übrigen Getriebeteile, besonders die Wellen und Kurbeln, der elastischen Verformung, schließlich besitzen alle Lager Spiele, die gleichfalls innerhalb gewisser Grenzen unvermeidlich sind. Alle diese Fehler und Eigenheiten verursachen Abweichungen vom regelmäßigen Getriebelauf und somit Massenwirkungen der treibenden und getriebenen Masse; sie sind hierdurch Ursachen und Erreger von Störungsbewegungen, die sich dem gleichmäßigen Getriebelauf als Drehschwingungen überlagern.

Stichmaßfehler sind die Erreger von erzwungenen harmonischen Schwingungen. Bei Übereinstimmung des mit der Getriebedrehzahl in einfacher Weise zusammenhängenden Taktes der Störung mit der Eigenfrequenz des Systems treten Häufungserscheinungen (Resonanz) ein.

Wellenverformung und Spiel im Stangeneingriff — dieses unter der Voraussetzung, daß immer mindestens eine Getriebeseite im Eingriff bleibt, also keine Unterbrechung des Kraftschlusses eintritt — haben zur Folge, daß die Richtkonstante des Systems mit der Kurbelstellung, d. i. mit der Zeit, periodisch veränderlich wird; die überlagerte Drehschwingung ist eine quasiharmonische Bewegung. Dieser haften schon im freien (nicht erzwungenen) Zustand Instabilitäterscheinungen an, deren Auftreten vom zeitlichen Verlauf der Richtkraft (Richtfunktion) und von deren Pulsationsdauer (d. i. von der Drehzahl des Getriebes) abhängt, und die sich bei der stets vorhandenen Erregung zu Resonanzerscheinungen verdichten.

Das Fehlen der unbedingten Kraftschlüssigkeit des mit Spiel behafteten Getriebes birgt aber noch die Möglichkeit von Bewegungen mit teilweisem oder gänzlichem Durchlauf des Lagerspieles, bei denen somit die Richtkraft bei Überschreitung gewisser Werte der Schwingungsausschläge — bei diesen tritt eben das Abheben der Zapfen ein — gänzlich aussetzt: die Richtkonstante des Systems ist mit dem Schwingungsausschlag (unstetig) veränderlich; die überlagerte Drehschwingung ist eine pseudo-harmonische Bewegung. Bei geeignetem Takt, der in keinem einfachen Zusammenhang mit der harmonischen Eigenschwingungszahl des Systems steht, treten Häufungs-

infolge des Hinzutrittes der für den Spieldurchlauf erforderlichen Zeit herabgesetzt wird; k nimmt in diesem Falle Werte bis auf 0,7 herab an.

Das massenreiche Parallelkurbelgetriebe kommt als Antriebssystem elektrischer Lokomotiven in zwei durch Abb. 287 zweimotorig und Abb. 250 einmotorig dargestellten Grundformen: die erstere aus zwei gegeneinander, die letztere aus einer gegen die Lokomotivmasse schwingenden Ankermasse bestehend, zur Anwendung. Da es für praktische Rechnungen ausreichend ist, die Sonderfälle $m_1 = m_2 = m$ und $m_1 = m, m_2 = \infty$ ins Auge zu fassen, beschränkt sich die Behandlung auf die Schwingung einer einzigen Masse gegen einen festen Stützpunkt, bzw. gegen die Symmetrieebene des Systems. Ein beachtenswerter Unterschied der beiden Anordnungen liegt in der Begrenzung der beim Schwingen einer Ankermasse gegen die Lokomotivmasse auftretenden Kräfte durch die Schienenreibung, während die Schwingungen zweier Ankermassen gegeneinander unbegrenzt zur Entwicklung gelangen können, eine Tatsache, die zu einer gewissen Bevorzugung der Antriebsanordnungen mit gesondertem Antrieb einzelner Rädergruppen geführt hat.

Werden Ankermasse (m) und Richtkonstante (c) auf irgendeinen bewegten Punkt des Systems (Ankerumfang, Kurbelkreis, Triebtradumfang) bezogen, so ergibt sich die harmonische Eigenschwingungszahl zu:

$$\nu_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}.$$

Nachfolgend einige Angaben von ausgeführten Lokomotiven und in weiterer Folge die kritischen Getriebedrehzahlen nach der bekannten Reihe:

$$\nu_r = (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}) \cdot k \nu_e.$$

Die 1E1-Lokomotive der Lötschbergbahn (Abb. 287, 555)

besitzt gemeinsamen Antrieb ihrer Triebrädergruppe durch die beiden Anker zweier Wechselstrom-Reihenschlußmotoren (2×1250 PS) unter Zwischenschaltung je eines (unsymmetrisch angeordneten) Vorgeleges. Sie verursachte in ihrer ursprünglichen Ausführung ohne Getriebefederung durch Gegeneinanderschwingen der zwei Motoranker beim kritischen Geschwindigkeitsgebiet vierter Ordnung von 38 bis 42 km/h (der Fahrbereich der Maschine geht bis 75 km/h) beträchtliche Schwierigkeiten, die durch Einbau eines federnden Zahnrades an einem der beiden Motoren behoben wurden. Der gefederte Motoranker hat nunmehr seine kritischen Geschwindigkeitsgebiete vierter, zweiter und erster Ordnung bei 17, 32 und 52 (Leerlauf) bis 60 (Vollast) km/h und arbeitet mit dem ungefederten, dessen kritisches Gebiet vierter Ordnung bei 38 bis 42 km/h gleichfalls innerhalb des Fahrbereiches der Maschine verblieben ist, dauernd zusammen.

Die Triebwerkskonstanten dieser Lokomotive sind (umgerechnet nach Angaben verschiedener Autoren): GD^3 eines Motorankers = 6350 bis 5520 kgm²; auf den Triebtradumfang bezogenes Gewicht desselben $G = 17200$ bis 15000 kg; Starrheitsgrad einer ungefederten Systemhälfte $c = 80800$ bis 110000 kg/cm. Eigenfrequenz $\nu_e = 10,95$ bis 13,45 Per/sec, entsprechend 168 bis 204 km/h, somit der theoretische Wert ($k = 1$) des innerhalb des Fahrbereiches der Lokomotive liegenden kritischen Geschwindigkeitsgebietes vierter Ordnung 42 bis 51 km/h; das tatsächlich beobachtete Schüttelgebiet lag, wie erwähnt, bei 38 bis 42 km/h.

Die Getriebefederung eines Motors mit der Richtkonstanten $c = 14000$ kg/cm (Starrheitsgrad, auf den Triebtradumfang bezogen) verlegt die Eigenfrequenz nach $\nu_e = 4,55$ Per/sec, entsprechend 70 km/h; somit liegen die theoretischen Werte ($k = 1$) der drei kritischen Geschwindigkeitsgebiete sämtlich innerhalb des Fahrbereiches der Lokomotive und zwar bei 17,5, 35 und 70 km/h; tatsächlich beobachtet sind sie bei 17, 32 und 52 bis 60 km/h ($k = 0,74$ bis 0,86).

E-Lokomotive Gr. 50 der Italienischen Staatsbahnen (Abb. 510).

Auch diese Lokomotivtype besitzt Antrieb der mittleren Treibachse durch zwei (Drehstrom-Induktions-)Motoren (2×1140 PS) mittels Dreieckrahmens mit der Möglichkeit einer erzwungenen Schwingung der Motoranker gegeneinander. Der gesamte Fahrbereich der Lokomotive (Betriebsgeschwindigkeit 50 km/h synchron bei $16\frac{2}{3}$ Perioden) liegt infolge der leichten vorgelegelten Motoranker (niedrigperiodiger Drehstrom) und der großen Starrheit des Getriebes unterhalb des kritischen Geschwindigkeitsgebietes vierter Ordnung.

Die Triebwerkskonstanten der Lokomotive sind: GD^2 eines Motorankers = 2700 kg/m²; auf den Triebbradumfang bezogenes Gewicht desselben $G = 2360$ kg; Richtkonstante (Starrheitsgrad) einer Systemhälfte (nach Couwenhoven umgerechnet) $c = 72000$ kg/cm. Die Eigenfrequenz des Antriebssystems beträgt $v_e = 27,6$ Per/sec, entsprechend 334 km/h, somit der theoretische Wert ($k = 1$) des kritischen Geschwindigkeitsgebietes vierter Ordnung 83,5 km/h; die Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h liegt bei 60 v. H. dieser kritischen Geschwindigkeit; Schwingungserscheinungen wurden bei dieser Lokomotive tatsächlich nie beobachtet, doch liegt ihr Auftreten bei Geschwindigkeiten von 60 km/h aufwärts (stromlos) im Bereiche der Möglichkeit.

1C1-Lokomotive Reihe 1029 der Österreichischen Bundesbahnen (Abb. 534).

Diese Lokomotivtype besitzt Antrieb durch zwei Wechselstrom-Reihenschlußmotoren (2×670 PS) unter Zwischenschaltung eines gemeinsamen beiderseitigen (symmetrischen) Vorgeleges mit Getriebefederung (federnde Ritzel), von dessen Treibwelle aus die Triebrädergruppe mittels eines Stangenpaares angetrieben wird; es besteht somit die Möglichkeit einer gemeinsam erzwungenen Schwingung der beiden Motoranker gegen die Lokomotivmasse. Die kritischen Geschwindigkeitsgebiete vierter und zweiter Ordnung liegen mit 24 km/h bzw. 48 km/h innerhalb des bis 70 km/h gehenden Fahrbereiches der Lokomotive.

Die Triebwerkskonstanten der Lokomotive sind: GD^2 eines Motorankers = 1440 kgm²; auf den Triebbradumfang bezogenes Gewicht desselben $G = 8800$ kg; Richtkonstante (auf den Triebbradumfang bezogener Starrheitsgrad) der Federung eines Motorankers $c = 8660$ kg/cm. Eigenfrequenz $v_e = 4,95$ Per/sec, entsprechend 96 km/h; somit liegen die theoretischen Werte ($k = 1$) der kritischen Geschwindigkeitsgebiete zweiter und vierter Ordnung bei 48 und 24 km/h.

1D1-Lokomotive Reihe E 21—25 der Paris-Orleans-Bahn (Abb. 513).

Diese Lokomotivtype besitzt unmittelbaren Zweistangenantrieb ihrer Triebrädergruppe durch zwei Gleichstrom-Reihenschlußmotoren (2×900 PS) ohne Vorgelege und ohne Blindwelle. Sie ist wegen ihrer besonders weichen Ankerfederung bemerkenswert, derzufolge das kritische Geschwindigkeitsgebiet erster Ordnung bei 35 km/h liegt, so daß der eigentliche Arbeitsbereich der Maschine — es handelt sich um eine Schnellzuglokomotive für 80 km/h Höchstgeschwindigkeit — über dasselbe hinaus, also in den unbedingt stabilen Bereich des Systems fällt.

Die Triebwerkskonstanten der Maschine sind: GD^2 eines Motorankers = 5600 kgm²; auf den Triebbradumfang bezogenes Gewicht desselben $G = 2490$ kg; Richtkonstante (auf den Triebbradumfang bezogener Starrheitsgrad) der Ankerfederung eines Motors $c = 430$ kg/cm. Eigenfrequenz $v_e = 2,06$ Per/sec, entsprechend 35,2 km/h.

8. Das doppelte Schubkurbelgetriebe. Das Parallelkurbelgetriebe der Elektrolokomotive ist von den Eisenbahntechnikern gerne angenommen worden, denn es brachte die Befreiung von der beengenden Geometrie der verschiedenen Formen des Achsantriebes, ermöglichte eine zweckmäßige und bequem bedienbare Anordnung der Triebmaschinen und steigerte schließlich durch die erzielte Höhenlage des Schwerpunktes

der Triebmaschinen die gute Lauffähigkeit der Lokomotive. Demgegenüber steht als kaum überwindbares Hindernis die starr geschlossene kinematische Kette des Parallelkurbelgetriebes, wobei der stetige Umlauf der gekoppelten Kurbelwellen nur bei mathematischer Genauigkeit der Parallelogramme gewahrt bleibt. Jeder Längen- oder Winkelfehler kann nur durch gewaltsame Zwängung und Streckung des Systems überwunden werden und, da die Unterbringung wirtschaftlich federnder Arbeitsspeicher konstruktiv schwierig ist, ist das ausgeführte Parallelkurbelgetriebe mit dem Mangel eines großen Formänderungsarbeitsverlustes in der Kraftübertragung, d. h. hohen Erhaltungsspesen behaftet. Diesem Übelstand gesellt sich noch die im allgemeinen ungünstige Blindwellenbeanspruchung hinzu.

Die dynamische Auswirkung dieser inneren Störungsquellen tritt in Verbindung mit dem Kraftausgleich zwischen den beiderseitigen Antriebssystemen in den im vorhergehenden Kapitel behandelten Schüttelschwingungen in Erscheinung.

Die durch geometrische Erzeugungsfehler verursachte Formänderungsarbeit läßt sich aus den angedeuteten konstruktiven Gründen auch bei dem einseitig der antreibenden Masse angeordneten zwei-, drei- oder vierphasigen Getriebe nicht vermeiden, was insbesondere bei den für diese Getriebeart ins Auge gefaßten, höheren Umlaufzahlen ins Gewicht fällt.

Es erscheint daher ein Getriebe empfehlenswert, das von diesen unlegbaren Mängeln frei ist.

Als solches kommt das Kurbelviereck mit einer Reihe von Sonderformen in Frage.

Das trapezgestaltige, aus Kurbel (a), (Kuppel-)Treibstange (b), Schwinge (c) und Steg (d) als feste Stütze gebildete

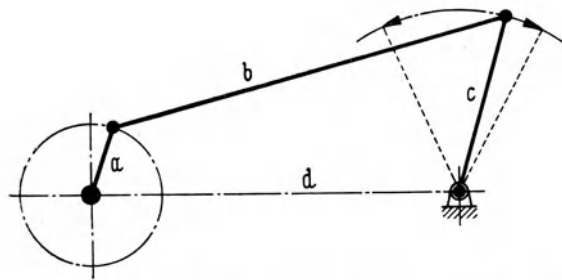


Abb. 299. Kurbelviereck (Bogen-Schubkurbel).

Kurbelviereck Abb. 299 ist eine geschlossene kinematische Kette, die sich vom Parallelkurbelgetriebe grundsätzlich dadurch unterscheidet, daß, weil $a < c$ ist, dem stetig gedachten Umlauf der Kurbel eine Pendelbewegung der Schwinge entspricht.

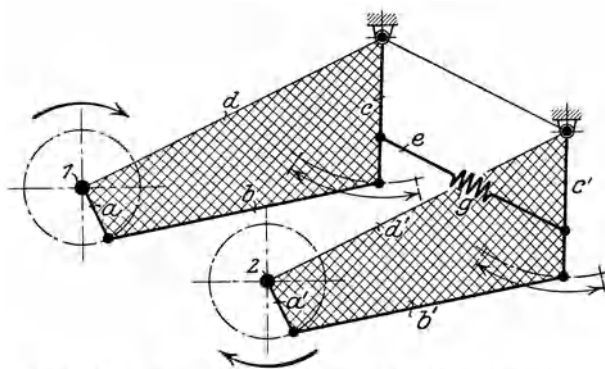


Abb. 300. Parallel verschobene Schubkurbelsysteme.

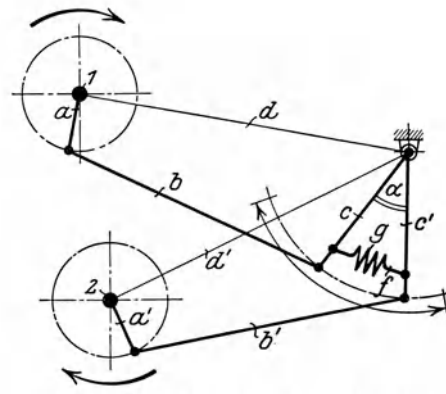


Abb. 301. Gegeneinander verdrehte Bogenschubkurbelsysteme.

Handelt es sich darum, zwei genau übereinstimmend umlaufende Kurbelwellen zwecks Kraftübertragung miteinander zu verbinden, so kann dies zunächst durch kongruente Wiederholung des die Treibkurbel enthaltenden Kurbelviereckes bei der anzutreibenden Kurbel geschehen, wobei die Verbindung beider Systeme durch geeignete Koppelung der Schwingen bequem durchführbar erscheint.

In Abb. 300 sind die beiden Bogen-Schubkurbel-Systeme gegeneinander parallel verschoben; es ist ohneweiters ersichtlich, daß durch die Koppel e die genaue Übereinstimmung der Bewegung aller Bestandteile beider Systeme erzielt wird; dem gleichmäßigen Umlauf der treibenden Kurbel entspricht ein ebenfalls gleichmäßiger Umlauf der angetriebenen Kurbelwelle.

Das gleiche Ergebnis läßt sich erzielen, wenn die kongruenten Schubkurbel-Systeme gegeneinander um den Drehpunkt der Schwinge verdreht sind. Abb. 301.

Weiters kann parallele Verschiebung und Verdrehung gleichzeitig angewendet werden (Abb. 302) und schließlich brauchen die gekoppelten Kurbelvierecke nicht identisch zu sein, es genügt auch, wenn sie einander ähnlich sind (Abb. 303), wodurch der Vorteil der Kupplung von Kurbelwellen mit verschiedenen großen Kurbelkreishalbmessern erzielt wird.

Alle diese Formen weisen zwei Totlagen auf; für eine stetige Kraftübertragung kommen daher nur zwei zu beiden Seiten der Triebmaschine angeordnete, um 90° gegeneinander versetzte Systeme in Betracht.

Untersucht man zunächst eine aus zwei Schubkurbelsystemen bestehende Getriebeseite, so ist zu erkennen, daß bei praktisch starrer Koppelung im Falle von Herstellungsfehlern genau dieselben Streckungen und Zwängungen mit Aufwand von Formänderungsarbeit in Erscheinung treten müssen, wie beim Parallelkurbelgetriebe. Gegenüber dem letzteren bestehen jedoch in bezug auf ihre Auswirkungen sehr bedeutsame Unterschiede.

Es stößt konstruktiv auf keine Schwierigkeit, die Koppel (e) Abb. 299 bis 303 gefedert auszuführen. Diese nimmt als Arbeitsspeicher mit hohem Nutzeffekt die Verformungsarbeit des Systems auf, um sie beim Richtungswechsel der Bewegung abzugeben.

Der Federung kommt eine besondere Bedeutung beim Durchlaufen der Lagerspiele zu, indem diese ohne Stoß und in gleichgerichteter Bewegung überwunden werden.

Der Umweg, den die Kraft auf ihrem Wege von der Motorkurbel bis zur Treibkurbel über die zueinander unter spitzen Winkel geneigten Treibstangen zurücklegen muß, wirkt im Zusammenhang mit der Achsfederung wie ein elastisches Übertragungssystem.

Ein augenfälliger Vorteil dieses Getriebes ist der Entfall der Blindwelle mit ihren unleidlichen Beanspruchungsverhältnissen in den Lagern. Weiters werden die Reibungsverhältnisse in den an sich nicht ungünstig beanspruchten Zapfen des Getriebes verbessert.

Durch geeignete Bemessung der Federung und ihrer Dämpfung kann die Eigenschwingung des Systems in den erwünschten niedrigen Geschwindigkeitsbereich gelegt werden, so daß den Schüttelschwingungen mit einfachen Mitteln zu begegnen ist.

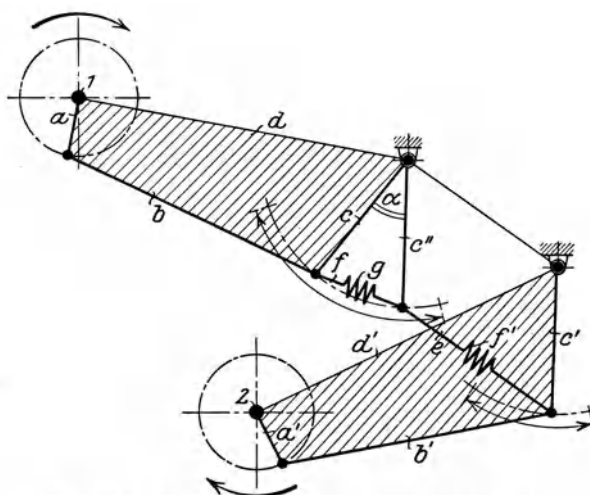


Abb. 302. Der allgemeine Fall zweier gekoppelter Schubkurbelsysteme.

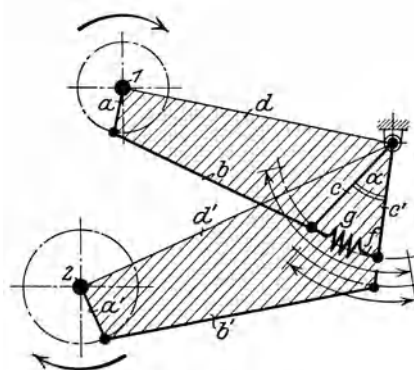


Abb. 303. Kupplung zweier ähnlicher Kurbelvierecke.

Nicht zu übersehen ist, daß bei diesem Getriebe aus zwei Ursachen Stetigkeitsstörungen in der Kraftübertragung entstehen. Die Bewegung der nicht umlaufenden Massen verbraucht Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte, andererseits verursacht sie periodische Schwerpunktsverlagerungen des ganzen Systems. Die störende Wirkung der schwingenden Massen kann im Vergleich zu denjenigen von Dampflokomotiven in unschädlichen Grenzen gehalten werden. Die Kräfte zur Beschleunigung der schwingenden Massen können durch Federn oder dergleichen geliefert werden.

Die doppelte Bogen-Schubkurbel erscheint somit als geeigneter Behelf zur Kraftübertragung von einer praktisch an beliebiger Stelle in der Elektrolokomotive angeordneten Triebwelle zur Treibachse.

Die zweckmäßige Austeilung der elektrischen Ausrüstung, die Hochlage des Schwerpunktes, die Freiheit in der Bemessung der Durchmesser der Triebmaschine und der Triebräder und damit der Übersetzung der Triebmaschine kann ebenso erzielt werden, wie mit dem Parallelkurbelgetriebe mit Blindwelle, jedoch ohne deren schwerwiegende Nachteile. Durch die volle Freiheit von der Geometrie der Zahnradübersetzung wird die Wahl praktisch beliebiger Zahnradübersetzungen möglich, so daß die gleiche elektrische Ausrüstung, gleiche Leistung vorausgesetzt, für die ganze Reihe der den Geschwindigkeitsbereich des Eisenbahnbetriebes umfassenden Achsfolgen verwendbar bleibt.

Ein besonderes Merkmal dieser vornehmlich für den Vielachsenantrieb geeigneten Getriebe ist die Tatsache, daß sie in dem Raum zwischen den Radscheiben und dem Umgrenzungsprofil der Fahrzeuge bequem untergebracht werden können.

Dieser bauliche Vorteil ist sehr bedeutsam, weil durch ihn erreicht wird, daß die Elektrolokomotive mit den gleichen Radständen ausgeführt werden kann wie die Dampflokomotive, bei der es bekanntlich üblich ist, Rad an Rad zu reihen, um einen möglichst geringen gesamten Triebstadstand und damit gute Kurvenläufigkeit zu erzielen. Die Betrachtung ausgeführter Elektrolokomotiven lehrt, daß die Unterbringung der Blindwelle mit Kurbel oder Zahnrad die betreffenden Achsabstände wesentlich vergrößert. Nur bei den Gestellmotoren mit Einzelantrieb (Bauart BBC, Tschanz, MFO) ist dieser Übelstand vermieden, wenn auch nicht ohne umständliche Anordnungen.

Für die Herstellung des Lokomotivgestelles gewährt dieses Getriebe den Vorteil, daß es nicht notwendig ist, die Rahmenbleche zur Lagerung der Blindwelle durch tiefeinschneidende Ausnehmungen zu schwächen und diese Schwächung in anderer Weise wieder wettzumachen. Die Achsstummel für die Schwingen können entsprechend hoch angeordnet werden, so daß ihr Einbau bequem erfolgen kann.

Die Schubkurbel wurde vor dem Verfasser auch schon von anderen zur Kraftübertragung zwischen Triebmaschine und Treibachse der Elektrolokomotive vorgeschlagen.

Zehme schlägt in seinem Handbuch der elektrischen Eisenbahnen (Kreidels Verlag, Wiesbaden 1903) auf Seite 159 zur Verbindung eines Gestellmotors mit der Treibachse „ein nachgiebiges Triebwerk“ mit Balancier vor. Die Bezeichnung nachgiebig dürfte sich darauf beziehen, daß wegen wagrechter Lage der zweiten Triebstange die Kinematik des Systems durch das Federspiel der Achse nicht fühlbar gestört werden kann.

Dieses Triebwerk ist, soweit bekannt, nicht ausgeführt worden; es kann, wie schon Zehme selbst andeutete, nicht einwandfrei arbeiten, weil das Kurbelviereck der Triebwelle bei der Treibachse nicht kongruent wiederholt ist. Einer vollen Schwingung des Balanciers entspricht zwar je eine Umdrehung der beiden zu kuppelnden Wellen, die Winkelgeschwindigkeiten der beiden Kurbelwellen stimmen jedoch wegen endlicher Länge der Triebstangen innerhalb jedes Umlaufes nicht überein. Im Triebwerk müssen demnach unter Mitwirkung der umlaufenden Massen Schwingungen, unter Umständen Resonanz, mit schädlichen Beanspruchungen entstehen.

Der gleiche Mangel muß dem von Hoepner im Heft 49 des Jahrgangs 1921 der ZVDI beschriebenen Kraftübertragung von Auvvert mit Schwinghebel anhaften. Bei dieser

sind, ebenso wie bei Zehme, zwei sich während des Umlaufes der Kurbeln in verschiedener Weise verformende Kurbelvierecke in Verbindung gebracht, insbesondere sind die Treibstangen nicht gleich lang; dem stetigen Umlauf der treibenden Welle kann aus den angedeuteten Gründen kein gleichmäßiger Umlauf der angetriebenen Achse entsprechen. Ein Unterschied gegenüber der Zehmeschen Anordnung besteht insoweit, als der Drehpunkt des Schwinghebels nachgiebig gelagert ist.

Kinematisch einwandfrei ist die ebenfalls von E. C. Zehme im 4. Bd. der „Eisenbahn-Technik der Gegenwart“ auf Seite 852 als Abb. 914 veröffentlichte Anordnung

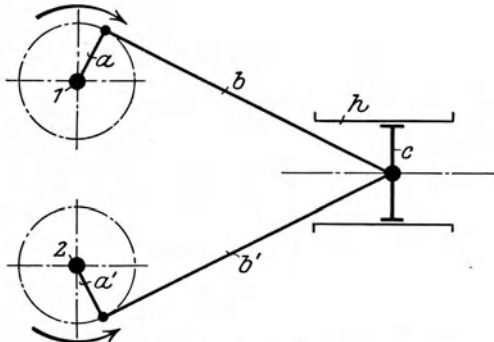


Abb. 304. Zwei gekoppelte gerade Schubkurbelsysteme.

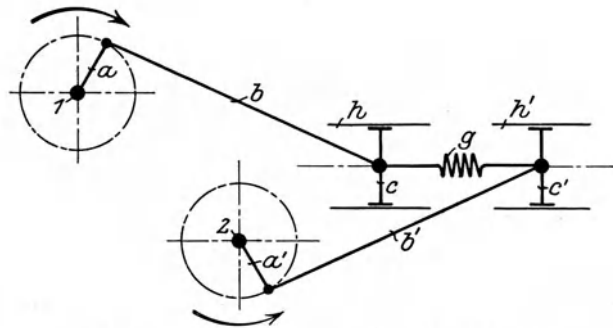


Abb. 305. Schubkurbelsysteme mit gefederter Verbindung.

mit Schwinghebel-Übertragung, da hier die für die stetige Kraftübertragung vorauszusetzende dauernde Identität der gekoppelten Kurbelvierecke gewahrt ist. Es dürfte auf konstruktive Schwierigkeiten der auf Biegung mit der vollen Stangenkraft beanspruchten Schwingen und deren Lagerung zurückzuführen sein, wenn dieses Getriebe nicht ausgeführt wurde. Die unter Umständen nötige Federung läßt sich jedoch auch nur wie bei der Auvertschenschen Anordnung in der Lagerung unterbringen, was ebenfalls umständliche Konstruktionen bedingt.

Neben der kongruenten Verdoppelung der Bogenschubkurbel kann zur Erzeugung jederzeit kophasialer Umläufe von gekoppelten Wellen auch die gerade Schubkurbel verwendet werden (Abb. 303). Bei der letzteren ist eine kongruente Wiederholung des Kurbelgetriebes konstruktiv umständlich, dagegen ermöglicht eine in bezug auf die Achse der Geradföhrung symmetrische Umkehrung einen übereinstimmenden Umlauf der gekoppelten Wellen, wenn auch mit gegenläufigem Drehsinn der Wellenumläufe.

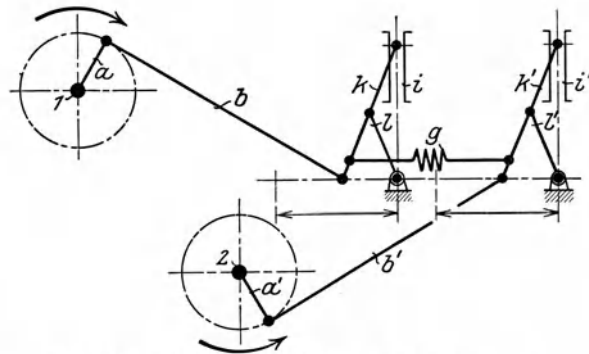


Abb. 306. Gekoppelte Schubkurbelsysteme mit Wattscher Lenkung.

Ein Triebwerk dieser Art, mit Geradföhrung im Kreuzkopf ist in Abb. 305 dargestellt. Die beiden kongruenten, geschränkten und geraden Schubkurbelsysteme können gegeneinander in der Achse der Geradföhrung verschoben werden, wodurch eine beliebige gegenseitige Lage der gekoppelten Wellen erzielt werden kann. In das Verbindungsstück der beiden Kreuzköpfe, die je nach der Sachlage ein- oder zweiseitig ausgeführt werden können, läßt sich zur Auflösung des starren kinematischen Schlusses eine Federung, gegebenenfalls mit Dämpfung, einbauen.

Die Arbeitsverluste verursachende Geradführung mit Schienen läßt sich entbehren, wenn die Stangenköpfe durch pendelnde Geradlenker irgendeiner Bauart gefaßt und in gerade Bahn gezwungen werden. Abb. 306.

Der bekannte Lenker von Watt oder irgendein Ellipsenlenker kann für diesen Zweck in Frage kommen. Als Ausführungsbeispiel für letzteren Behelf seien die Zahnradlokomotiven der ehemaligen Württembergischen Staatsbahnen für die Linien Reutlingen—Münsingen und Freudenstadt—Reichenbach erwähnt.

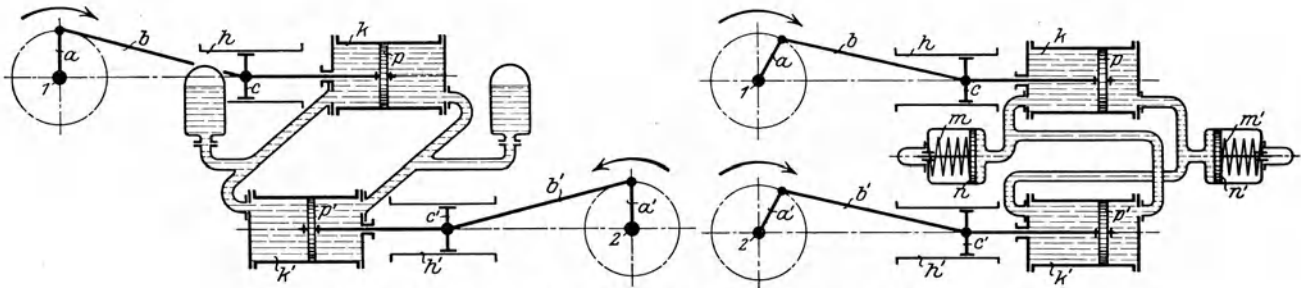


Abb. 307. Kupplung zweier Kurbelwellen durch Füllstoffumformer.

Die Kupplung des vorstehend geschilderten, auf jeder Antriebseite doppelt vorhandenen Schubkurbelsystems erfolgt durch eine mechanische Verbindung. Läßt man die gerade geführten Treibstangenenden mit Kolben in Zylinder arbeiten, so kann die Kraftübertragung durch einen im allgemeinen vergleichsweise wenig komprimierbaren Füllstoff erfolgen.

Das Schubkurbelsystem jeder Seite der Triebmaschine arbeitet mit dem zugeordneten Kolben und Zylinder als Kolbenpumpe, die in stetig sich wiederholendem Kreislauf eine mit gleichem Volumen und Triebwerk ausgestattete Kolbenmaschine antreibt. Abb. 307.

Die Totlagen werden durch das Zwillingssystem, wie bei einer Dampfmaschine, überholt. Das System ist insofern von sehr einfacher Beschaffenheit, als Steuerorgane

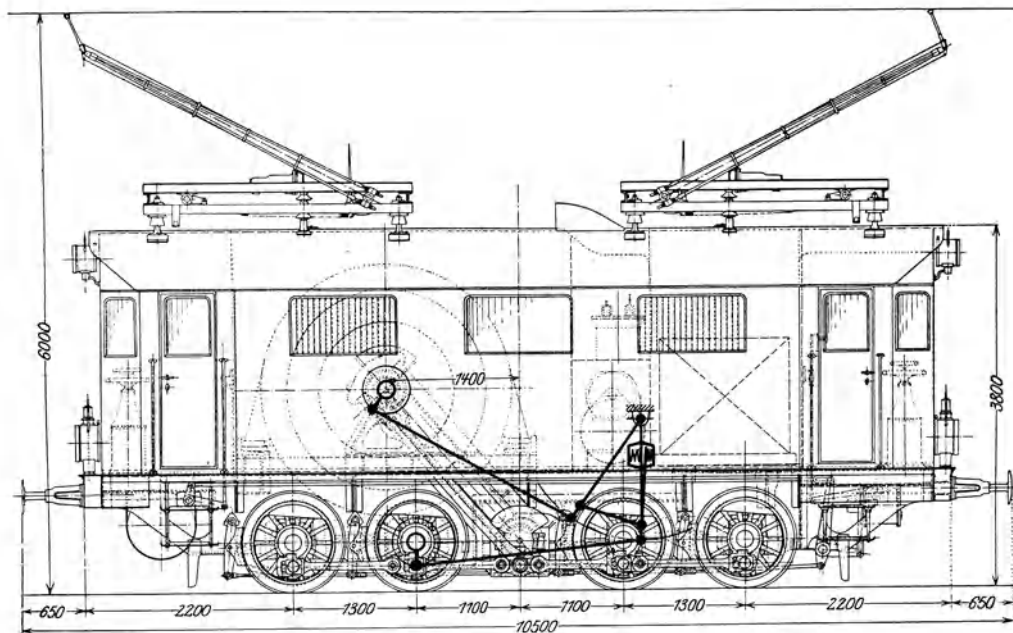


Abb. 308. Entwurf eines Schubkurbelantriebes als Ersatz für die Blindwelle.
(D-Lokomotive der ehemaligen Preussischen Staatsbahnen.)

vollständig fehlen, die entsprechenden Zylinderräume stehen untereinander durch Rohrleitungen in dauernder Verbindung.

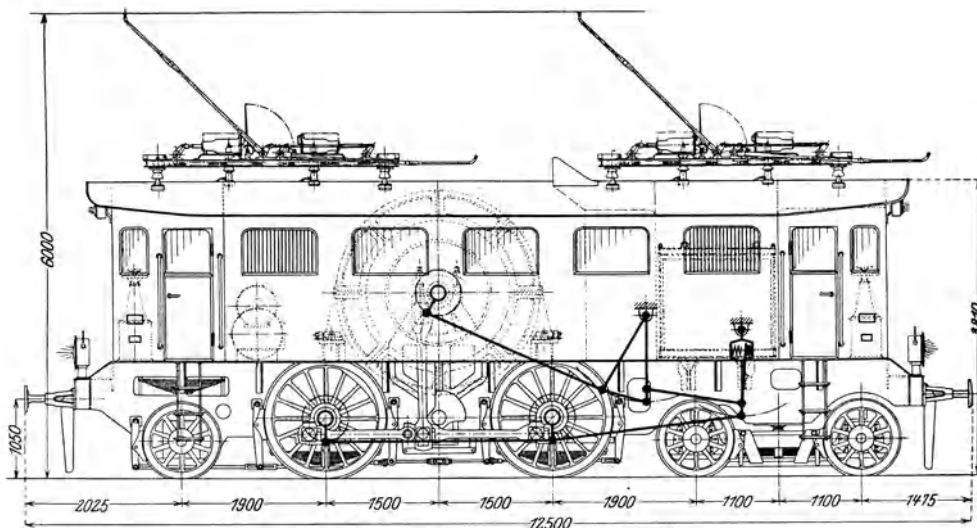


Abb. 309. Entwurf eines Schubkurbelantriebes an der Lokomotive Abb. 277 der ehemaligen Preussischen Staatsbahnen.

Zur Aufnahme der durch Unregelmäßigkeiten irgendwelcher Art verursachten Drucksteigerungen sind in alle Verbindungsleitungen Luftkessel oder unter Federdruck stehende Kolben einzuschalten, so daß die im Hinblick auf die beträchtlichen Massenwirkungen der elektrischen Triebmaschine gefürchteten Stetigkeitsstörungen in ihren Wirkungen begrenzt sind.

Die Abb. 308 bis 310 lassen einige praktische Ausführungsmöglichkeiten des Bogenschubkurbel-Getriebes bzw. die bequeme Umbaumöglichkeit von ursprünglich mit Blindwellen ausgeführten Lokomotiven erkennen.

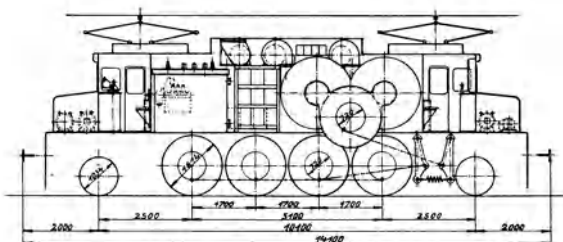


Abb. 310. Entwurf einer 1 D 1-Lokomotive mit doppeltem Bogen-Schubkurbel-Getriebe.

9. Das Lentz-Getriebe (Abb. 311). Die geschilderten Methoden der Kraftübertragung von der Triebmaschine zur Treibachse streben im wesentlichen die Befreiung vom Zwange bei der Bemessung der Triebmaschine und des Treibraddurchmessers an. Das gleiche Ziel läßt sich durch das von Lentz entwickelte Flüssigkeitsgetriebe erzielen, das zugleich eine Unabhängigkeit der veränderlichen Fahrgeschwindigkeit von der gegebenenfalls unveränderlichen Umlaufzahl der Triebmaschine anstrebt.

Das Lentz-Getriebe ist ein Füllstoffumformer, bestehend aus zwei Kapselwerken. Das eine mit der Triebmaschine verbundene wirkt als Pumpe, das andere mit der Treibachse gekuppelte als von der Pumpe gespeiste Turbine. Die Pumpe kann mehrstufig ausgeführt werden, ebenso kann das Laufrad einfach oder mehrfach beaufschlagt werden. Bei der Fahrt fördert die Pumpe die Flüssigkeit — ein schmierfähiges Teer- oder Mineralöl — im Kreislauf durch das Getriebe, wobei das Laufrad in Umdrehung versetzt wird.

Die Stärke des Flüssigkeitsstromes hängt davon ab, wie die Stufen der Pumpe geschaltet sind. Ist n die Anzahl der Stufen, so sind $n^2 - n + 1$ Stufenverbindungen möglich, drei Stufen geben z. B. 7 Geschwindigkeitsstufen.

Übersetzung, Umkehr der Fahrtrichtung, Leerlauf und Bremswirkung werden durch Steuerschieber eingestellt.

Durch dieses Getriebe wird die Freiheit der Bemessung der Triebmaschine vom

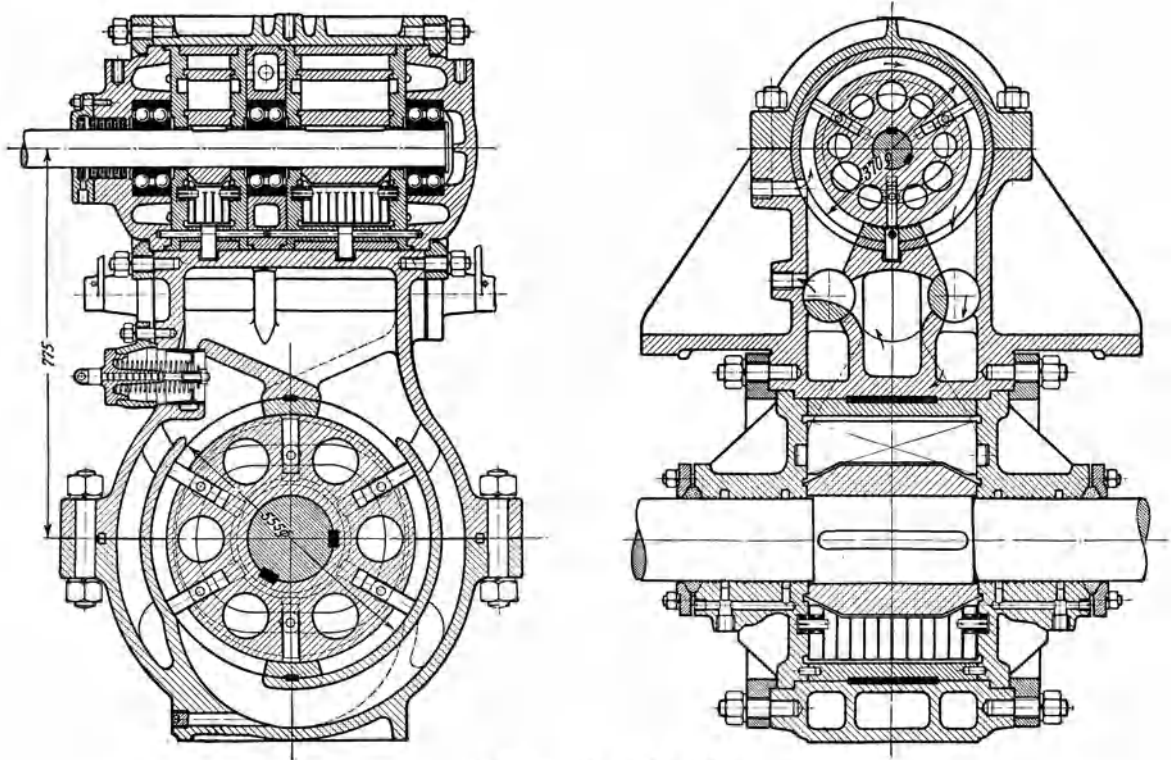


Abb. 311. Lentz-Getriebe.

Laufwerk gegenüber den rein mechanischen Antrieben in dem Sinn grundsätzlich geändert, als die Umdrehungszahl der miteinander gekuppelten Wellen betriebsmäßig in weiten Grenzen geändert werden kann.

Die für elektrische Triebfahrzeuge sonst kennzeichnende Geschwindigkeitsregelung der Triebmaschine kann in diesem Fall entbehrt werden.

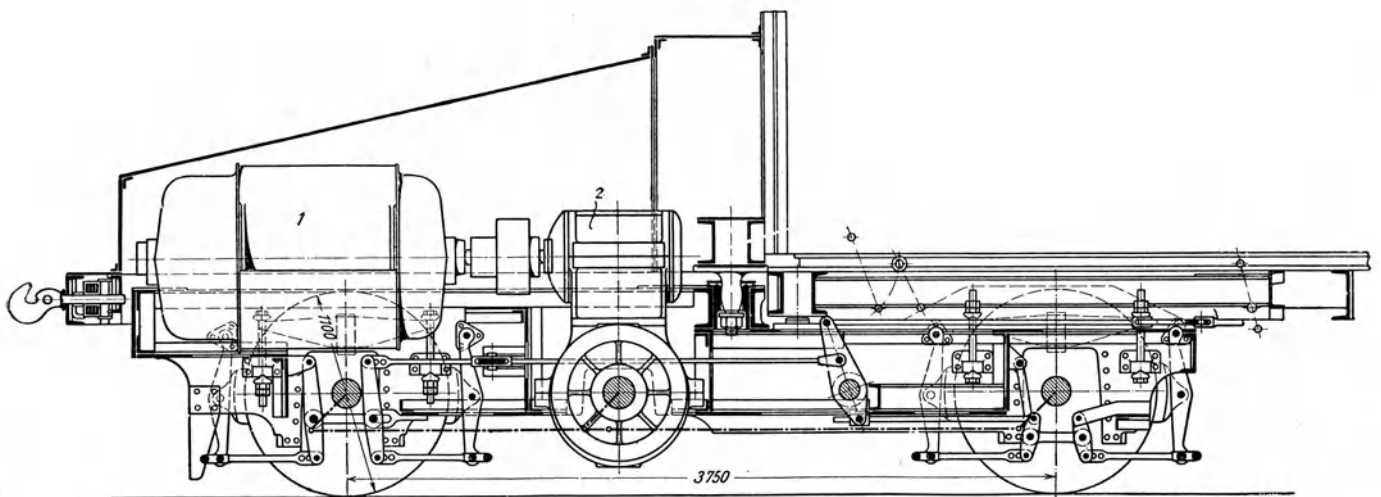


Abb. 312. Elektrisches Triebfahrzeug mit Lentz-Getriebe.

Konstruktiv ist bemerkenswert, daß die beiden Achsen des Getriebes jede beliebige Lage und Richtung zueinander haben können, was im vorliegenden Fall deshalb wertvoll ist, weil sich die Triebmaschinen bequemer und zugänglicher mit ihren Achsen in der Längsrichtung der Lokomotiven unterbringen lassen.

Dieses Getriebe ist für elektrische Lokomotiven in Verbindung mit einem hochperiodigen Induktionsmotor als Triebmaschine von Wittfeld vorgeschlagen worden (Abb. 312). Zur Erprobung wird ein Getriebe mit 200 bis 300 PS Leistung für einen Benzoltriebwagen gebaut.

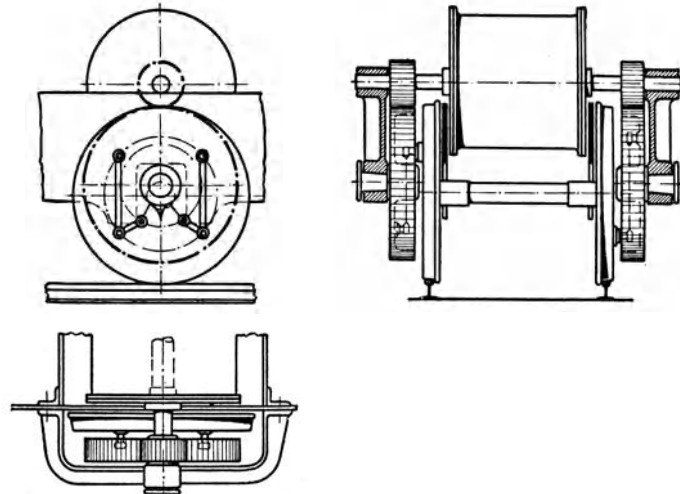


Abb. 313. Treibstangenkupplung für Gestellmotoren mit Einzelachs Antrieb. Bauart BBC.

10. Vereinheitlichung der Triebmaschinen. Das Parallelkurbelgetriebe mit Blindwelle und die verschiedenen Arten des Schubkurbelantriebes gewähren eine praktisch weitgehende Befreiung von der geometrischen Zwangsverbindung zwischen dem Durchmesser der Triebmaschine und dem Triebraddurchmesser und ermöglichen einen gegenseitig unbeeinflussten und ungestörten Entwurf der elektrischen Einrichtung und des Laufwerkes. Man kann innerhalb der gegebenen Gewichtsgrenzen die gleiche

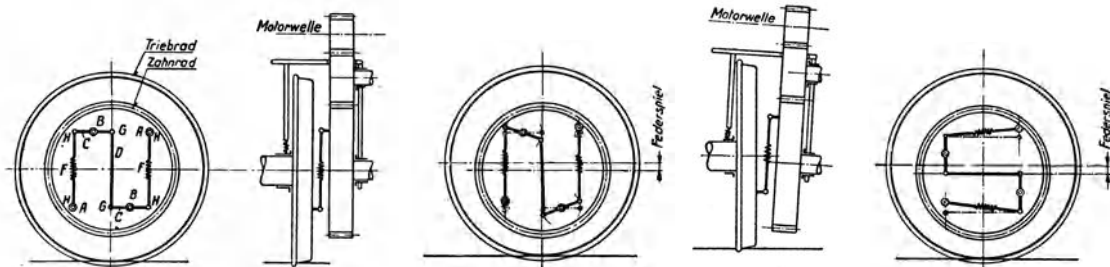


Abb. 314. Treibstangenkupplung für Einzelachs Antrieb (MFO).

elektrische Ausrüstung für eine Reihe von Achsanordnungen vorsehen, ein vom Standpunkt des Eisenbahnbetriebes nicht zu unterschätzender Vorteil, weil dadurch große Bereiche der in Frage kommenden Verkehrsaufgaben mit ein und derselben elektrischen Einrichtung beherrscht werden können, sofern nur das Gewicht und das Produkt Geschwindigkeit \times Zugkraft, nicht aber beide Faktoren für sich, unverändert beibehalten werden.

Durch Befreiung der Triebmaschine aus der Zwangsverbindung mit dem Laufwerk können z. B. Maschinen mit folgenden Achsfolgen die gleiche elektrische Ausrüstung erhalten:

- F langsam laufende, schwere Güterzugmaschine für Gebirgsstrecken;
- $C - C$ desgleichen als Gliedermaschine;
- $1 - E$ Personenzuglokomotive für mäßige Geschwindigkeiten auf Gebirgsstrecken;
- $1 - D - 1$ schwere Schnellzugmaschine für mittlere Steigungen;
- $1 - B + B - 1$ desgleichen als Gliedermaschine;
- $2 - C - 1$ und $2 - B - 2$ Schnellzugmaschinen für ebenes Gelände und hohe und höchste Geschwindigkeiten.

Eine gegebene elektrische Ausrüstung umfaßt den ganzen Geschwindigkeitsbereich des Eisenbahnbetriebes. Die gleichen 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 angeführten Aufgaben.

Ebenso wird ein zweiter Typ für fünfachsigte Maschinen mit den Achsanordnungen *E*, 1—*B*, 1—*C*—1 und 2—*B*—1 ausreichen.

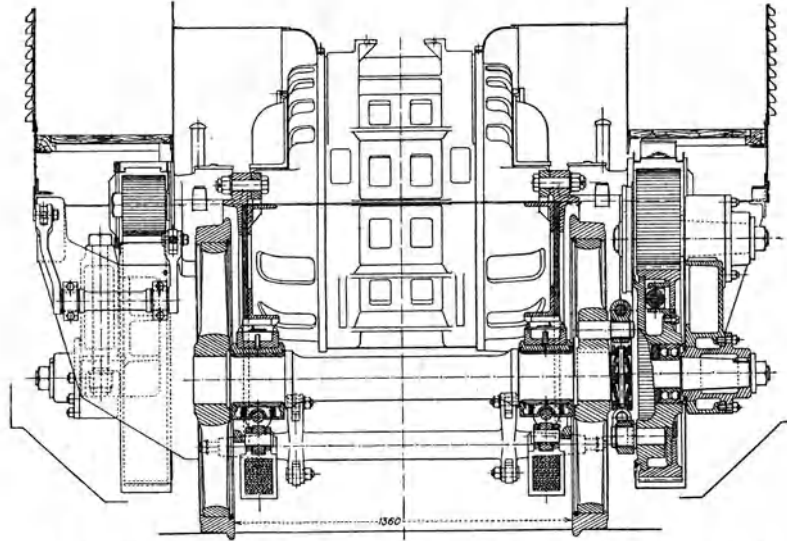


Abb. 315. Anordnung der Treibstangenkupplung, Bauart MFO, an einem Triebwagen.

Die praktisch in Betracht kommenden Achsfolgen zusammengefaßt, kann festgestellt werden, daß für ein Bahnsystem mit einem bestimmten Achsdruck stets mit vier, äußerst-fünf konstruktiv einwandfrei ausgelegten und geeigneten Motorgrößen für alle erdenklichen Aufgaben das Auslangen gefunden werden kann:

Achszahl, Leistungsgröße	Achsfolge	Motortyp
2	<i>B</i>	I
3	<i>C</i> , 1— <i>B</i>	II
4	<i>D</i> , 1— <i>C</i> , 1— <i>B</i> —1, <i>B</i> + <i>B</i>	2×I
5	<i>E</i> , 1— <i>D</i> , 1— <i>C</i> —1, 1— <i>B</i> —2	III
6	{ <i>F</i> , 1— <i>E</i> , 1— <i>D</i> —1, 2— <i>C</i> —1} {2— <i>B</i> —2, <i>C</i> + <i>C</i> , 1— <i>B</i> + <i>B</i> —1}	2×II
7	1— <i>D</i> —2	IV
8	<i>D</i> + <i>D</i> , 1— <i>C</i> + <i>C</i> —1, 2— <i>D</i> —2}	4×I oder 2×V

11. Der Gestellmotor für Einzelantrieb. Die besprochenen Gefahren des Parallelkurbelgetriebes gaben Veranlassung zur Entwicklung solcher Getriebeanordnungen, die beim Gestellmotor die Anwendung rein umlaufender Übertragungsmittel mit stetiger Kraftübertragung ermöglichen. Die diesbezüglichen Bestrebungen führten unter einem zum Einzelantrieb.

In diese Gruppe gehört der von BBC (Abb. 313) 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 ausgeführte Treibstangenkupplung anlehnt. Als ein Vorteil dieser Bauart ist die Ausnützung der vollen Spurweite für die Triebmaschine anzuführen. Ähnliche Ziele verfolgt das Tschanzgetriebe (Abb. 239), das neben Freihaltung des Federspieles der Treibachse auf eine elastische Verbindung zwischen ihr und dem Motor Wert legt.

Eine weitere Abart der Treibstangenkupplung von Ganz, Abb. 223, wurde von der MFO für einen Triebwagen der Rowan-Bauart mit gefederten Verbindungen ausgeführt (Abb. 314, 315).

Die Eigenfederung von Torsionswellen zieht eine den SSW-patentierte Anordnung vor (Abb. 316).

Nach dem gleichen Prinzip sind die elastischen Achsantriebe von Klien-Lindner (Abb. 317) und Liechty (Abb. 318) gebaut.

Sämtliche Anordnungen kommen darüber nicht hinweg, daß die einfache Zahnradübersetzung die freie Formgebung der Triebmaschine behindert; daher können die Vorteile der Gestellbauart entweder nicht voll ausgenützt werden; oder man muß eine doppelte Zahnradübersetzung vorsehen.

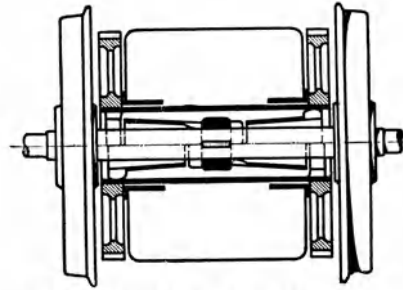


Abb. 316. Elastische Hohlachsen-Kupplung. Bauart SSW.

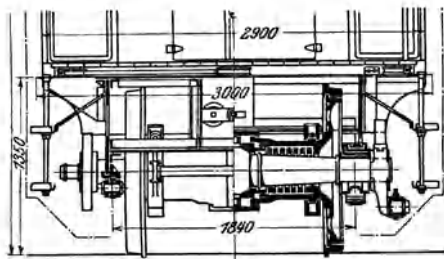


Abb. 317. Hohlachse Bauart Klien-Lindner.

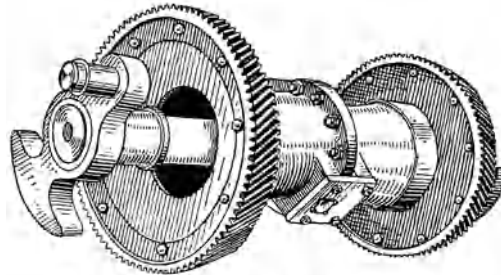


Abb. 318. Hohlwelle Bauart Liechty.

12. 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 Berührungspunkt der Teilkreise gehen muß.

In diesem Fall entspricht dem stetigen Umlauf des treibenden Rades eine stetige Winkelgeschwindigkeit des angetriebenen Rades.

Über die zur Erfüllung dieser Bedingung einzuhaltenden 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 Störungsquellen für die 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 paarender 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

Schwingungserscheinungen anzusehen sind, die ohne Arbeitsverbrauch nicht entstehen können.

Die Zahnradgeräusche treten bei Kompressoren von Vollbahnlokomotiven ganz besonders störend auf, weil sie hier das Erkennen des ordnungsgemäßen Zustandes der maschinellen Einrichtung und des Getriebes behindern. In einem ruhig laufenden Fahrzeug könnte der Fahrer durch sein vom Fahrdienst nicht in Anspruch genommenes Gehör jede geringste Störung sofort wahrnehmen.

Es hat demnach mehrfaches Interesse, die Ursachen der Zahngeräusche als 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.

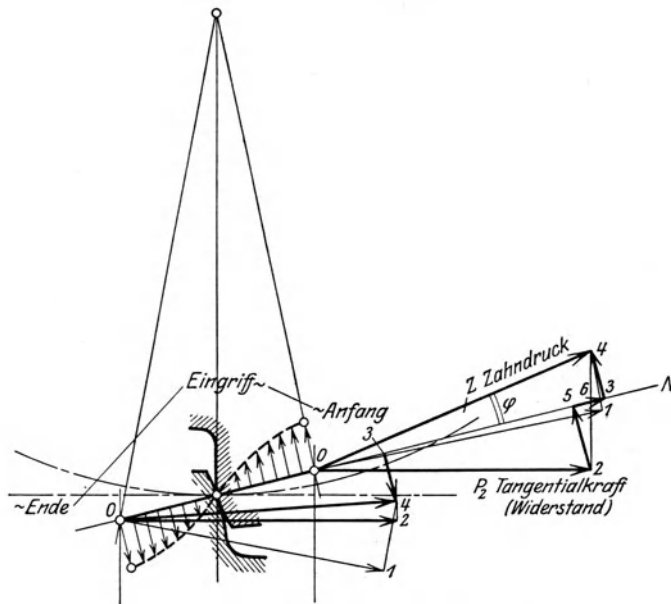


Abb. 319. Kräfteplan des Zahneingriffes.

Ist das Getriebe mit Reibung behaftet — was praktisch bei jedem noch so gut geschmierten Getriebe der Fall ist —, so 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 vom Beginn bis zum Ende des Eingriffes nicht konstant bleibt.

Nur in einem Punkte der Zentralen, nämlich im Schnittpunkt der Teilkreise mit der Verbindungslinie 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 in solchem Maß. Das Gesetz der durch diese vermischte Bewegungsart verursachten Reibung ist nicht bekannt, so viel steht jedoch fest, daß der Widerstand der gleitenden Reibung ein Vielfaches desjenigen der rollenden Reibung beträgt. Zuzufolge 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 Nullpunkte in

der Zentralen 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 Zahn-eingriffes das Entgegengesetzte der Fall ist. In der Zentralen findet keine Relativ-bewegung der berührenden Zahnflanken statt, die Wirkung der Reibung verschwindet.

Der Zusammenhang dieser Wirkungen läßt sich an Hand des Kräfteplanes zweier paarender Zähne übersehen (Abb. 319).

Der Einfachheit halber ist für das eine Zahnrad $R = \infty$ gesetzt, so daß der Fall einer Zahnstange vorliegt. Gegeben sind mit der Konstruktion die Richtungen $P_1 P_2 N$ und, bestimmte Reibungsverhältnisse vorausgesetzt, der Reibungswinkel φ und damit die Richtung des Zahndruckes Z .

02 = P_3 ist der unveränderlich gedachte Widerstand tangential zur Zahnstange,

01 = P_1 die treibende Kraft tangential zum treibenden Rad,

25 = die das Ausgleiten der Zähne bewirkende Teilkraft von P_2 in Richtung der Zahnflanke, somit \perp auf die Eingriffslinie N ,

34 = μN die Reibungskraft,

35 = die den Normaldruck vergrößernde Teilkraft der Komponente 2—4 von P_2 ,

04 = Z ist der Zahndruck,

$\operatorname{tg} \varphi = \mu$ im Beispiel 0,15.

Für $\mu = 0$ wird, dem Verzahnungsgesetz entsprechend, dauernd

$$P_1 = P_2$$

und somit die Kraftübertragung stetig und ohne Arbeitsverluste.

Hat μ einen endlichen Wert, so ändert sich während des Eingriffes Sinn und Größe der Reibungskraft. Ihre Richtung ist dauernd senkrecht auf die Eingriffsnormale, aber in jeder Stellung entspricht dieser Reibungskraft eine andere tangentiale und radiale Teilkraft. Die tangentiale Teilkraft wirkt am Anfang des Eingriffes dem stetigen Umlauf entgegen, am Ende im Sinne desselben. Das in Abb. 319 dargestellte Beispiel entspricht den Eingriffsverhältnissen einer Lamelle der Abtschen Zahnstange. Bei 15% Reibung verändert sich die Tangentialkraft um etwa $\pm 30\%$, 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 Drehungsschwingungen 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, daß beim Vorhandensein von Lagerspielen die durch Zahnräder gekuppelten Wellen auseinandergetrieben und dann wieder zusammengezogen werden. Eine bedenklich vermehrte Zahnreibung und Ausschlagen der Lager muß die Folge dieser Erscheinungen sein.

Es fragt sich, welche konstruktiven Mittel zur Verfügung stehen, um die beschriebene schädliche und störende Wirkung der Reibung der Zahnflanken zu vermeiden. Daß eine zuverlässige Schmierung als erstes Gebot anzusehen ist, bedarf keiner weiteren Erörterung.

Eine Zahnform mit vergleichsweise geringem Gleiten der paarenden Zahnflanken (Maag) wirkt im gleichen Sinne günstig. Allerdings ist dies nur durch Kürzung der Eingriffsdauer und schrägere Lage der Eingriffslinie zu erzielen.

Aus dem Kräfteplan geht ohneweiters hervor, daß die Vergrößerung der Eingriffsdauer über die Länge der Teilung das Übel wirksam verringert, weil sich entgegengesetzt wirkende Eingriffsbereiche überlagern und in ihren 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 axiale Teilkraft des Zahndruckes spricht, die das vom Standpunkt der Kollektorabnutzung wünschenswerte axiale Spiel behindert.

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 Schwingungserscheinung, 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 schiebt den dämpfenden Strom in den Motor. Während 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.

13. Grundsätzliche Einteilung der Getriebearten. Zusammenfassend können vom Standpunkt der räumlichen Anordnung der Triebmaschinen und der Geometrie des Antriebes folgende Getriebearten unterschieden werden:

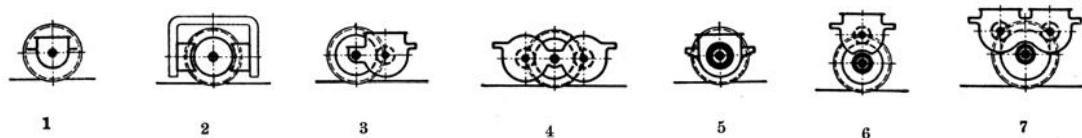


Abb. 320. Untergestellmotor-Bauformen.

A. Untergestellmotor.

a) Einzelantrieb (Abb. 320).

1. Achsmotor fest auf der Treibachse.
2. Anker fest auf der Achse, Gehäuse gefedert.
3. Zahnradmotor, Pratzelager.
4. Doppelmotor, Pratzelager.
5. Achsmotor mit Hohlwelle, gefederte Mitnehmerkupplung.
6. Zahnradmotor mit Hohlwelle, Motor senkrecht über der Achse, elastische Mitnehmer.
7. Doppelmotor ober der Achse, gefederte Hohlwelle.

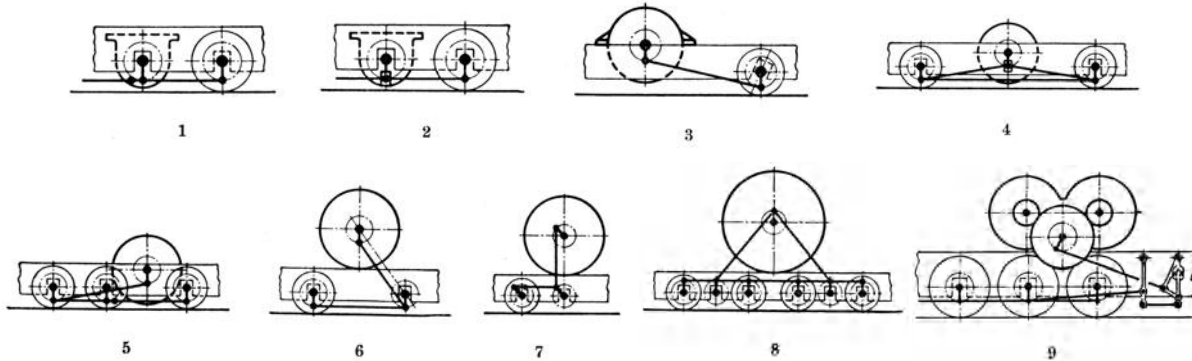


Abb. 321. Getriebe-Anordnungen für Gestellmotoren: eine Treibwelle.

B. Gestellmotor.

b) Vielachsenantrieb, eine treibende (Motor- oder Vorgelege-) Welle. (Abb. 321).

1. Motor- bzw. Vorgelegewelle und getriebene Achsen einebenig, geradlinige, gegliederte Kuppelstangen.
2. Wie vor, jedoch Schlitzkuppelstange.
3. Triebwelle überhöht, schiefe Schergabeln.
4. Motor- bzw. Vorgelegewelle gegenüber den getriebenen Achsen erhöht, Schlitzkuppelstange.
5. Wie vor, jedoch angelenkte Treibstange.
6. Schiefe Treibstange, eine Blindwelle.
7. Senkrechte Treibstange, eine Blindwelle.
8. Dreieckkuppelrahmen, zwei Blindwellen.
9. Bogen-Schubkurbel-Antrieb.

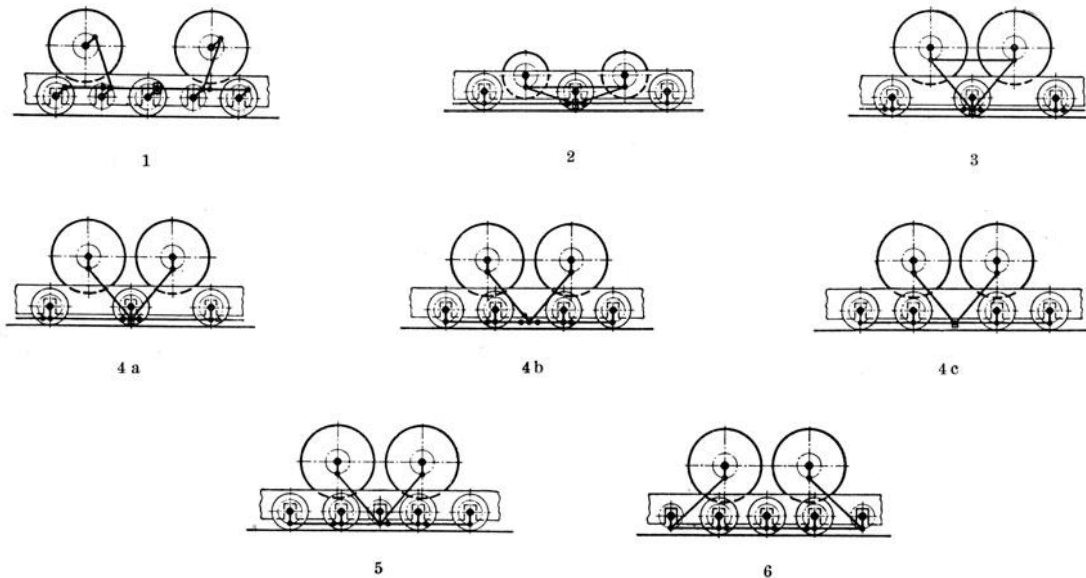


Abb. 322. Getriebe-Anordnungen für Gestellmotoren: zwei Treibwellen.

c) Vielachsenantrieb, zwei treibende (Motor- bzw. Vorgelege-) Wellen. (Abb. 322.)

1. Schlitzkuppelrahmen ohne Überhöhung der Treibwelle.
2. Schlitzkuppelrahmen mit geringer Überhöhung der Treibwellen (Kandórahmen).

3. Dreieck-Schlitzkuppelrahmen.
4. Zweistangenantrieb ohne Blindwelle.
 - a) mit Kulisse für den Kurbelzapfen der Treibachse.
 - b) mit in Augen angelenkten Kuppelstangen.
 - c) mit Kulisse an einem Punkt einer Kuppelstange angreifend.
5. Zweistangenantrieb mit Blindwelle.
6. Zweistangenantrieb mit zwei Blindwellen und gegliederten Kuppelstangen.
7. Einzelantrieb (BBC, MFO, SSW, Tschanz, West).

VII. Steuerung der Fahrzeuge.

- Axtell: Sprague GE-PC-Control. (The electropneumatic System) GER 1916, Nr. 11.
- Behn-Eschenburg: Über neue Wechselstromlokomotiven der MFO. ETZ 1912, H. 10.
- Beers: The cam operated railway controller. GER 1919, Nr. 1.
- Beers u. Axtell: Control for 1200—1500 volt car-equipment. GER 1920, H. 4.
- Binder: Über die Bestimmung der Stufen von Anlaßwiderständen. ED 1923, H. 3.
- Bragstad: Konstruktionen und Schaltungen aus dem Gebiete elektrischer Bahnen. Berlin: Springer 1907.
- Case: Recent developments in Sprague. GE-PC-Controll. GER 1916, Nr. 10.
- Clarke: The auxiliary and lighting control equipment of the Chicago, Milwaukee & St. Paul Locomotives. EJ 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. ETZ 1907.
- Döry: Die Steuerung der Wechselstromlokomotiven. Eu.M 1923, H. 4. — ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 5.
- Dover: Electric motors and control systems. London: Pitman & Son 1918.
- Engel: Einige Schalt- und Bezeichnungsregeln für elektrisch betriebene Züge. EKB 1918, H. 18.
- Forsberg: Die Steuerung der Paulista-Lokomotiven. GER 1922, Nr. 3. — Ref. Eu.M 1922, H. 25.
- Friebel: Steuerungen für elektrische Lokomotiven. Ascas Egen Tidning 1923, Nr. 1.
- Givélet: Nouveau système de démarrage pour la traction par courant continu: les démarreurs inductifs. RGE 1921, Nr. 4.
- Heilfron: Über einige neuere Fragen aus dem elektrischen Vollbahnwesen. ETZ 1910, H. 12.
- Irányi: Zeitintervalle beim Anlassen von Bahnmotoren. ETZ 1913, H. 47.
- Kleinow: Wechselstromlokomotiven der Siemens-Schuckert-Werke für Vollbahnen. EKB 1912, H. 23.
- Kraemer: Die Zugsteuerung der Felten & Guillaume-Lahmeyer-Werke. ETZ 1908, H. 10.
- Mardis: The electrical equipment and control of the Chicago, Milwaukee & St. Paul Locomotives. EJ Juni 1920, S. 235.
- Niethammer: Elektrische Zugsteuerungen. Zf.E Dez. 1903.
- Schenk: Steuereinrichtung auf der Philadelphia-Hochbahn. EJ 1922, Nr. 4. — ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 16.
- Thomson-Houston: Bulletin mensuel. Les nouveaux equipements à unités multiples de Chemin de fer de l'Etat Paris. Jan. 1913.
- Verole: Recenti performamenti dei locomotivi trifasi a cinque assi tutti accoppiati delle F.d.S.R.T., Juni 1914.
- Vogel: Die elektrische Zugsteuerung für Gleichstrombahnen. SZ 1922, H. 7.
- Wachsmuth: Die Steuerungen der elektrischen Wechselstrom-Hauptbahnlokomotiven der preuß. Staatsbahnen. GA 1916, Nr. 947.
- Webb: A new type of mine locomotive controller. GER 1918, Heft 9.
- Die Westinghouse-Zugsteuerung. EBT 1905, Nr. 18.
- Wolf: Die Schützensteuerung im Straßenbahnbetriebe. ETZ 1918, H. 37.
- Vielfachsteuerung einfacher Bauart für Triebfahrzeuge von Straßenbahn- und Überlandbahnen. SBZ Sept. 1919, S. 137. — BCM 1914, Nr. 4.
- Automatic train control (North Eastern Ry.) Railw. Gaz. & News. 1921, Nr. 21.
- Le système Zweigberghé de commande des trains à unités multiples. RGE 1921, Nr. 3.
- Les appareils de commande des locomotives électriques. GC 1915.
- Modificazione ai reostati liquidi delle locomotive elettriche. RTFI Aug. 1918, S. 83.

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

$$E_k J = J^2 W + E J,$$

wobei J den Ankerstrom,

W den Ankerwiderstand bzw. beim Serienmotor den Motorwiderstand
und E die Gegen-EMK bezeichnet.

Die Gleichung gilt auch für Wechselstrom, nur handelt es sich dann um eine geometrische Addition, wobei W kein rein Ohmscher Widerstand mehr ist.

JW ist in diesem Zusammenhang das Maß für die Verluste, muß daher möglichst klein gehalten werden, so daß bei guten Maschinen im Betrieb $E_k \cong E$ ist. Hieraus folgt, daß die Inbetriebsetzung eines Motors vom Stillstand aus 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 und zulässigen Strom erzeugt. Da 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 Fahrtrichtungswechsel dient.

2. Regelarten. Zum Anfahren und zur Geschwindigkeitsregelung von Triebmaschinen, deren Umlaufzahl von der Klemmenspannung abhängig ist, gibt es 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, die dementsprechend mehr oder weniger ausgeprägt sind, vornehmen oder eine vollständig stufenlose, rein allmähliche 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, vier oder mehr Motoren diese in Reihe, Reihenparallel und parallel schaltet, was einer entsprechenden Unterteilung der Spannung gleichkommt.

Es sind auch Versuche gemacht worden, mittels 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 sekundär praktisch beliebige Spannungen erzeugen. Der Stufentransformator für die Geschwindigkeitsregelung beim Anfahren und Fahren ist daher eine allgemein gewordene Einrichtung. Er kann in Verbindung mit einem Dreh- und Zusatztransformator die allmähliche Regelung bewirken.

Allgemein betrachtet, gehört in diese Gruppe der Einrichtungen zur Geschwindigkeitsregelung beim Gleichstrombetrieb auch die Feldschwächung, indem sie einer Spannungserhöhung am Anker gleichkommt; ihr Anwendungsgebiet ist jedoch beschränkt, weil die Feldschwächung bei Wendepolmotoren normal nicht unter 60, äußerst 50% getrieben werden soll.

Die Feldschwächung beeinträchtigt — insbesondere bei Mittelspannungseinrichtungen — die Betriebssicherheit der Wagenausrüstung. Die Feldwicklungen von 500 bis 700 V-Motoren weisen verhältnismäßig kleine Ohmsche Werte auf, die Verschlechterung z. B. eines Schaltkontaktes 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, da 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 V, entsprechend 1300 A, können unmittelbar geschaltet werden, d. h. der vom Fahrer betätigte Fahrerschalter ist so eingerichtet, daß er selbst die erforderlichen Ein-, Aus- und Umschaltungen des Motorstromes besorgt. Die oben genannte Leistung führt bereits zu sehr großen Dimensionen, so daß die Fahrerschalter unhandlich und sehr schwer werden. Diesem System haftet ferner 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 es sich nicht vermeiden, daß die Fahrerschalter für direkte Schaltung bei großen Leistungen sehr schwer werden, so daß deren

Bedienung einen großen Kraftaufwand des Fahrers verlangt, und sich die Schaltungen eben aus dieser Ursache nicht mit der erwünschten Raschheit durchführen lassen.

Es hat sich daher für größere Leistungen das System der mittelbaren Steuerung eingebürgert, bei welchem mittels schwacher Ströme von einigen wenigen Amp. oder mittels 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 ohneweiters durchführbar, jedoch unwirtschaftlich insbesondere dann, wenn das Bedürfnis nach Zügen, die aus

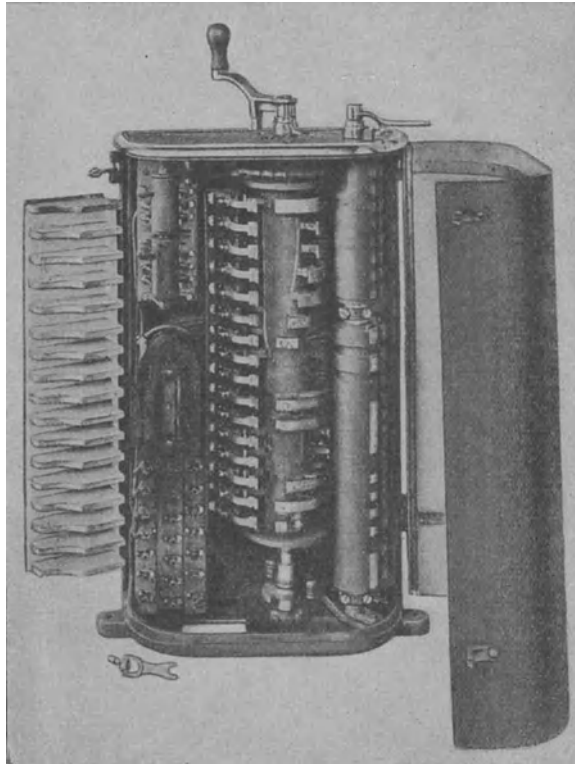


Abb. 323. Zweimotoriger Straßenbahnschalter für Reihen-Nebeneinanderschaltung u. Kurzschlußbremsung. (Ältere Bauart AEG.)

mehreren Triebwagen bestehen, sich des öfteren wiederholt.

Die unmittelbare Steuerung mehrerer Fahrzeuge von einem Fahrerschalter aus verlangt sehr verwickelte 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 Fahrtrichtungswechsel bei eingeschaltetem Strom unmöglich ist, weil eine derartige Schaltung einen schweren Kurzschluß zur Folge haben würde.

Weiterhin müssen Feld und Anker vor dem Einsetzen der Stromschaltung bereits in der der jeweiligen Fahrtrichtung entsprechenden Richtung geschaltet sein, weil nur so sicher vermieden wird, daß Feld und Anker nicht gleichzeitig Strom erhalten, d. h. der Motor etwa unerregt an die Spannung geschaltet wird.

Um diesen Bedingungen zu entsprechen, ist es zur Regel geworden, die Fahrschalter (Abb. 323) mit zwei gegenseitig verriegelten Schaltwalzen auszurüsten. Die eine, die Fahrtrichtungswalze, kann nur bei ausgeschaltetem Strom betätigt werden und führt die richtige Folge der Anker- und Feldwicklungen 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, und zwar je nach der Linienspannung und Stromstärke an mindestens zwei, meistens bis 6 Stellen zu erfolgen, damit der entstehende Lichtbogen eine möglichst lange

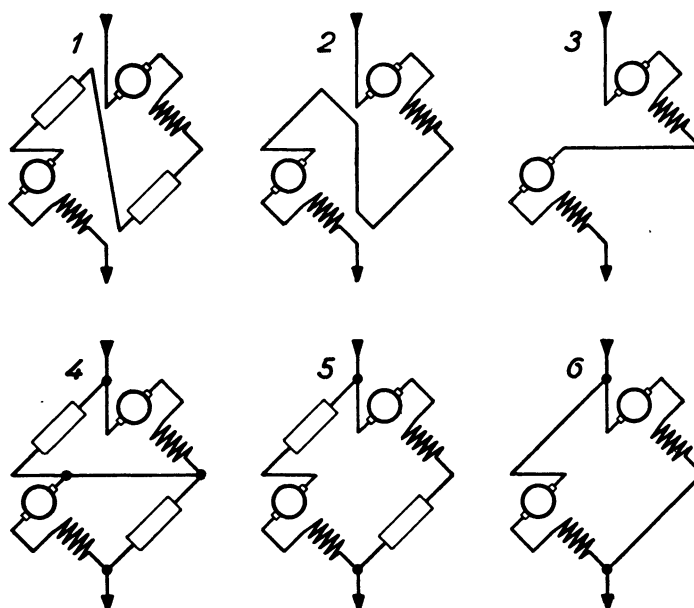


Abb. 324. Brückenschaltung für zwei Motoren.

Strecke zu überbrücken hat. Außerdem ist es unerlässlich, eine wirksame elektromagnetische Funkenlöschung vorzusehen, um ein Anbrennen der Berührungsstellen zu verhindern.

Bei Fahrschaltern, die auch für elektrische Kurzschlußbremsung eingerichtet sind, wird die zur Herbeiführung der Generatorwirkung erforderliche Umkehrung des Ankers mit einer dritten Schaltwalze bewirkt, für welche die gleiche 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 nebeneinander 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 . .	$\frac{2}{6}$	$\frac{2}{4}$
4 Motoren hintereinander, 3 Gruppen nebeneinander . .	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$
3 Motoren hintereinander, 4 Gruppen nebeneinander . .	$\frac{4}{3}$	$\frac{4}{4}$

Zu diesen Schaltungen, die an dem Übelstand der Hintereinanderschaltung vieler Motoren kranken, führt die den Motoren unmittelbar angelegte Hochspannung 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, meist gebräuchlichen Art, wird der Fahrstrom nicht unterbrochen, sondern zunächst der eine Motor kurzgeschlossen und der andere mit vorgeschaltetem Widerstand an die volle Spannung gelegt. Der erste Motor 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 volle Spannung gelegt.

Die erste Methode schont naturgemäß den Fahrschalter und die Motoren; es erleidet jedoch das Fahrzeug während des Umschaltens eine Einbuße an Beschleunigung,

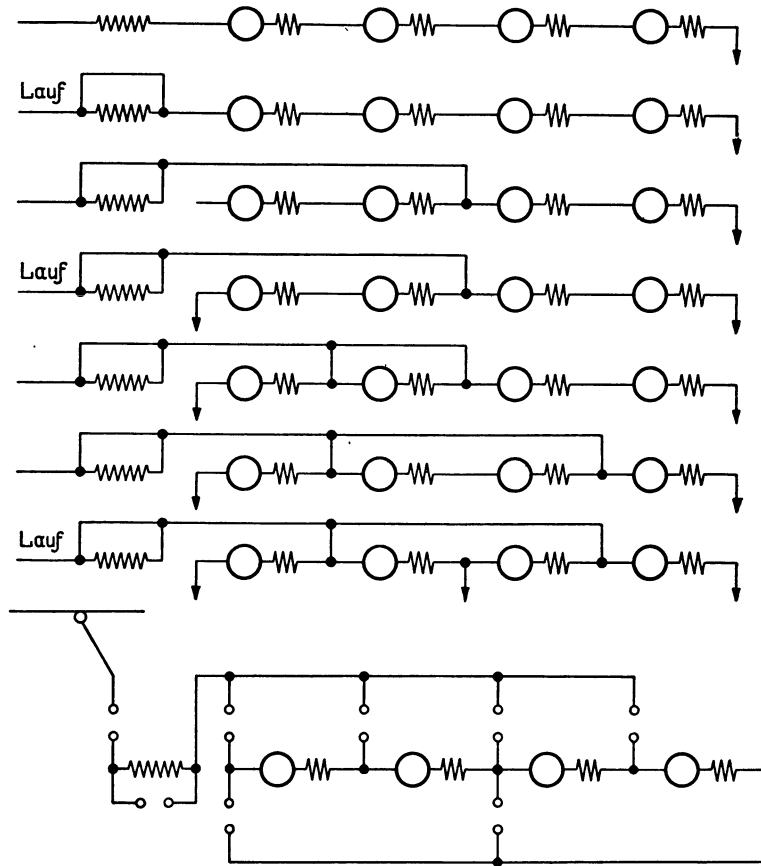


Abb. 325. Schema einer Mehrfach-Reihen-Nebenschaltung für drei Geschwindigkeiten mit vier Motoren.

weil nur die halbe Motorzahl arbeitet. Ein Nachteil dieser Schaltung ist, daß bei fehlerhafter Bedienung gegebenenfalls längere Zeit nur mit der Hälfte der Motoren gefahren werden kann, 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 bzw. zur Hälfte aussetzt und der Wagen, wenn zu langsam geschaltet wird, eine nennenswerte Verminderung der Geschwindigkeit erfährt. Durch die Brückenschaltung (Abb. 324) wird erreicht, daß auch im Übergang alle Motoren fast dieselbe Stromstärke beibehalten, so daß auch die Zugkraft angenähert aufrecht bleibt.

Diese Schaltung erfordert vergleichsweise viel Schaltfinger, weswegen sie nur für Betriebe mit schweren Anforderungen vorgesehen wird.

Bei viermotorigen Wagen läßt sich nach einem amerikanischen Patent von Jones mit nur acht Schaltern und

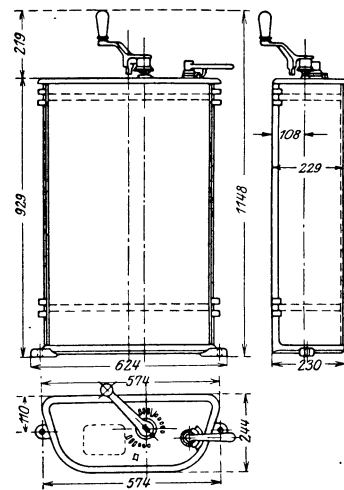


Abb. 326. Straßenbahn-Fahrschalter.

einer einzigen Widerstandsstufe eine befriedigende Steuerung mit drei wirtschaftlichen Betriebsstellungen einrichten (Abb. 325).

5. Fahrschalter für unmittelbare Steuerung. Die allgemein üblichen Gleichstrom-Fahrschalter für Straßen- und Lokalbahnwagen gehören bis etwa 1000 V Betriebs-

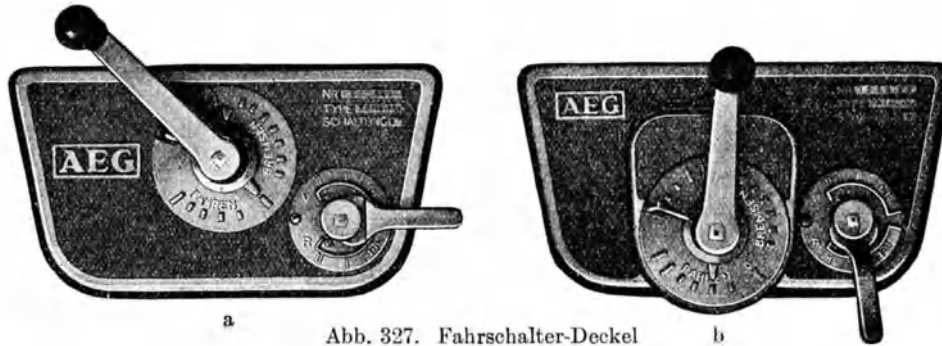


Abb. 327. Fahrschalter-Deckel

- a) mit unmittelbarem Antrieb der Hauptschaltwalze für offene Plattformen,
- b) für geschlossene Plattformen mit Vorgelege-Antrieb.

spannung und für Leistungen von vier Motoren bis zu je 80 PS der Gruppe der unmittelbaren Schalter an.

Für zweimotorige Wagen lassen sich die Fahrschalter betriebssicher mit Dimensionen bauen, die eine bequeme Unterbringung im Fahrzeug gestatten und eine leichte Bedienung durch den Fahrer ermöglichen.

Straßenbahnkontroller sind meist etwa 930 mm hoch, 575 mm breit und 230 mm tief (Abb. 326).

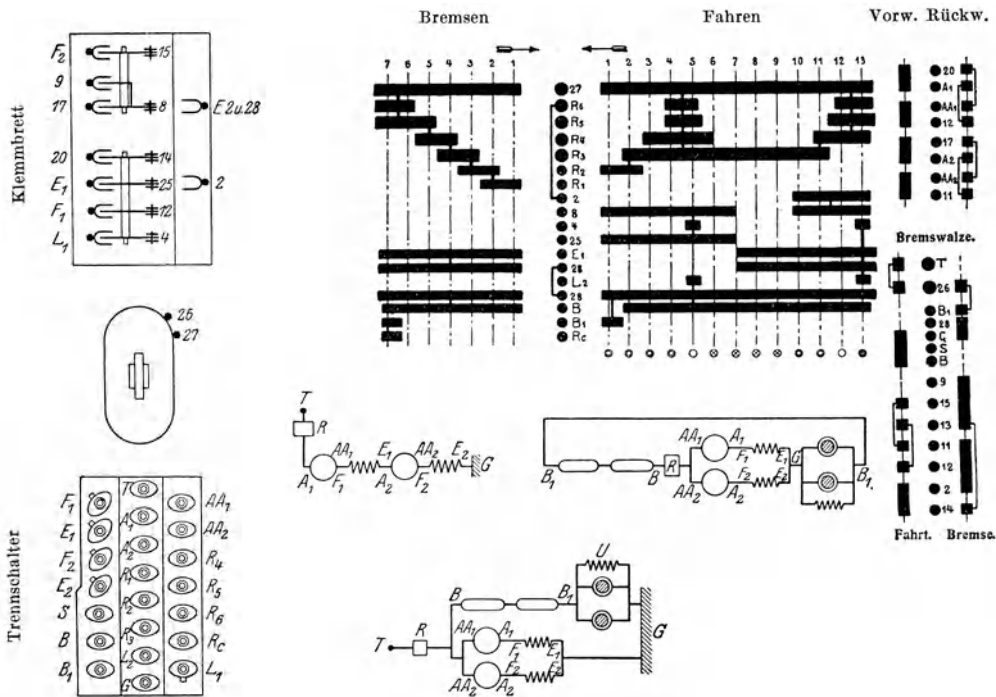


Abb. 328. Abwicklung und Schaltprinzip eines Straßenbahnfahrschalters für zwei Motoren, Reihen-Nebeneinanderschaltung und Kurzschlußbremse. Punkte mit gleicher Bezeichnung sind verbunden (AEG).

T: Anschluß an die Fahrleitung. G: an die Erde. A und AA: Ankerklemmen. F und E: Klemmen der Feldwicklung: 26—27 Funkenlöschspule.

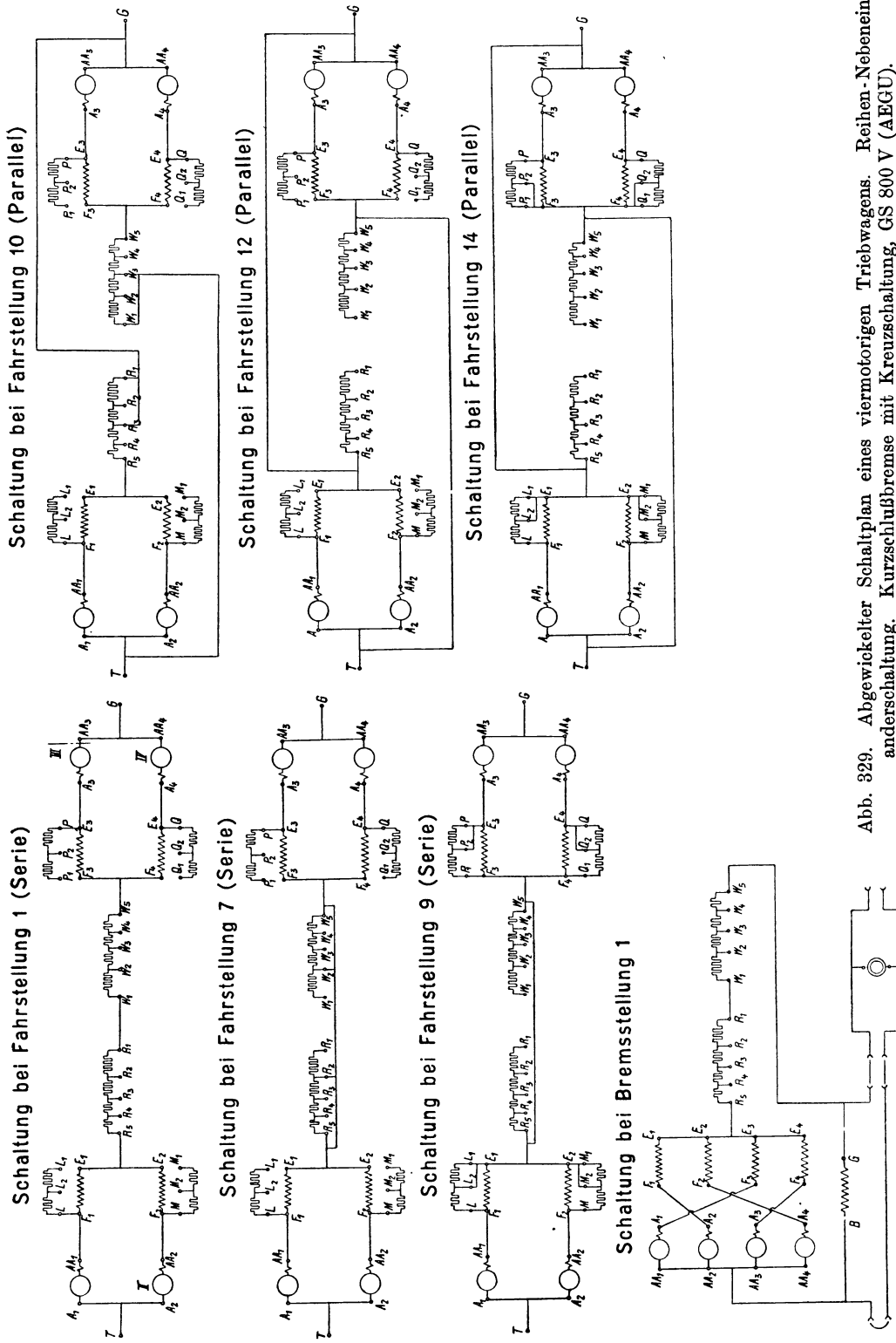


Abb. 329. Abgewickelter Schaltplan eines viermotorigen Triebwegens. Reihen-Nebenein-
anderschaltung. Kurzschlußbremse mit Kreuzschaltung, GS 800 V (AEGU).

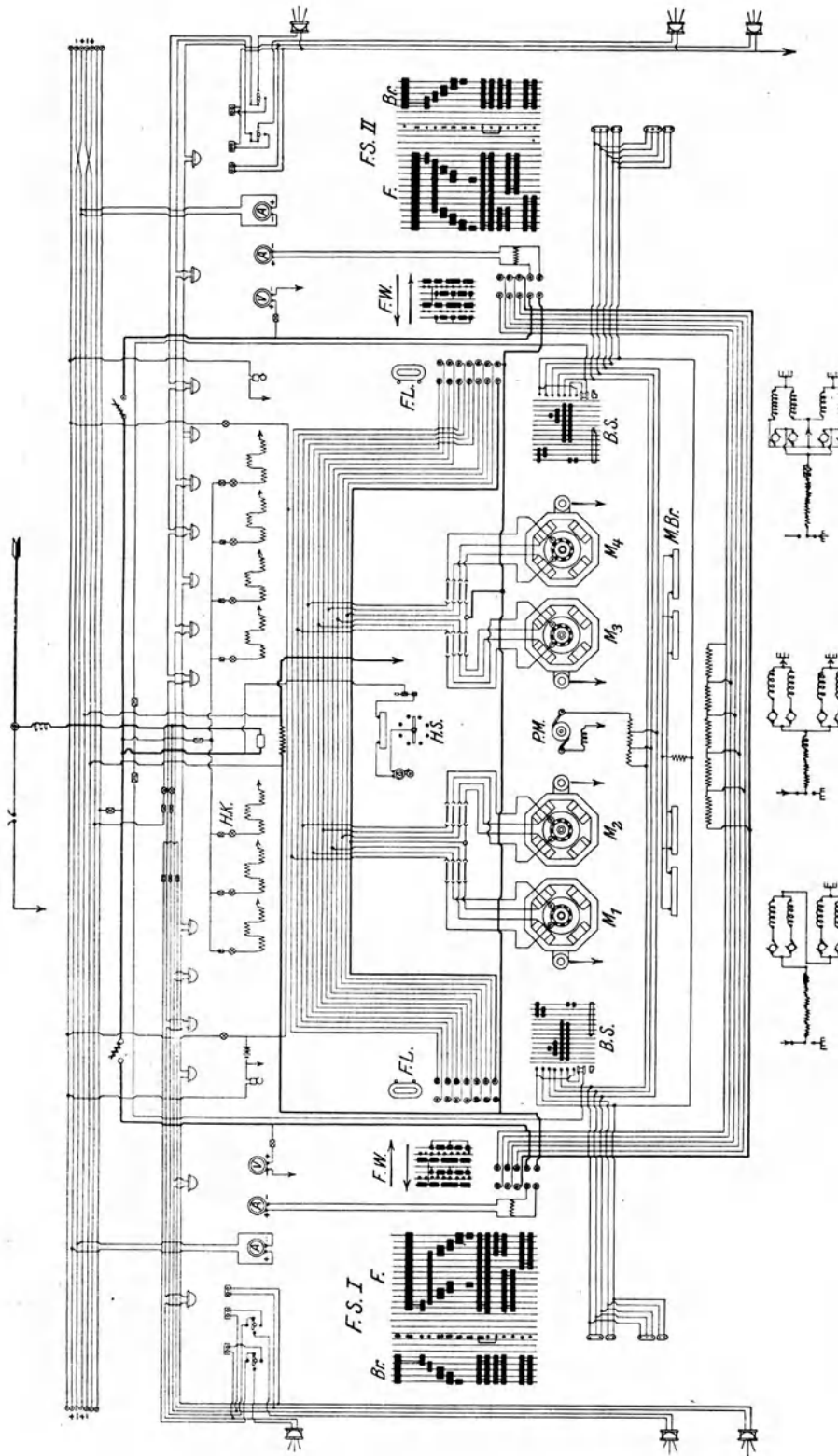


Abb. 330. Schaltplan eines viertmotorigen Triebwagens der Berninabahn (BBc).

Leistung 4×70 PS/h.
 Spannung 750 V.
 Stromart Gleichstrom.

Steuerung direkt abgestuft.
 Kurzschlußbremse, elektromagn. Schienenbremse, Vakuumbremse, elektr. Heizung.

Da die Kurbel der Hauptschaltwalze in der Regel mit 175 mm radialer Länge hergestellt wird, muß der Fahrschalter von der Wagenspritzwand etwas zurückgesetzt werden, damit der Fahrer in der Bedienung der Kurbel nicht behindert wird. Hier-

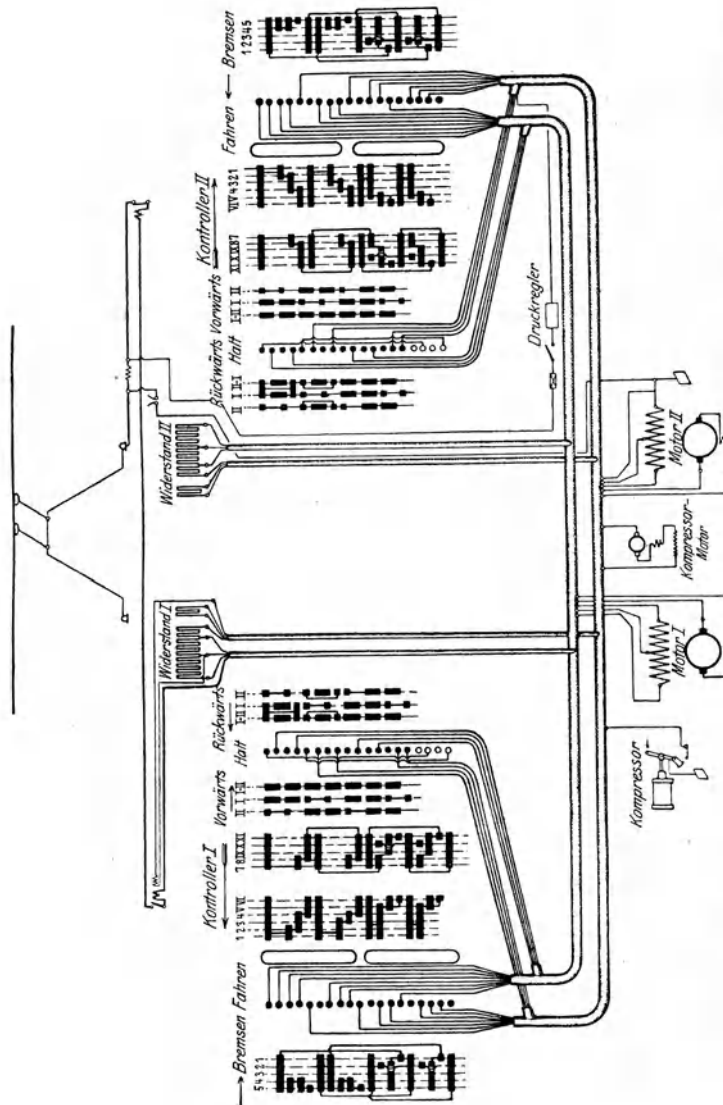


Abb. 331. Schaltbild der zweimotorigen Triebwagen der Bahn Frankfurt—Homburg, GS 1000 V. Kurzschlußbremsung, Feldschwächung, unmittelbare Steuerung.

durch wird von der Plattform etwas Raum verloren. Diesem Übelstand kann man dadurch begegnen, daß man die Hauptschaltwalze durch ein Zahnradvorgelege (Abb. 327 b) mit der Kurbelwelle verbindet.

Die Abb. 328 bis 334 stellen Beispiele für Schaltpläne mit unmittelbarer Steuerung dar.

Die richtige Bemessung aller Schaltelemente ist Sache des Entwurfes; dem Bahningenieur obliegt 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 wurde, daß die einzelnen Schaltelemente räumlich um so weiter voneinander angeordnet sind, je größere Spannungsunterschiede sie aufweisen. Größte Wichtigkeit ist der Anordnung der Funken-

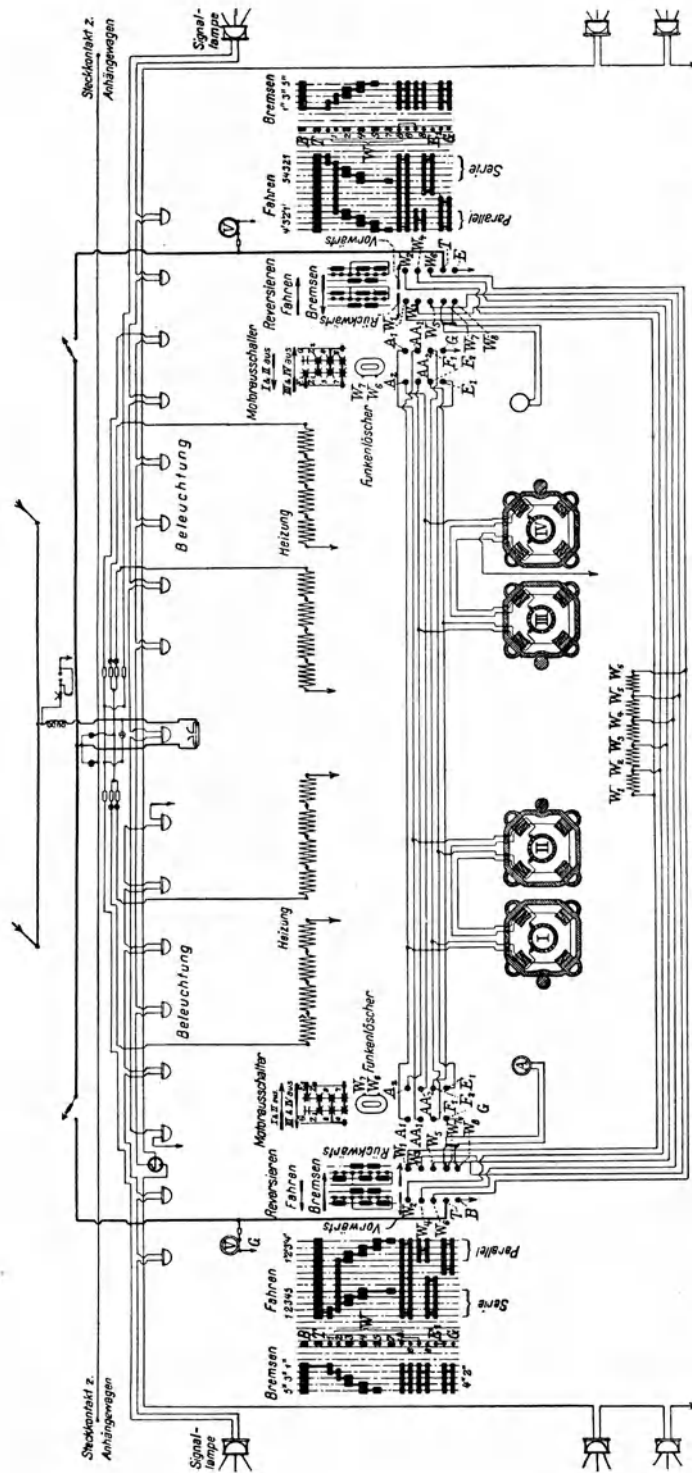


Abb. 332. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Bahn Lugano-Tesserete, GS 1000 Volt, 4×45 PS, Kurzschlußbremse, unmittelbare Steuerung (Allioth).

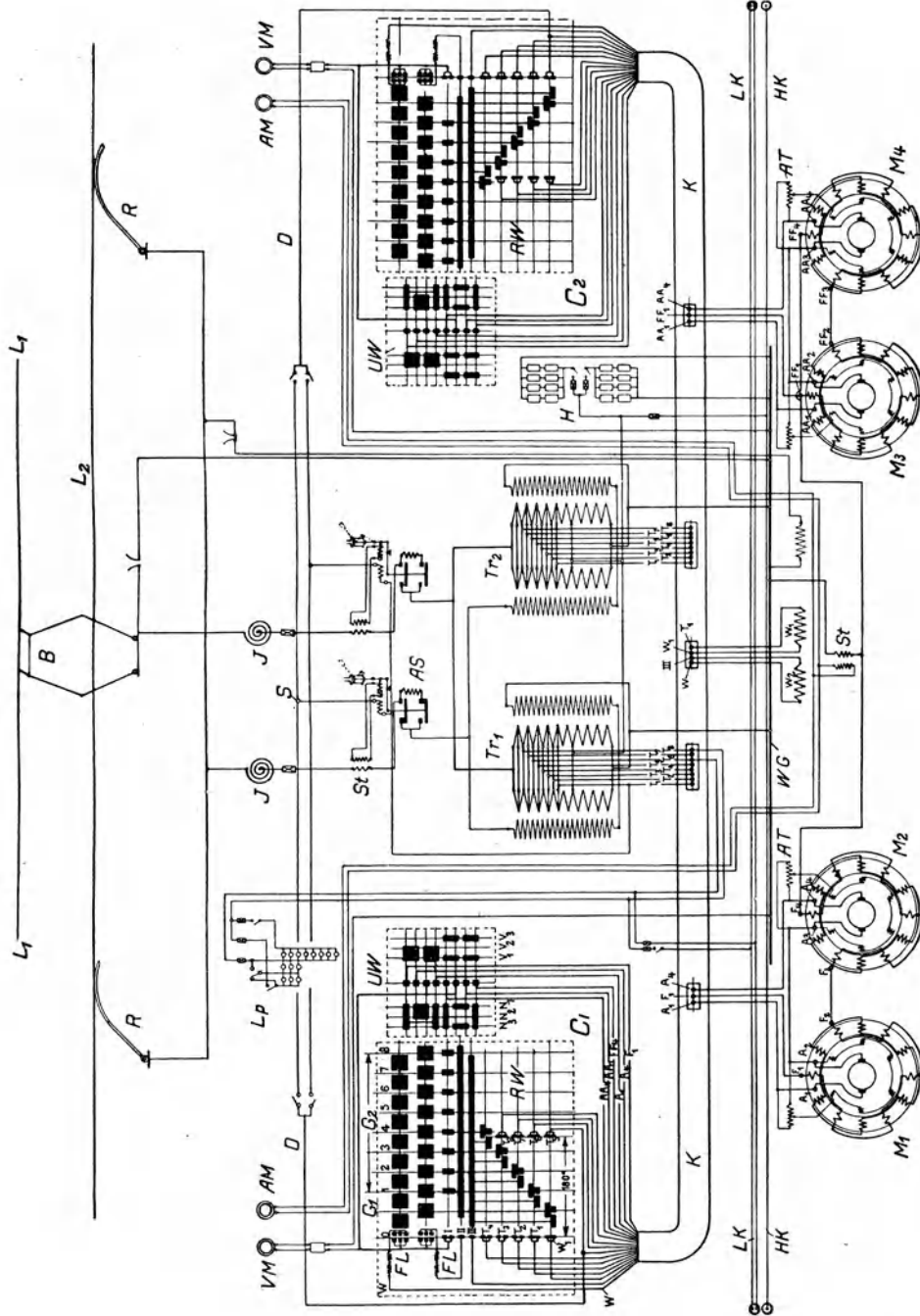


Abb. 333. Schaltbild eines Triebwagens der Valle—Maggiabahn WS 800 und 500 V, 20 Per., unmittelbare Steuerung, Gegenstrombremse (MFO). AM Strommesser, AS selbsttätiger Höchststromschalter, durch Überstrom, Druckluft und auch von Hand betätigt, AT Drosselspule, B Hochspannungsbügel, C₁, C₂ Fahrschalter, D Spannungsleitung, FL Bläsespule, G Fahrschalterstellungen zum Anfahren, G₂ Fahrschalterstellung für Betwagen, J Drosselspule, K Kabelschlauch, L₁, 800 V Fahrleitung, L₂, 5000 V Fahrleitung, LK und Lp Beleuchtung 55 V, M₁ bis M₄ Motore, N₁ Fahrwendstellung „Rückwärts“ für die Motoren 1 bis 4, N₂ für die Motore 1 und 2, N₃ für 3 und 4 R Schleifbügel, RW Hauptschalterwalze, S Schwachsicherung, St Stromwandler, Tr₁ und Tr₂ Transformatoren, UW Fahrtwender, V₁ Fahrtwendstellung „Vorwärts“ für die Motore 1 bis 4, V₂ für die Motore 3 und 4, VU Spannungsmesser, WG Erdanschlüsse am Wagengestell.

löschung beizumessen; diese soll immer so beschaffen sein, daß das stärkste Feld — die stärkste Blaswirkung — bei demjenigen Schaltfinger auftritt, der in bezug auf Stromstärke und Zahl der Schaltungen am meisten beansprucht ist. Zuzufolge der unver-

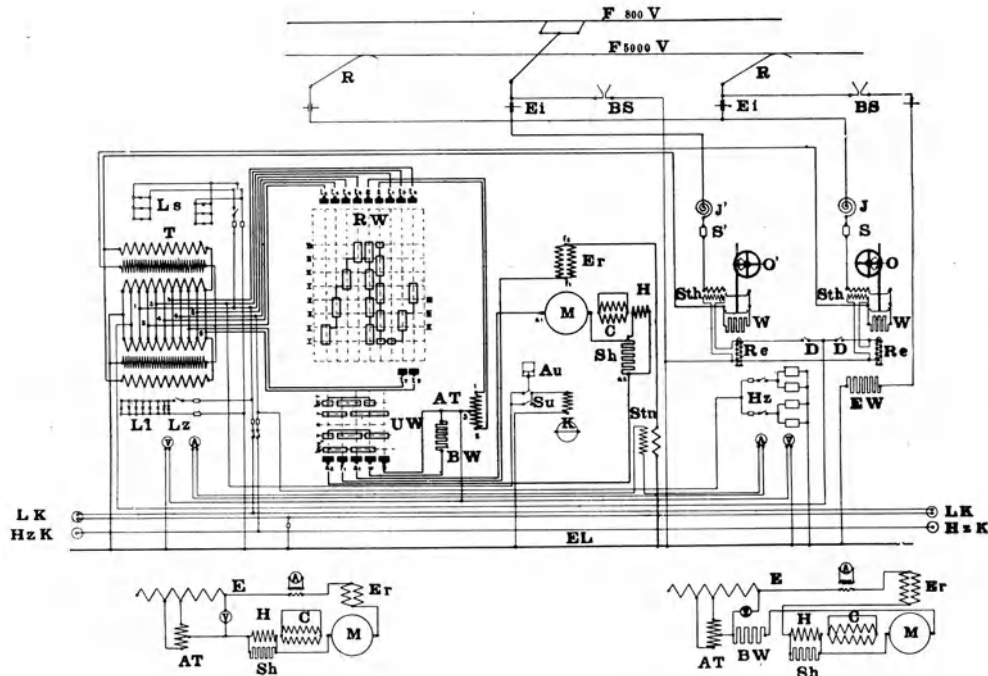


Abb. 334. Schaltungsschema der 250 PS-Valle—Maggia-Lokomotive (MFO).

<i>A</i> = Amperemeter	<i>EW</i> = Erdungswiderstand	<i>Re</i> = Auslöserelais
<i>Au</i> = Druckluftschalter der Kompressorgruppe	<i>F</i> = Fahrdraht	<i>RW</i> = Regulierwalze des Kontrollers
<i>AT</i> = Autotransformator	<i>H</i> = Hilfspolwicklung d. Triebmotors	<i>S, S'</i> = Schmelzsicherungen
<i>BS</i> = Blitzschutzvorrichtungen	<i>Hz</i> = Heizung	<i>Sh</i> = Shunt-Widerstand zur Hilfspolwicklung des Triebmotors
<i>BW</i> = Bremswiderstand	<i>Hsk</i> = Heizkuppelung	<i>Sh</i> = Shunt-Widerstand zur Hilfspolwicklung des Triebmotors
<i>C</i> = Kompensationswicklung des Triebmotors	<i>K</i> = Kompressormotor	<i>Stn</i> = Unterspannungs-Stromwandler
<i>D</i> = Druckknöpfe für Betätigung der Relais	<i>Li</i> = Innenbeleuchtung	<i>Su</i> = Umgehungsschalter für d. Kompressormotor
<i>E</i> = Erde	<i>Ls</i> = Reflektoren	<i>T</i> = Transformator
<i>Ei</i> = Hochspannungseinführungen	<i>Lz</i> = Stecker	<i>UW</i> = Umschaltwalze des Kontrollers
<i>Er</i> = Erregerwicklung d. Triebmotors	<i>LzK</i> = Lichtkuppelung	<i>V</i> = Voltmeter
<i>EL</i> = Erdleitung	<i>M</i> = Triebmotor	<i>W, W'</i> = Vorsichtwiderstände der Ölschalter
	<i>O</i> = Ölschalter, 5000 V	
	<i>O'</i> = Ölschalter, 800 V	
	<i>R</i> = Rutenstromabnehmer	

meidlichen großen Streuungen wird eine den ganzen Schaltbereich beherrschende Bläsewicklung einer nur einen verhältnismäßig kleinen Kern umfassenden Spule vorzuziehen sein. Die beste Lösung stellt diesbezüglich eine Anordnung dar, bei welcher jeder Schaltfinger seine eigene Bläsewicklung erhält und diese vom Strom des betreffenden Schaltfingers durchflossen wird.

6. Schaltung der Widerstände. In bezug auf die Schaltung der Widerstände können sämtliche Stufen dauernd in Reihe geschaltet sein (Abb. 335), wobei die Wärmekapazität jeder folgenden, also später kurzgeschlossenen oder abgeschalteten Stufe größer bemessen sein muß, als die der vorgehenden. Da 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. 336) 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.

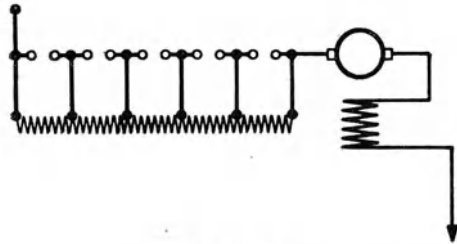


Abb. 335.

Anfahrwiderstände in Reihenschaltung.

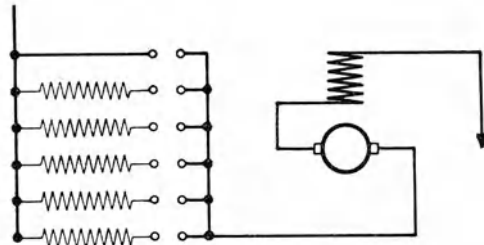


Abb. 336.

Anfahrwiderstände in Nebeneinanderschaltung.

7. Mittelbare Steuerungen. Die mittelbaren Steuerungen sind dadurch gekennzeichnet, daß der vom Fahrer bediente Schalter (Abb. 337, 338) nur Hilfsströme schaltet, die dann ihrerseits elektromagnetische Einzelschalter — Hüpfer oder Schützen genannt — betätigen oder Ventile anheben, wodurch mittelst Luftdruck gesteuerte Einzelschalter geöffnet bzw. geschlossen werden. Schließlich kann durch die Hilfsströme auch ein besonderer Antriebsmotor für eine Schaltwalze oder für eine Nockenwelle, die die Einzelschalter anhebt, gesteuert werden.

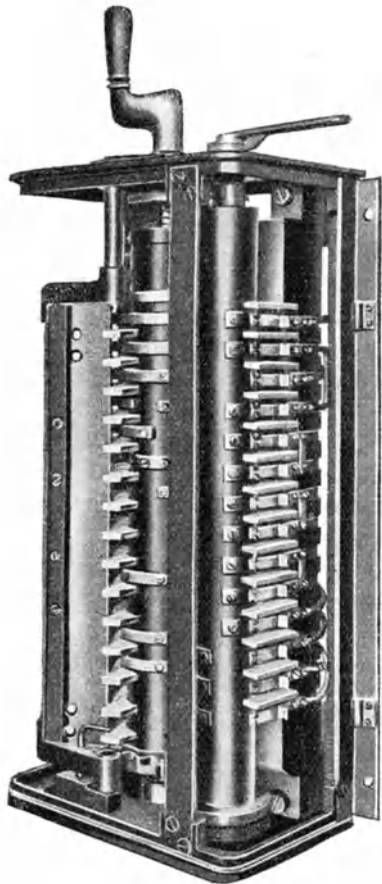


Abb. 337. Steuerschalter der Triebwagen Bonn—Siegburg—Königswinter, 1000 V (SSW).

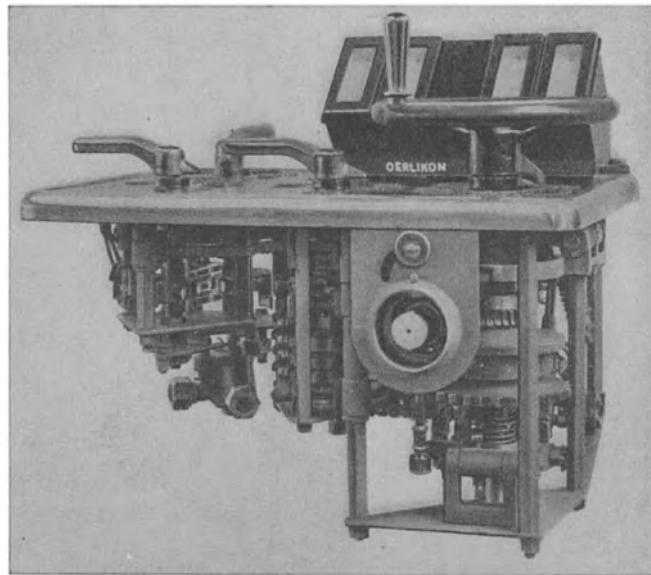


Abb. 338. Fernsteuerungs-Kontroller für Einphasen-Wechselstrom-Lokomotiven, mit elektrischer oder elektropneumatischer Fernbetätigung von: Stromabnehmer, Lokomotiv-Kontroller, Fahrtwender, Hoch u. Niederspannungs-Ölschalter, mit mechanischer Verriegelung der Betätigungshebel (MFO).

Der Wert der Fernschalter liegt darin, daß man die Einzelschalter möglichst nahe an diejenige Stelle — Motor oder Transformator — heransetzen kann, wo die fragliche Schaltung zu erfolgen hat und hierdurch die Verlegung starker Kabel, die wegen der

hohen Leistungen und verhältnismäßig kleinen Spannungen nötig sind, erspart; weiters, daß die hohen Spannungen vom Führerstand ferngehalten werden und schließlich, daß der Steuerapparat in eine Anzahl voneinander unabhängiger, einzeln leicht auswechselbarer Bestandteile aufgeteilt werden kann.

Die Schütze der AEG, der GEC und der SSW sind rein elektromagnetische Schalter; die BEW und West. bauen elektromagnetisch gesteuerte Luftdruckschütze.

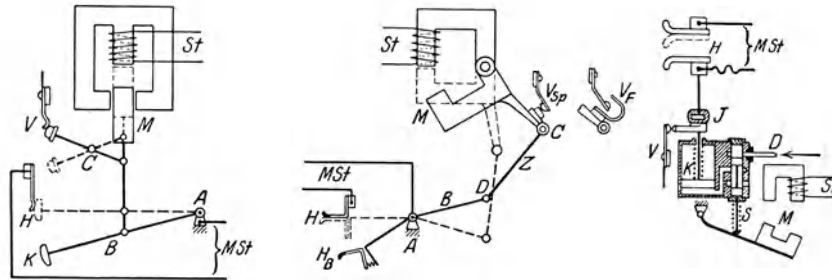


Abb. 339. Elektromagnetische Fernschalter (Hüpfers, Schütze) a) SSW, b) AEG und GEC, c) West. und BEW.

St = Zugspule, M = Schaltmagnet, V = Sperrkontakt, H = Hauptstromschalter, K = Preßluftkolben.

8. Elektromagnetische Schalter für mittelbare Steuerungen. Beim SSW-Hüpfers (Abb. 339a) greift der Zugmagnet unmittelbar an dem einarmigen Hebel an, der am freien Ende die Kontaktleiste trägt. Diese

berührt in geschlossenem Zustande des Hüpfers eine Reihe von federnden Kontakten, die senkrecht zur Bildebene angebracht 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 Hüpfers benötigen daher sehr leistungsfähige Zugmagnete.

Aus dem gleichen Grunde sind sie auch gegen Spannungsschwankungen so empfindlich, daß sie eine besondere Hilfsgruppe benötigen, bestehend aus Spartransformator, Hüpfers und Widerstand, die selbsttätig für Einhaltung einer nur um wenige Volt schwankenden Spannung sorgt. Die federnden Kontakte berühren die Kontaktleiste nur in einer sehr schmalen Fläche; es müssen zur Bewältigung stärkerer Ströme bis 14 Kontakte nebeneinander angeordnet werden, wozu noch die Funkenkontakte kommen.

Die AEG und die GEC (Abb. 339b, 340) verwenden bei ihren Schützen eine Knie-

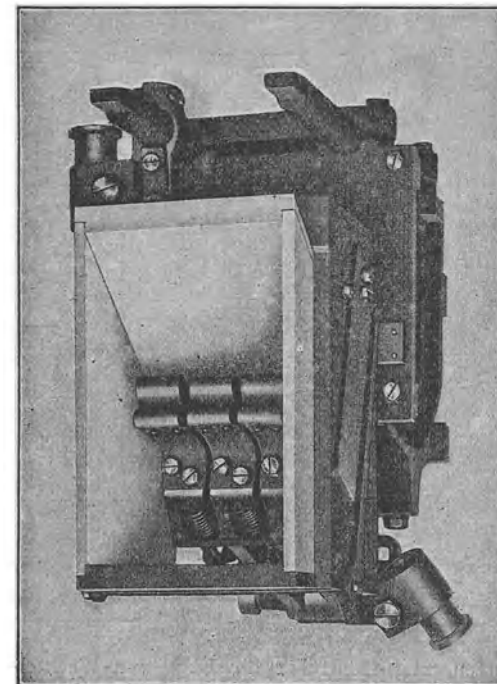


Abb. 340. Elektromagnetischer Einzelschalter mit Funkenlöschung und Abwälzkontakten (AEG).

hebelwirkung, indem sie den Magnetanker mittels 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 Wälzkontakte ausgebildet, die aus Kupfer

bestehen und mit einem eisernen Schuh ausgerüstet sind. Beim Anziehen des Magneten legen sich zuerst die eisernen Schuhe der Wälzkontakte gegen entsprechend ausgebildete feste Kontakte, dann wälzen sich beide Kontakte aufeinander ab, berühren sich schließlich

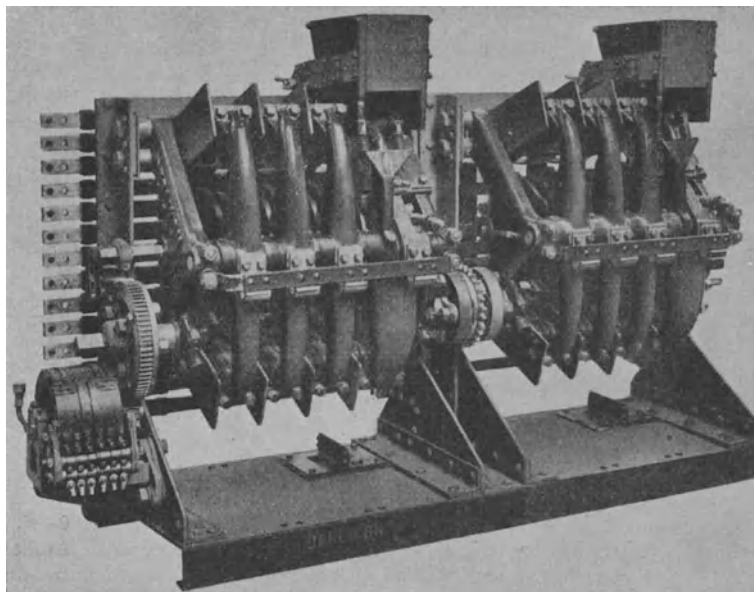


Abb. 341. Fernbetätigter Gruppenschalter (MFO).

mit einer größeren Fläche, wobei der Druck der Kontakte aufeinander dank der Kniehebelwirkung groß wird. Aus letzterer Ursache kommt die AEG selbst für große Stromstärken mit höchstens drei Paar Wälzkontakten aus. Diese sind gleichzeitig Funkenzieher, wobei sie durch eine vom Hauptstrom durchflossene Bläterspule unterstützt werden.

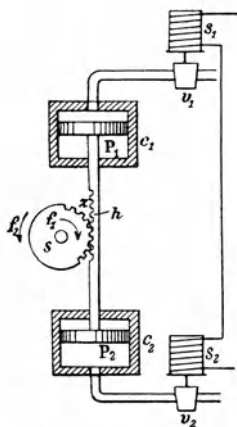


Abb. 342. Schema des elektropneumatischen Fahrtwenders (West.).

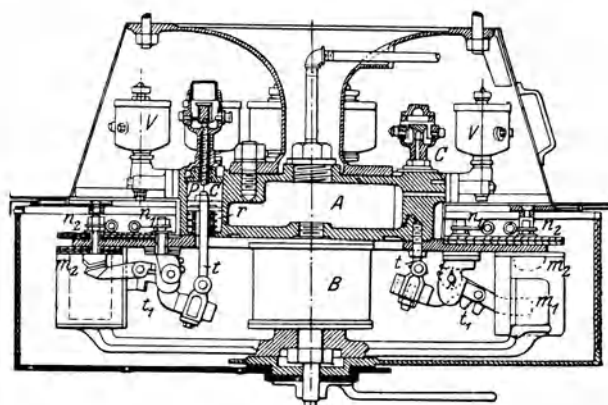


Abb. 343. Elektropneumatischer Fernschalter (West.).

Die eisernen Kontaktschuhe verhindern eine Verschlechterung der Berührungsflächen durch Schaltfeuer, da Eisen viel weniger zur Perlenbildung neigt als Kupfer. Durch die Kniehebelwirkung ist jedoch die Schaltgeschwindigkeit geringer als beim SSW-Hüpfen. Die AEG-Schütze sind gegen Spannungsschwankungen wenig empfindlich.

Eine Vereinfachung der Steuerung, insbesondere der Verriegelung, erzielt die MFO durch den Zusammenbau mehrerer Einzelschalter, die gemeinsam mechanisch betätigt werden. Der Stufenschalter Abb. 341 dient für 12 Fahrstufen mit 2500 A und hat zentrale Funkenlöschung. Der Antrieb erfolgt durch Servomotor oder von Hand aus. Es können zwei solche Schaltergruppen von einem Motor

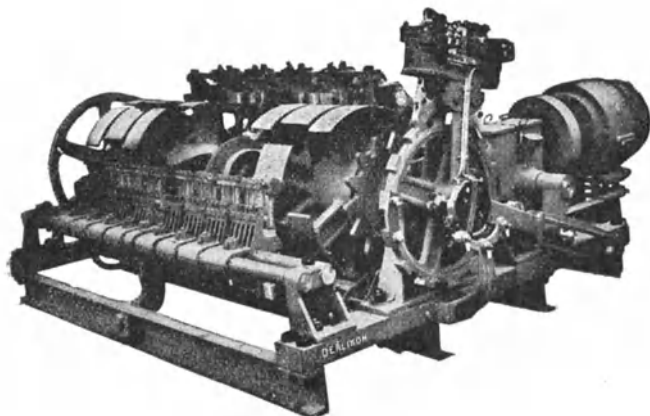


Abb. 344. Lokomotivkontroller für Einphasen-Wechselstrom. 3000 A, 600 V, 12 Stufen. Antrieb durch ferngesteuerten Servomotor (MFO).

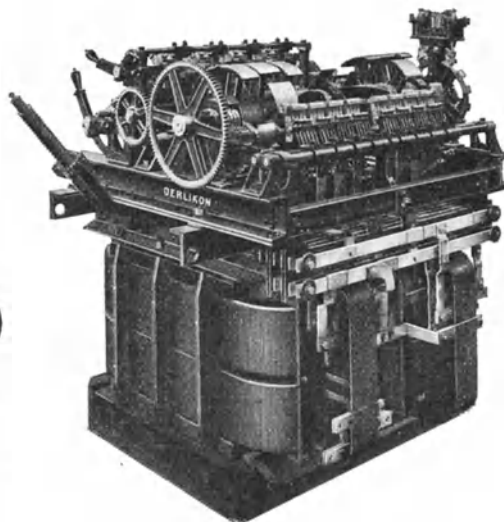


Abb. 345. Lokomotiv-Kontroller für Einphasen-Wechselstrom, 3000 A, 600 V, 12 Stufen. Liegende Anordnung zum Aufbau auf Transformator oder stehende neben dem Transformator. Antrieb durch Elektromotor oder Luftzylinder mittels elektrischer, pneumatischer oder elektropneumatischer Fernsteuerung (MFO).

bedient werden und genügen für 24 Fahrstufen, wozu nur sechs Steuerstromleitungen nötig sind.

Gegen Spannungsschwankungen gänzlich unempfindlich ist der elektropneumatische Schütz, indem hier Druckluft die Schaltbewegung bewirkt und der Steuerstrom nur die entsprechenden Ventile auslöst (Abb. 329 c, 341, 343).

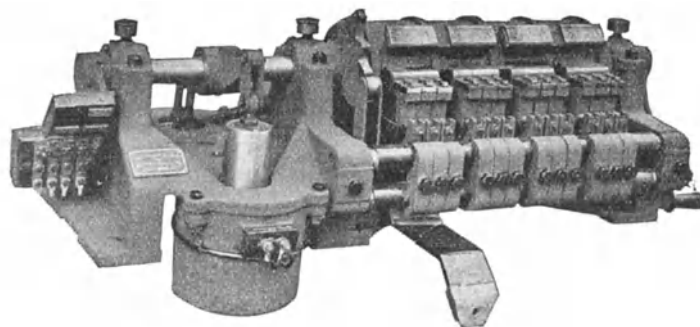


Abb. 346. Elektromagnetisch betätigter Fahrtwender der 1 - E - 1-Lokomotive der Lötschbergbahn (MFO).

Die hier beschriebenen drei Bauarten werden für Gleichstrom und Wechselstrom erzeugt; die Schützen für beide Stromarten brauchen sich nur in der Zugspule zu unterscheiden, bzw. es kann auch bei Wechselstrombetrieb für die Betätigung der Zugspulen Gleichstrom vorgesehen werden. Hierdurch wird die Zugkraft der Zugspulen der Magnete von den Schwankungen der Linienspannung unabhängig, andererseits wird das Magnetensystem für Gleichstrombetätigung auch leichter.

In den Abb. 347 bis 358 sind einige Schaltungen dieser Art dargestellt.

Die bei der mittelbaren Steuerung 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.

Unerwünscht vom Standpunkt der harten Anforderungen des Bahnbetriebes ist die große Anzahl der erforderlichen Bestandteile und insbesondere die Umständlichkeit der

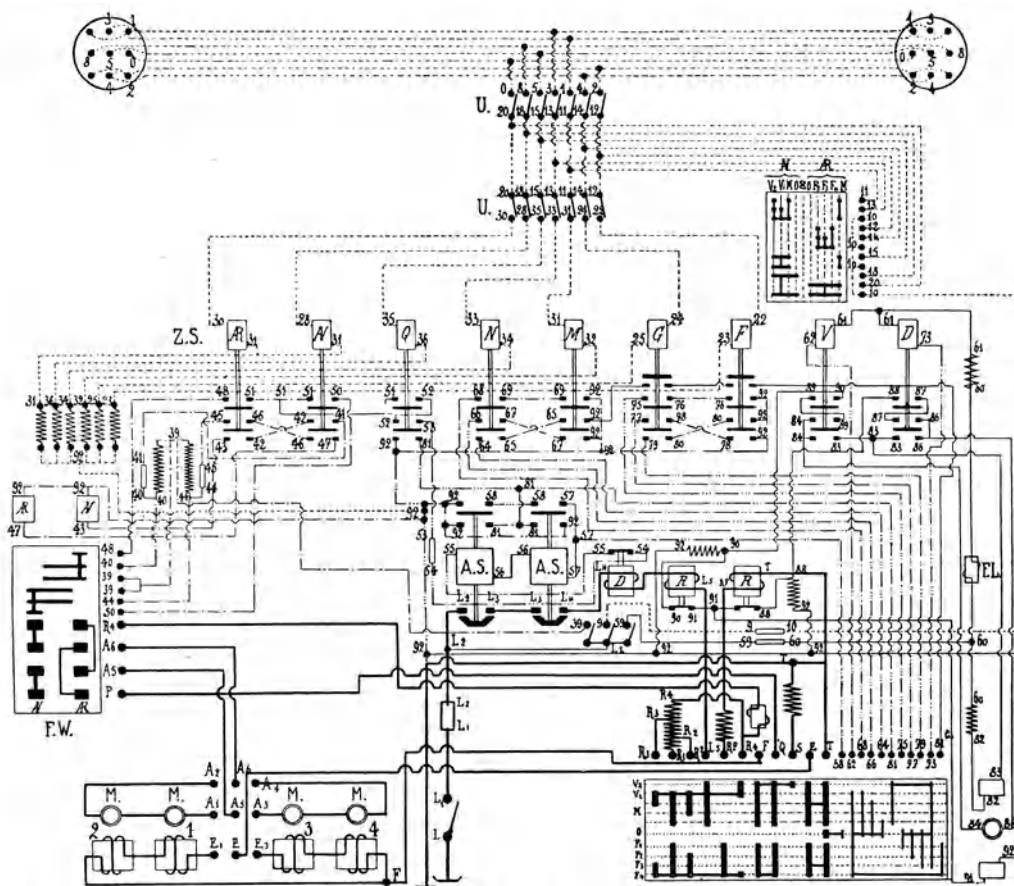


Abb. 347. Vielfachsteuerung der Triebwagen Villefranche—Bourg Madame. GS 850 V, 4×50 PS, zwei Motore dauernd in Reihe (TH).

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. 359) der *B + B*-Lokomotive der Reihe 551 der preußischen Staatsbahnen läßt 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.

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 Hüpfen und deren Sperrkontakte sind, nicht eingerichtet. Die Umständlichkeit einer Steuerung, die bis zu 38 elektromagnetisch betätigte Schalter mit bis zu 400 Kontakten benötigt — die ChMStP-Lokomotiven be-

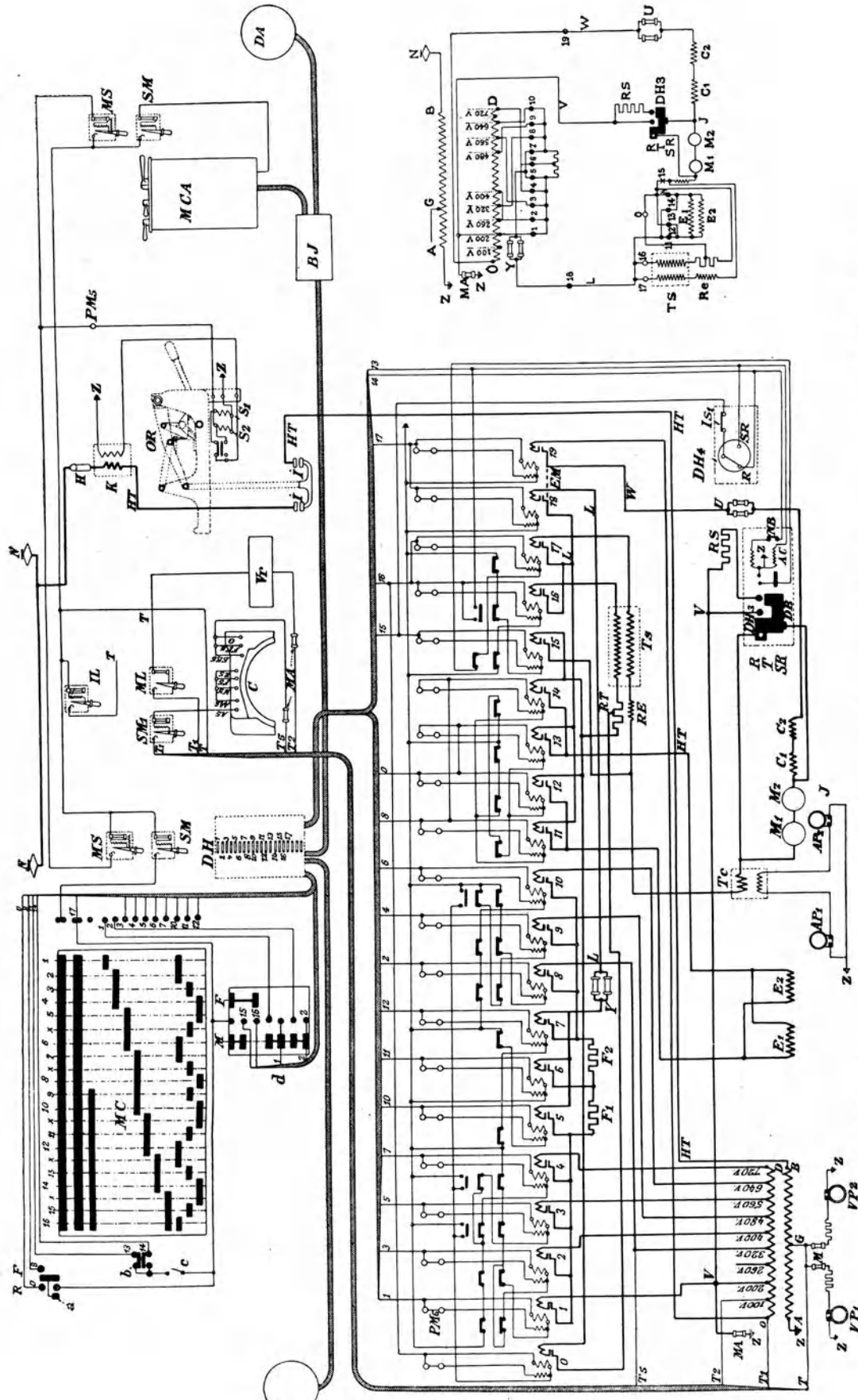


Abb. 348. Schaltprinzip und Schaltplan der 1 C1 — 1500 PS — W.S.-Lokomotive der französischen Südbahn (TH).

nötigen sogar 90 Schalter, die Fahrtwender nicht mitgerechnet —, liegt auf der Hand und schafft diesem System Gegner.

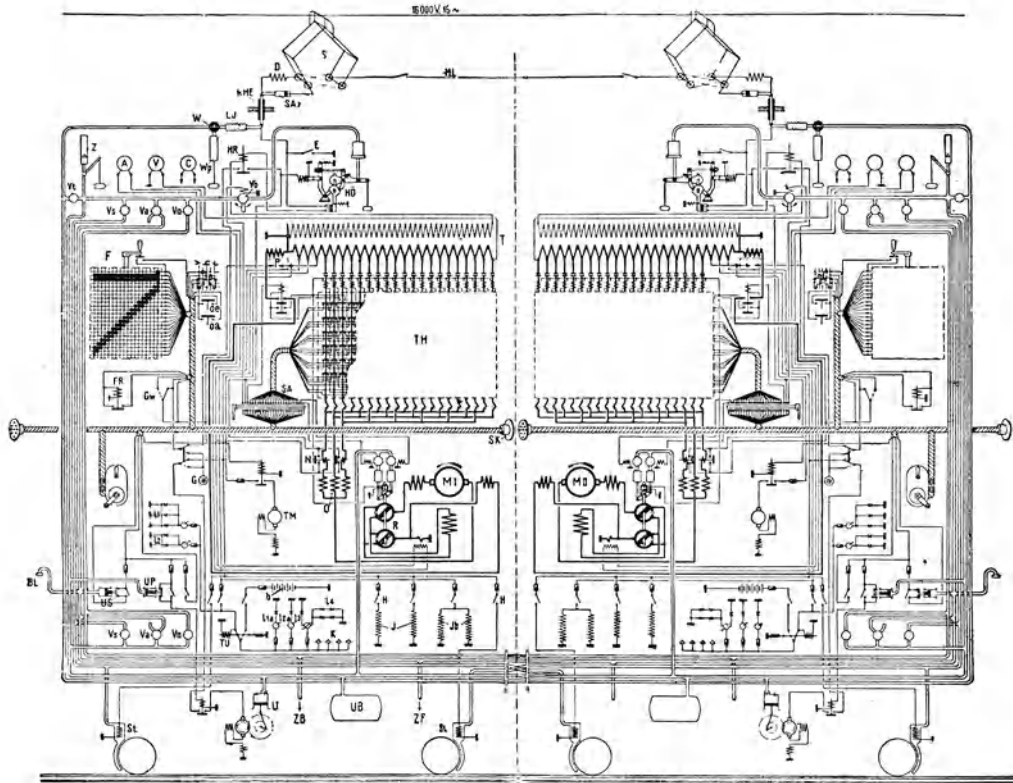


Abb. 349. Schaltbild der 1 - C + C - 1 Güterzug-Lokomotive der Riksgränsenbahn (SSW).

- | | | |
|--|--|---|
| <p><i>A</i> = Strommesser mit Skala für Zug-
 <i>BL</i> = Bremsleitung für den Zug (kraft
 <i>C</i> = Geschwindigkeitsmesser
 <i>D</i> = Drosselspule
 <i>E</i> = Erdungsschalter [Kurbel
 <i>F</i> = Führerschalter mit Totmann-
 <i>FR</i> = Sicherheits-Relais
 <i>G</i> = Steuerstrom-Steckdose
 <i>Gw</i> = Wechselschalter
 <i>H</i> = Handschalter
 <i>HL</i> = Hochspannungs-Leitung auf den
 Lokomotivendächern m. Trennschalter
 <i>HÖ</i> = Hochspannungs-Ölschalter mit
 Luftdruck- u. Handbetätigung,
 mit Fern-Ein- u. Ausschaltung
 <i>HR</i> = Hochspannungs-Relais
 <i>J</i> = Heißblutofen
 <i>Jb</i> = Blindwellenlager-Heizung
 <i>K</i> = Steckkontakt
 <i>kHE</i> = Kombinierte Hochspannungs-
 Einführung
 <i>LJ</i> = Luftisolator [3700 S
 <i>MI</i> u. <i>MII</i> = Triebmotoren WBM</p> | <p><i>N</i> = Niederspannungs-Relais
 <i>O</i> = Schaltdrosselspule
 <i>P</i> = Spannungsregler
 <i>R</i> = Fahrtrichtungsumschalter mit
 Druckluftbetätigung
 <i>S</i> = Stromabnehmer
 <i>SAz</i> = Stromabnehmer - Antriebszylinder
 <i>SA</i> = Vielfach-Abschalter (der
 <i>SK</i> = Vielfach-Kabelkupplung
 <i>St</i> = Sandtrockner
 <i>T</i> = Haupttransformator
 <i>TH</i> = Hüfgerüst
 <i>TM</i> = Ventilator-Motor
 <i>TU</i> = Selbsttätiger Umschalter
 <i>U</i> = Druckluftpumpe
 <i>UB</i> = Druckluftbehälter
 <i>UP</i> = Selbsttätiger Pumpenschalter
 <i>US</i> = Selbsttätiger Steuerstrom - Ab-
 schalter
 <i>V</i> = Spannungsmesser [schalter
 <i>Va</i> = Ventil f. d. selbsttätige Bremse
 <i>Vn</i> = Ventil für die nichtselbsttätige
 Bremse
 <i>Vö</i> = Ventil für den Hochspannungs-
 Ölschalter</p> | <p><i>Vs</i> = Ventil für die Sandstreuer
 <i>Vt</i> = Ventil für die Stromabnehmer
 <i>W</i> = Dreivegehand
 <i>Wp</i> = Handpumpe
 <i>Z</i> = Pfeife
 <i>ZB</i> = zur Bremse
 <i>ZF</i> = zum Funktionsventil
 <i>b</i> = Batterie für Notbeleuchtung
 <i>l1</i> = 3 Glühlampen à 16 NK im
 Maschinenraum
 <i>l1a</i> = 1 Glühlampe à 16 NK im Ma-
 schinenraum
 <i>l2</i> = 2 Glühlampen à 50 NK in den
 Streckenlampen unten
 <i>l2a</i> = 1 Glühlampe à 50 NK in der
 Streckenlampe oben [stand
 <i>l3</i> = 1 Glühlampe à 16 NK im Führer-
 <i>l4</i> = 4 Glühlamp. à 1 NK f. Meßgeräte
 <i>v</i> = Vorwärts
 <i>h</i> = Halt
 <i>r</i> = Rückwärts
 <i>oe</i> = Ölschalter „Ein“
 <i>oa</i> = Ölschalter „Aus“</p> |
|--|--|---|

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.

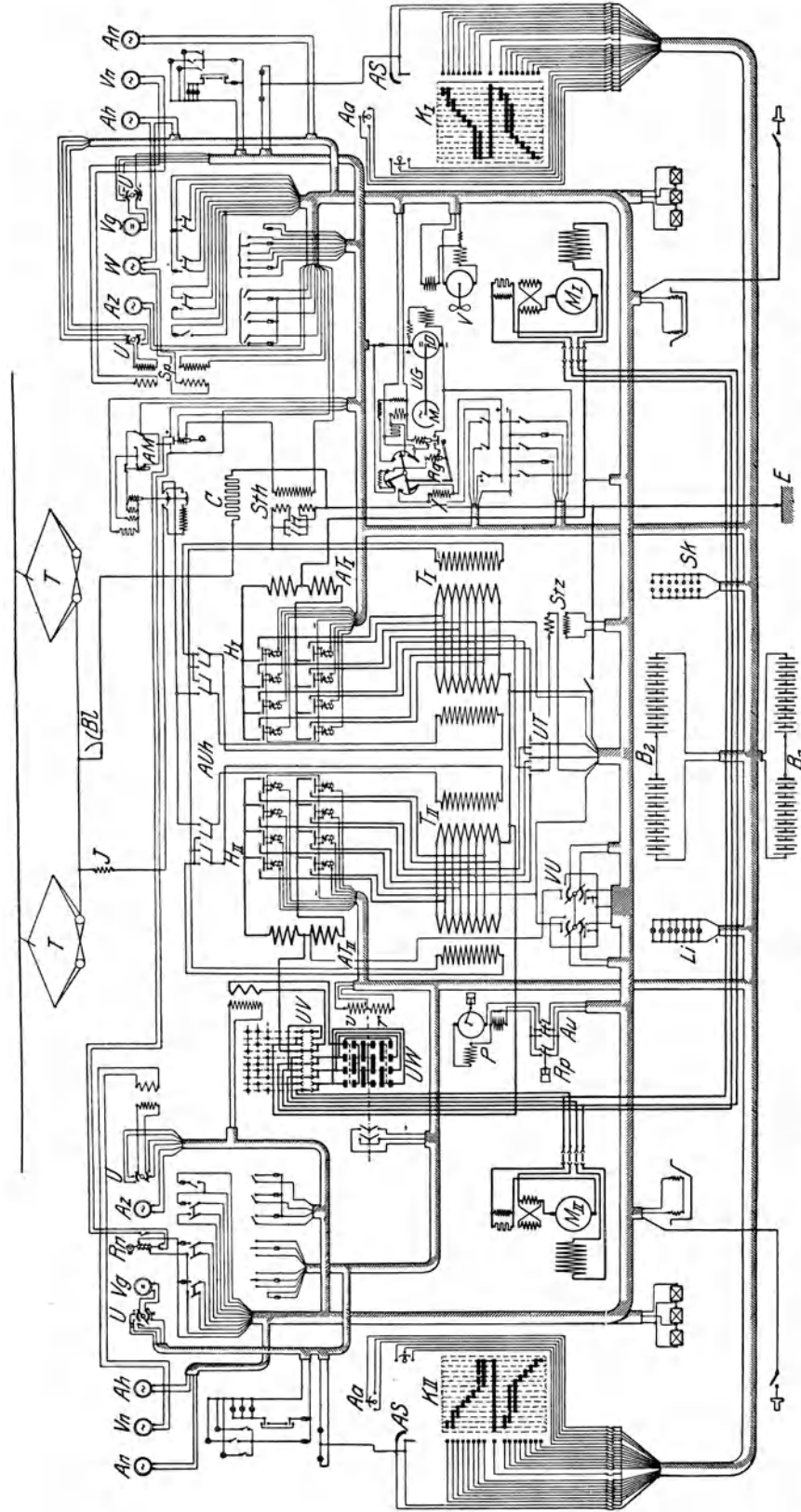


Abb. 350. Schaltplan der 2000 PS-C-C — Löttschberg-Lokomotive. Abgestufte Schützensteuerung mit durch Gleichstrom betätigten Zugspulen (MFO).

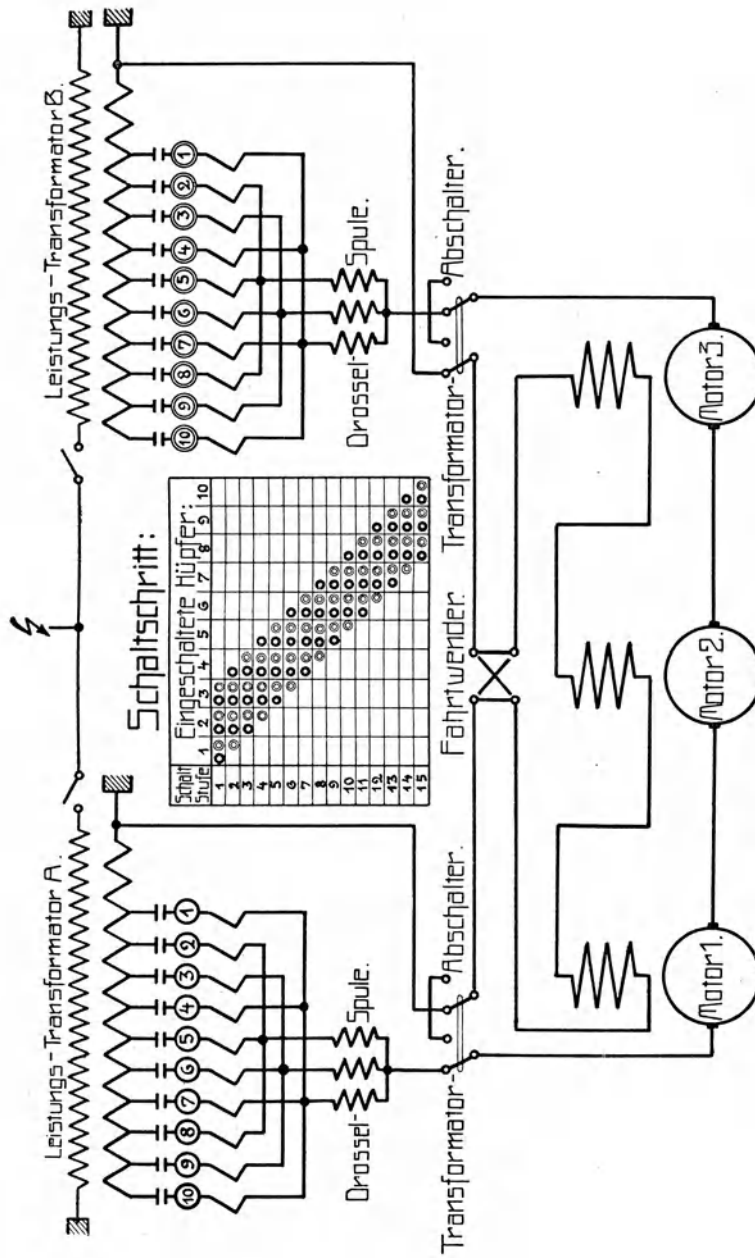


Abb. 351. Grundsätzlicher Schaltplan der B + B + B-Lokomotive der preuß. Staatsbahnen (SSW).

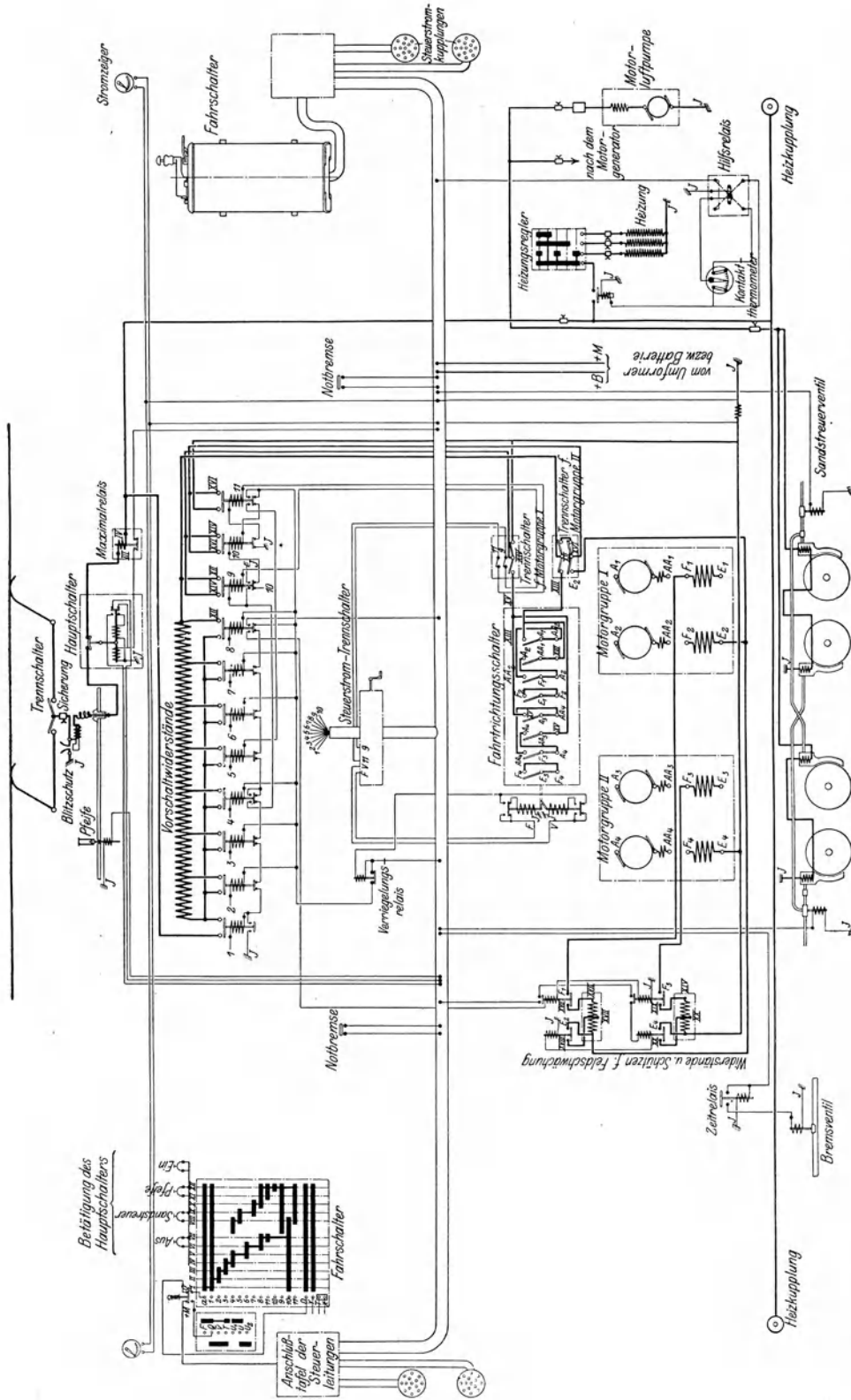


Abb. 352. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Saltsjöbän. GS 1200 V, 4 Motoren je 150 PS, elektromagnetische Schützensteuerung.

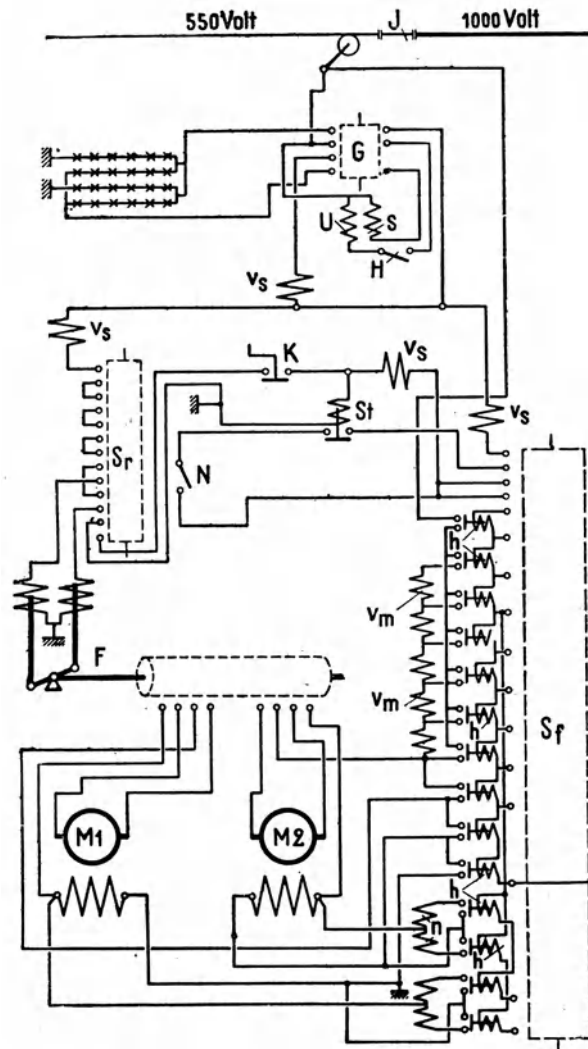


Abb. 353. Schaltbild der Triebwagen Bonn—Siegburg—Königswinter. Mittelbare, abgestufte Steuerung, 1000 V GS (SSW).

- | | |
|---|---|
| S_f = Fahrwalze des Steuerschalters | s = Festhaltespule |
| S_r = Fahrtrichtungswalze des Steuerschalters | J = Isolierter Teil der Fahrleitung |
| K = Sicherheitskurbel des Steuerschalters | V_m = Vorschaltwiderstände im Motorstromkreise |
| G = Spannungsausgleicher | n = Nebenschlußwiderstände |
| F = Elektromagnet. gesteuerter Fahrtrichtungsschalter | h = Hüpfkerne |
| M_1, M_2 = Motoren | V_s = Vorschaltwiderstände im Steuerstromkreise |
| H = Handschalter | St = Elektromagnet. Steuerstromein-schalter |
| U = Umschaltspule | N = Notausschalter |

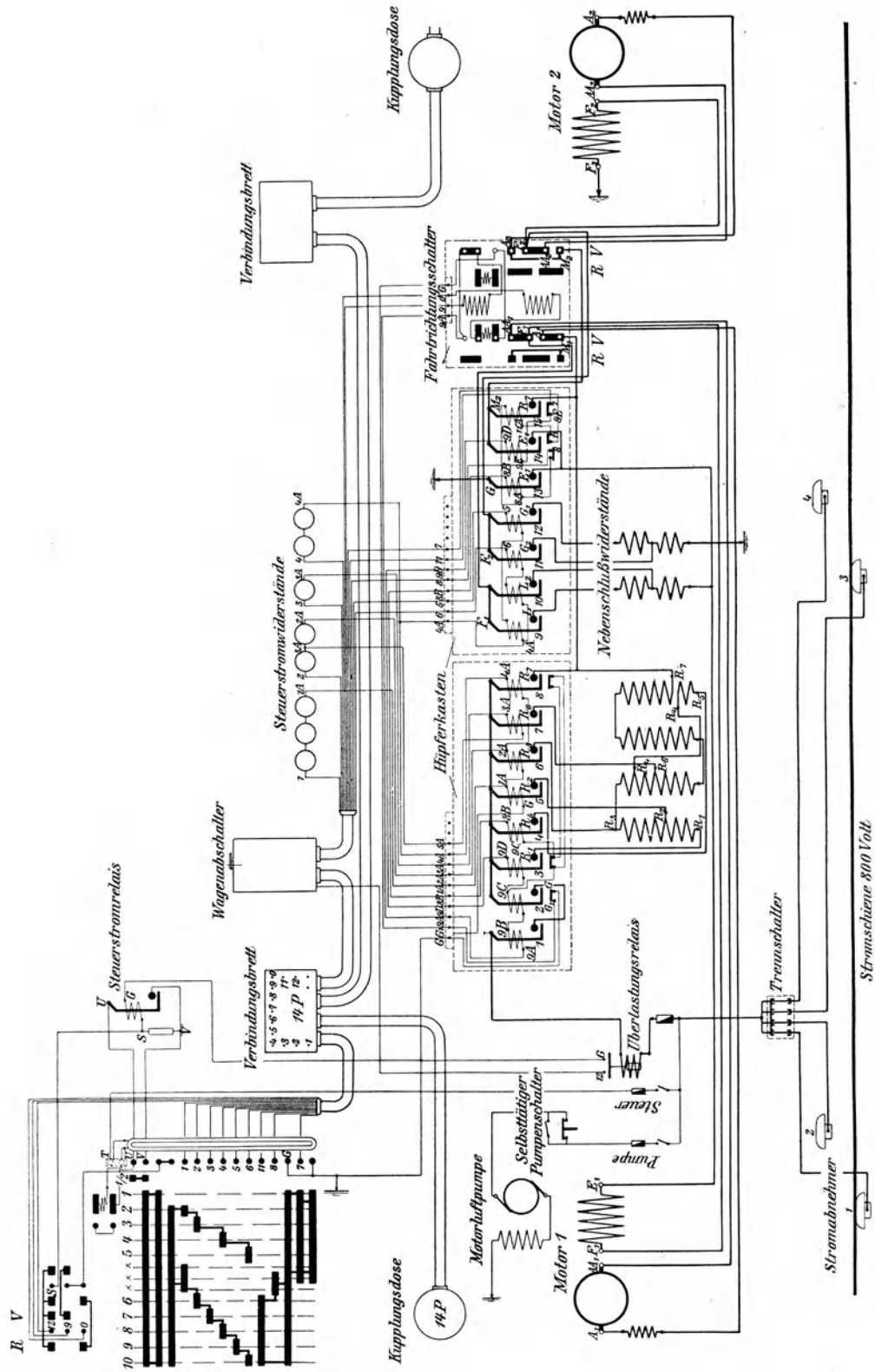


Abb. 354. Schaltbild eines zweimotorigen Triebwagens der Hamburger Stadtbahn, 800 V GS, elektromagnetische Einzelschalter (SSW).

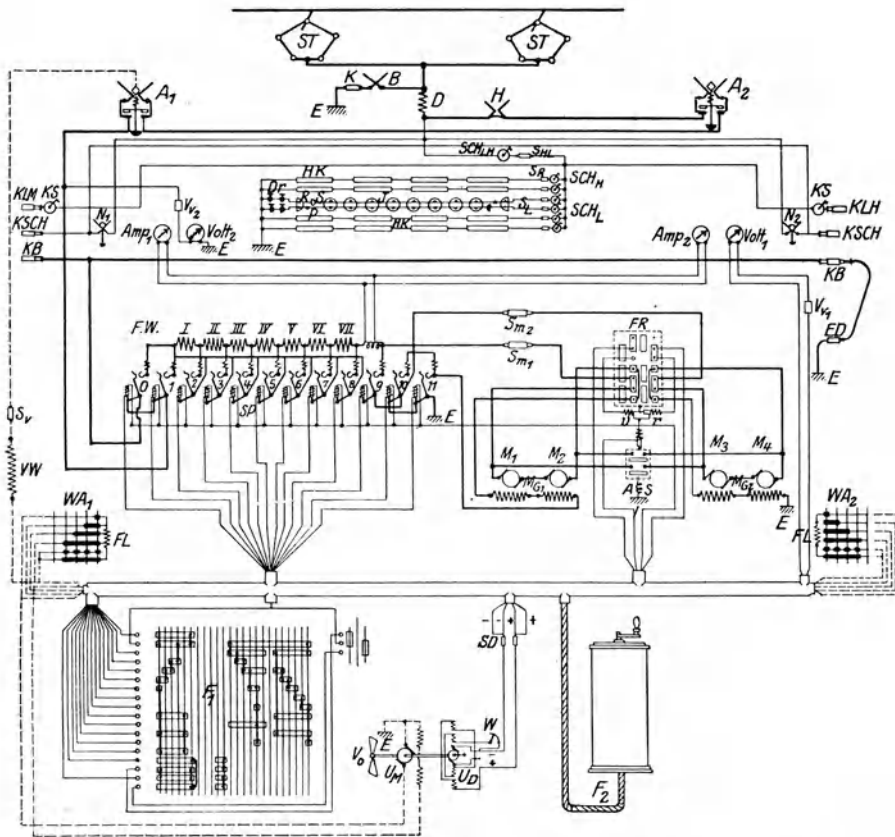


Abb. 355. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Tátrabahn (SSW).

Leistung 4×60 PS/h
 Stromart Gleichstrom
 Spannung $1650 \text{ V} = (2 \times 825)$
 Steuerung: indirekt, elektromagn. Einzelschalter.
 Bremsen: Kurzschluß-, Elektromagn. Schienen-, Druckluft.

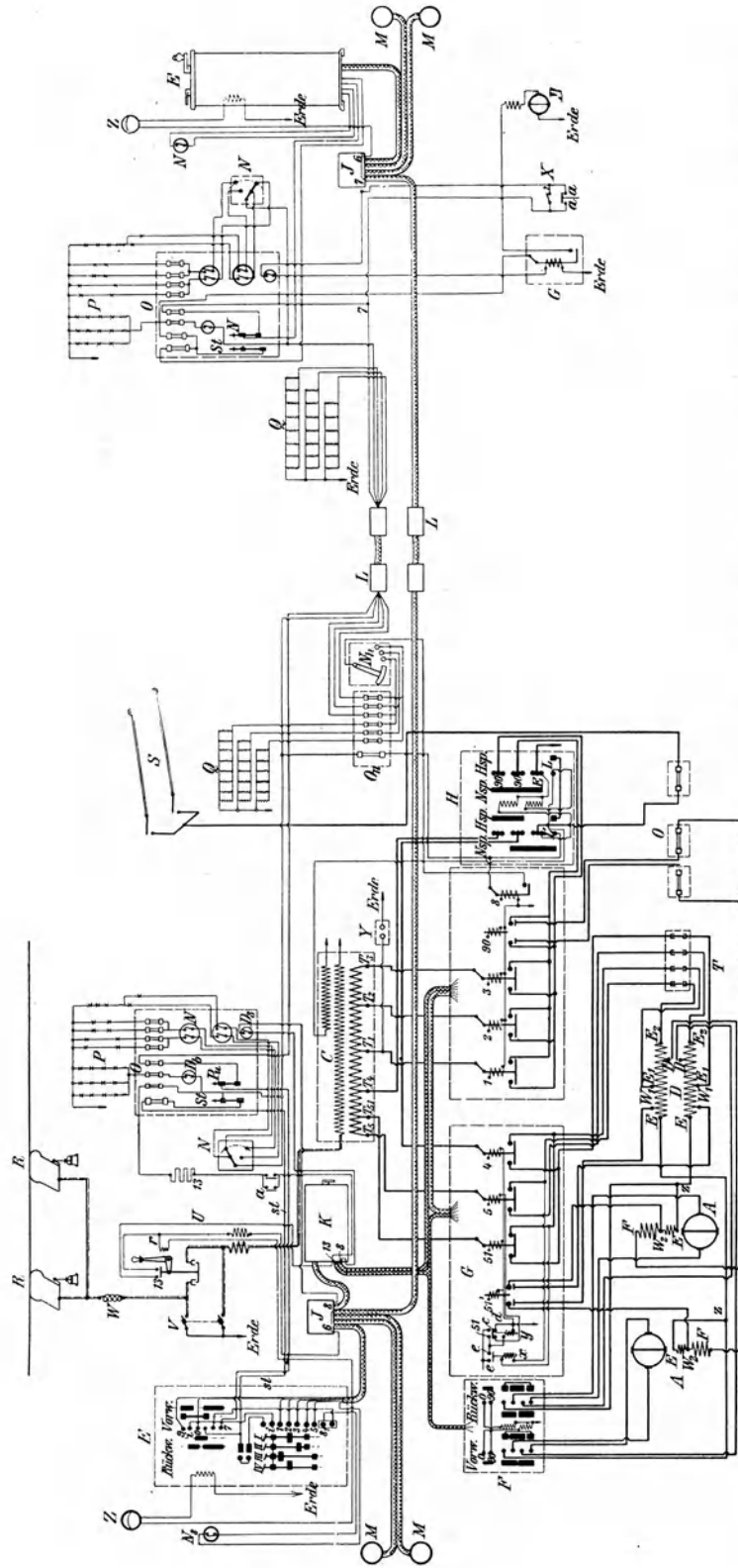


Abb. 356. Abgestufte Vielfachsteuerung mit Einzelschaltern der Triebwagen der Vorortbahn Hamburg—Blankenese. Winter-Eichberg-Motoren, 6000 V, 25 ~ (AEG).

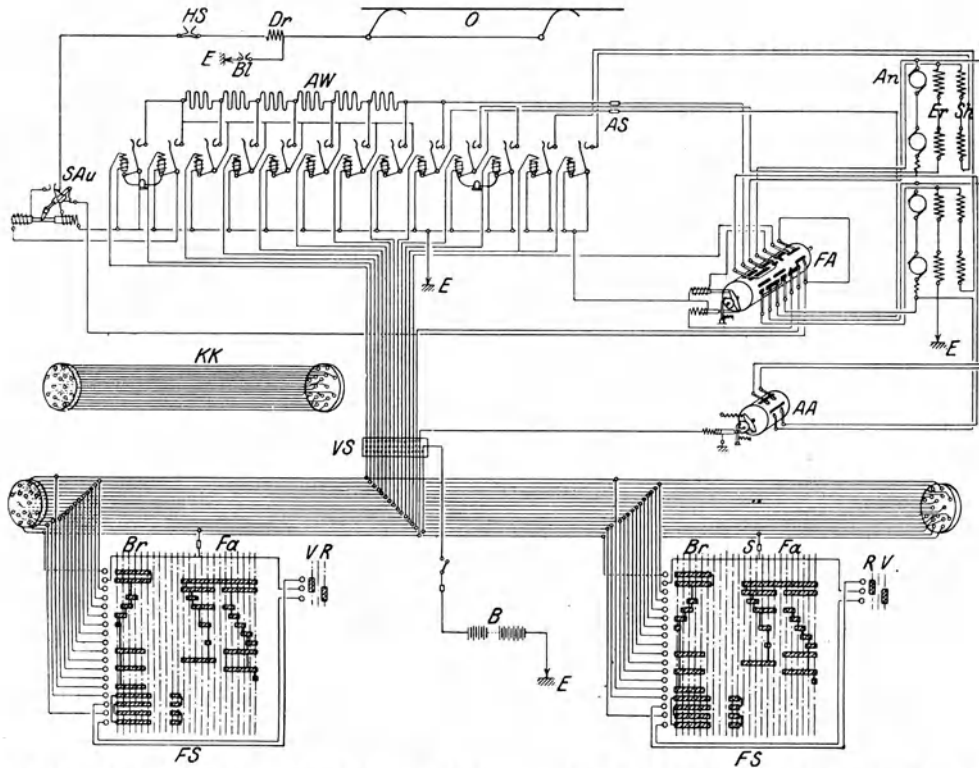


Abb. 357. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Bahn Bellinzona—Mesocco, GS 1500 V. Steuerung mit Einzelschaltern, zwei Motoren dauernd in Reihe (MFO).

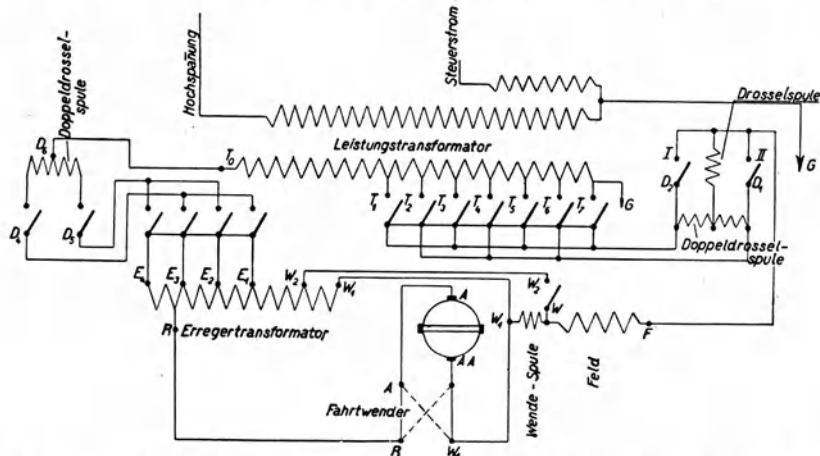


Abb. 358. Schaltprinzip der Fahrstromkreise der 800 PS — 1 C — WS-Lokomotive der Mittenwaldbahn, Repulsionsmotor mit Ankererregung 15 000/800 V, elektromagnetische Schützensteuerung (AEGU).

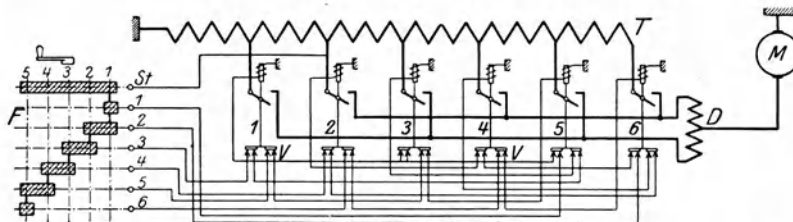


Abb. 359. Verriegelung der elektromagnetischen Einzelschalter (Schützen) der B + B-Lokomotive der preuß. Staatsbahnen (AEA).

Wenn trotzdem an dieser Steuerungsart vielfach mit gutem Erfolg festgehalten wird, so liegt dies daran, daß deren Bestandteile auf Grund der jahrelangen Erprobung im Betriebe mit einem sehr hohen Grad der Vollkommenheit und Betriebssicherheit erzeugt werden können.

9. Die P.C.-Zugsteuerung der General-Electric-Co. Die Vereinfachung des Systems ohne Preisgabe der Vorteile der Einzelschalter ist das Ziel der elektropneumatischen

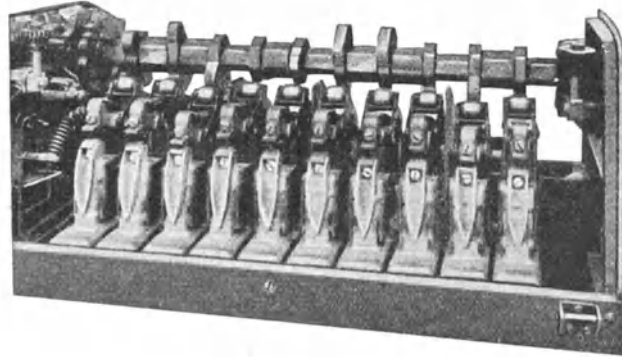


Abb. 360. Elektropneumatische Steuerung der GEC-Steuerwelle mit Nocken zur Betätigung der Einzelschalter.

Steuerung der GEC (Abb. 360 bis 363). Bei dieser Steuerung sind alle Steuerbehelfe in einem verhältnismäßig kleinen Rahmengerüst vereinigt und die umständliche Schutzverriegelung dadurch entbehrlich, daß die Einzelschalter für die R.P.-Schaltung und

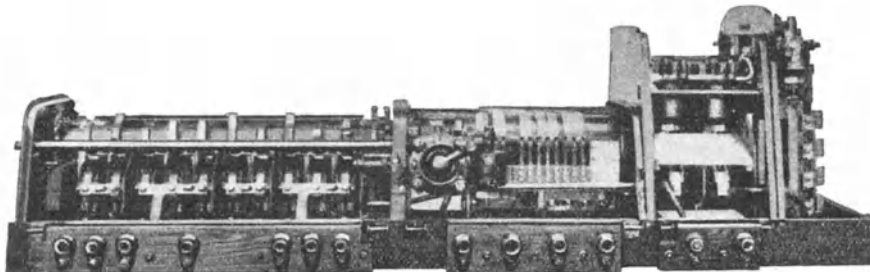


Abb. 361. Sperrwalze mit Schaltzylinder der PC-Steuerung der GEC.

Widerstandsschaltung durch eine Nockenwelle betätigt werden. Die Nockenwelle wird durch zwei Druckluftkolben bewegt; diese Kolben werden durch elektromagnetisch angehobene Ventile vom Führerschalter aus gesteuert. Die Einzelschalter sind als kräftige, einarmige Hebel ausgebildet, die durch Federkraft offen gehalten werden; jeder Schalter hat seine eigene Funkenlöschung.

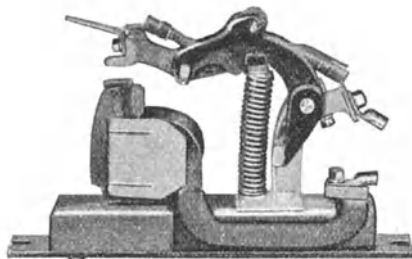


Abb. 362. Durch Nocken betätigter Einzelschalter der PC-Steuerung der GEC.

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 betätigte elektromagnetische Hemmung vorzusehen, die das Weiterschalten der Nockenwelle so lange 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.

Da es im Betrieb andererseits vorkommen kann, daß zwecks Bewältigung einer nicht vorgesehenen Last die solcherart begrenzte Zugkraft überschritten werden muß, so 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 für Fahrzeuge gebaut, die mit zwei 250 PS-600 V-Motoren oder mit vier 150 PS-600 V-Motoren ausgerüstet sind; schließlich ist auch eine Type für vier 70 PS-Motoren entwickelt worden.

Diese Steuerung wird auch für eine Betriebsspannung von 1500 V mit entsprechend verstärkter Isolation erzeugt.

Eine andere Form der Nockensteuerung ist in Abb. 364 dargestellt.

10. Stufenlose Steuerung für Gleichstrom. Eine stetig veränderliche Geschwindigkeitsreglung kann gegebenenfalls durch Vorschaltung eines Motorgenerators, dessen Dynamo fremd erregt wird, erzielt werden.

Diese Lösung erscheint zunächst unwirtschaftlich, weil die Motorleistung am Fahrzeug dreimal vorhanden sein muß, da bei Stillstand die volle Leistung abzudrosseln ist.

In Verbindung mit der hier beschriebenen Vielfach-Reihen nebeneinanderschaltung 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 Motoreinheiten nur deren 6 bzw. bei der vollen Betriebsspannung an jedem Motor nur deren 4 vorzusehen braucht. Da 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. 365 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

$$L = (2E)(3J),$$

wobei 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 dimensioniert sind.

Vom Stillstand bis $\frac{1}{4}$ der Fahrgeschwindigkeit speist je eine Reglerdynamo drei nebeneinander geschaltete Motoren. In bezug auf die Stromstärke ist die Reglerdynamo in diesem, im allgemeinen vergleichsweise kurzen Zeitraum mit 100% überlastet. Die verlangte Stromstärke festhaltend, wird die Spannung der Reglerdynamo 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.

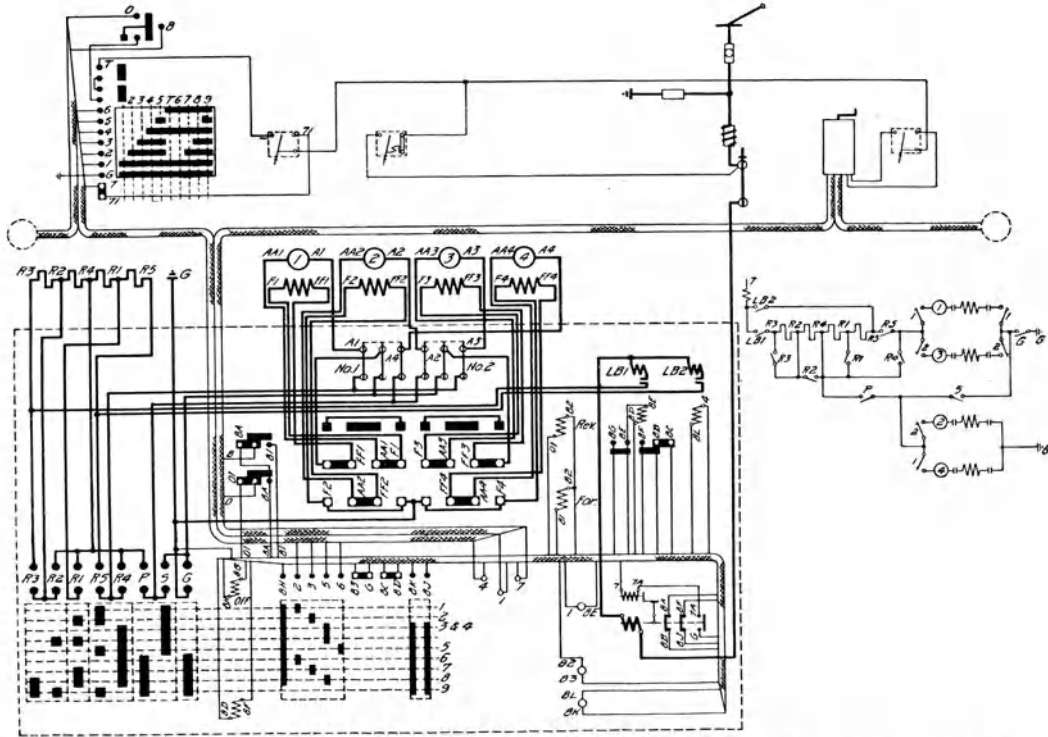


Abb. 363. Schaltprinzip und Schaltplan der GEC-elektropneumatischen Nockensteuerung für einen viermotorigen Triebwagen.

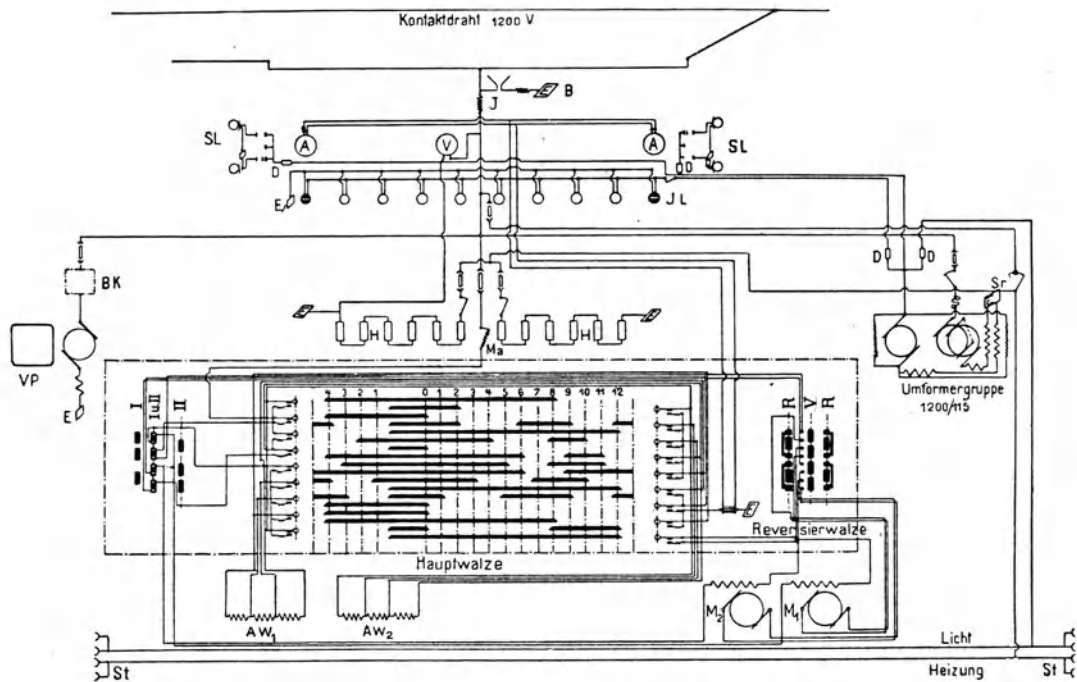


Abb. 364. Fahrschalter mit Nockensteuerung der Einzelschalter. Bahn Biasca—Acquarossa. GS 1200 V (BBC).

Wenn die Linienspannung z. B. mit 3000 V angenommen wird, erreicht in dieser ersten Schaltstellung die Motorspannung $\frac{E}{4} = 375$ V. Geht man hierauf in die Reihenschaltung aller Motoren und auch der beiden Reglerdynamos über, so stehen

$$2 \times 375 + 6 \times 375 = 3000 \text{ V}$$

zur Verfügung. Der Übergang auf diese zweite Stellung des Fahrschalters kann somit ohne Stromstoß erfolgen. Die der Linienspannung entgegenwirkende Spannung der beiden Reglerdynamos wird stetig verringert, bei Erreichung des Nullwertes die Polarität geändert und 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 geht man nun auf die Nebeneinanderschaltung von je zwei Motorreihen von drei Einheiten über. In diesem Fall fehlen zur vollen Spannung 375 V, da

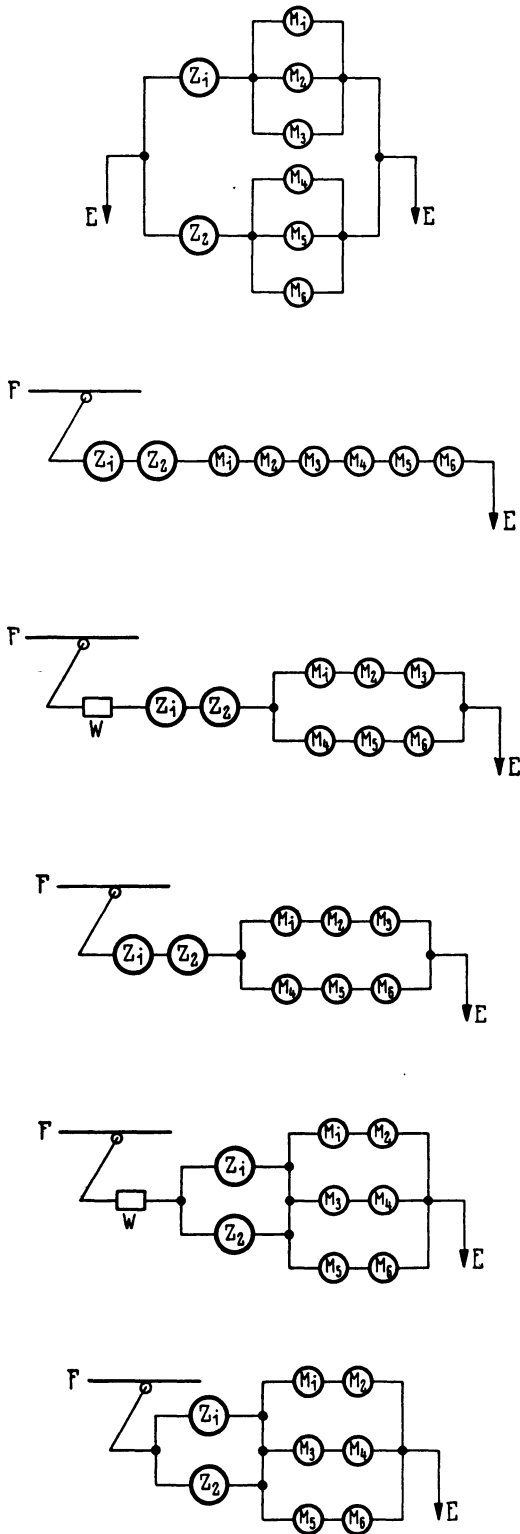
$$2 \times 375 + 3 \times 625 = 2625 \text{ V ist.}$$

Ein Widerstand drosselt die fehlende Gegenspannung ab; dieser bleibt so lange eingeschaltet, bis die Gegenspannung der Motoren durch Verringerung der Gegenspannung der Reglerdynamos 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- bzw. zugeschaltet, bis $\frac{10}{12}$ der Linienspannung erreicht sind. 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. Wenn die Gegen-EMK der Motoren 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 zu diesem Zwecke die Reglermaschinen bei verringerter Stromstärke in Reihe geschaltet werden.

Von besonderer Tragweite ist der Umstand, daß, da 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 wird und andererseits das Reibungsgewicht besser ausgenützt werden kann.

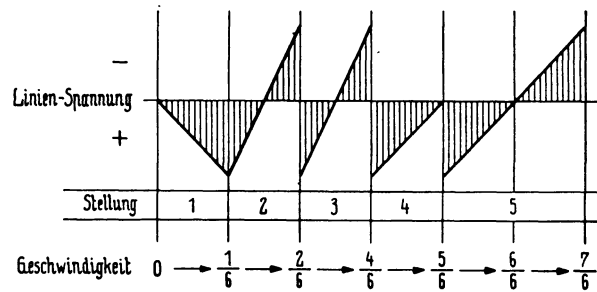
In Abb. 366 ist der Schaltplan für ein viermotoriges Fahrzeug dargestellt; die Motoren sind in diesem Fall für die volle Linienspannung gebaut. Die Umformerleistung beträgt $\frac{1}{6}$ der Fahrzeugleistung.



Stellung	Schalter										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	○	●	○	●	●	●	○	●	●	●	○
2	●	○	●	○	○	○	●	○	○	●	●
3	●	●	○	○	○	○	○	●	○	●	●
4	○	●	○	●	●	●	○	●	●	○	●
5	●	●	○	●	●	○	○	●	●	○	○

○.....Schalter geöffnet
●.....geschlossen.

Zu Abb. 366.
Schaltschritt.



Zu Abb. 366.

Regelung der Zusatzspannung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und den Schalterstellungen.

Abb. 365. 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.

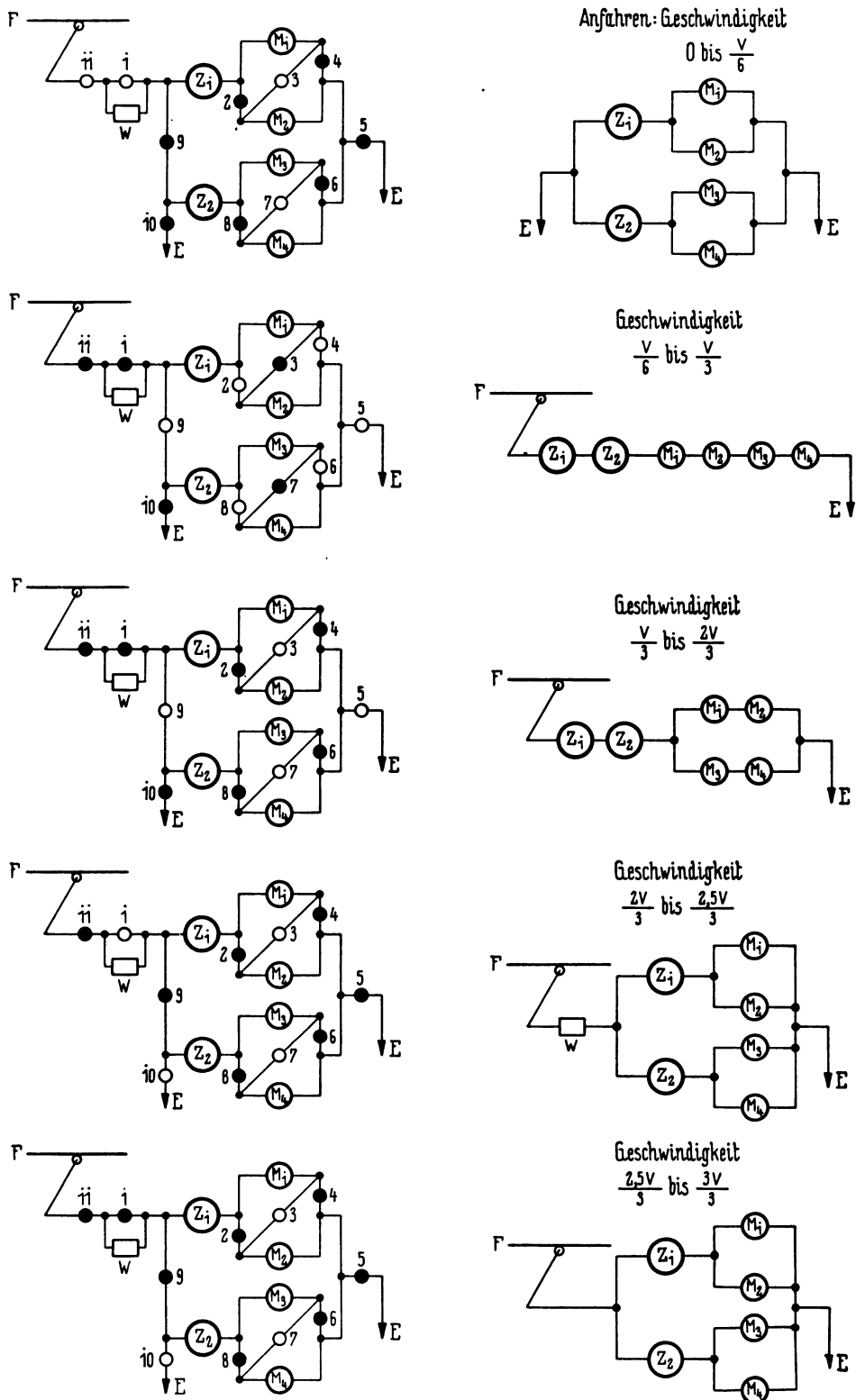


Abb. 366. Schaltprinzip einer stetigen Geschwindigkeitsregelung für ein Triebfahrzeug mit vier Motoren. Z₁, Z₂ Zusatzmaschinen, M₁ bis M₄ Motoren.

11. Stufenlose Steuerung für Wechselstrom. Die Steuerung mittels Drehtransformator (Abb. 367) ermöglicht eine vollständige allmähliche Spannungs- und

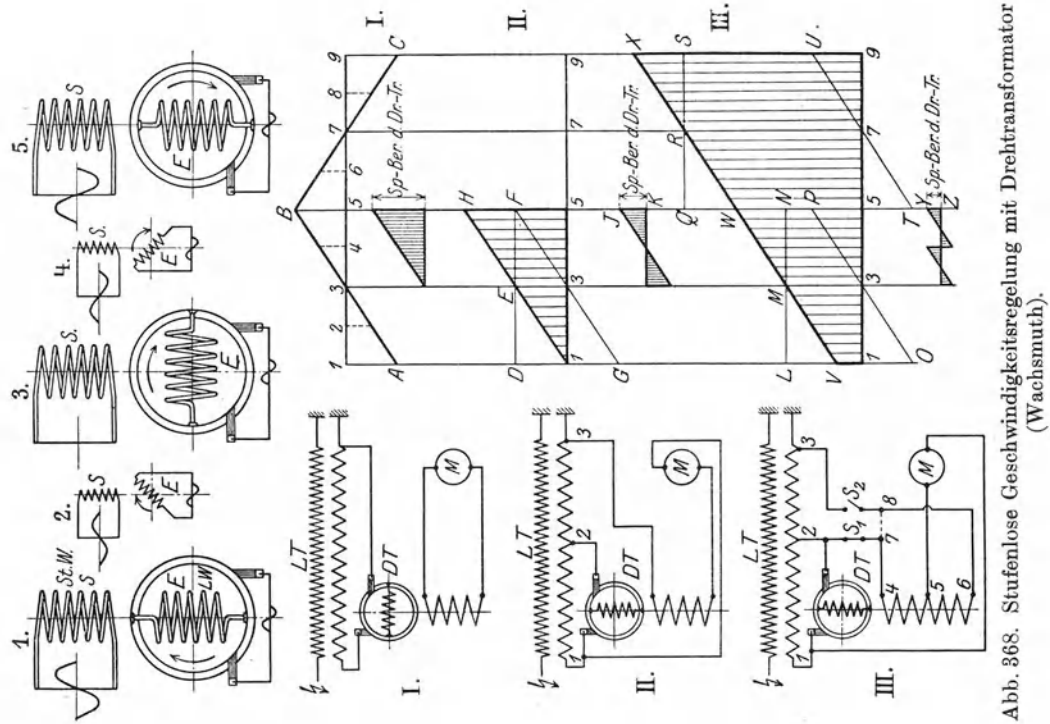


Abb. 368. Stufenlose Geschwindigkeitsregelung mit Drehtransformator (Wachsmuth).

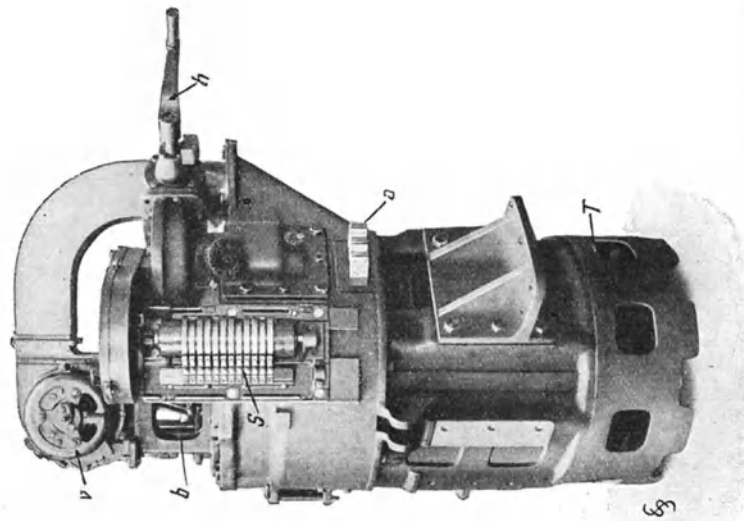


Abb. 367. Drehtransformator der D-Güterzuglokomotive — EG 505 — der preuß. Staatsbahn für stetige Geschwindigkeitsregelung (SSW).

Leistungsregelung. Der Drehtransformator hat jedoch keine allgemeine Einführung erfahren, weil sein Gewicht groß und 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 er überhaupt die volle Leistung der gesteuerten Motoren umformen, woraus seine Unbrauchbarkeit ohneweiters folgt. In Verbindung mit dem Stufentransformator kann eine vollständig stufenlose Regelung erzielt werden, wobei man aus praktischen Gründen bis auf $\frac{1}{8}$ Leistung kommen und eine Spannungsregelung in den Grenzen von etwa 70 bis 460 V erzielen kann (Abb. 368).

Die Betätigung des Drehtransformators kann von Hand aus mit Kurbel und Wurmradübersetzung erfolgen oder durch einen Elektromotor, der vom Führerstand gesteuert wird, oder auch mittels Druckluft und Ölbremse, wobei als Dauerstellungen nur diejenigen zu benützen sind, in welchen zwei Schütze eingeschaltet sind und der Drehtransformator nur als Doppeldrosselspule arbeitet. Diese Stellungen werden besonders gekennzeichnet, außerdem muß, da der Drehtransformator in Zwischenstellungen nicht selbstsperrend ist, eine Sperr- bzw. geeignete Bremsvorrichtung vorgesehen werden.

12. Steuerung mit Bürstenverschiebung. In die Gruppe der Steuerungen mit vollständig allmählicher Geschwindigkeitsänderung gehört auch die Steuerung mittels Bürsten-

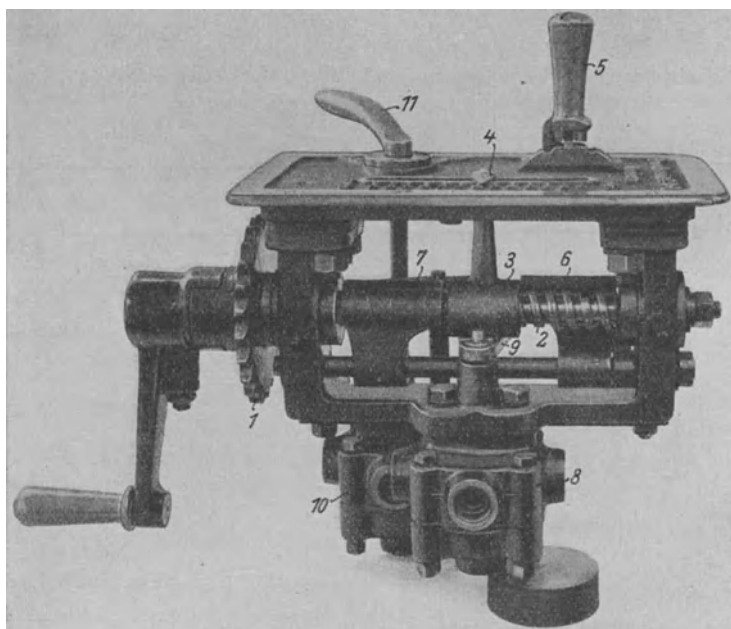


Abb. 369. Fahrerschalter für eine Steuerung mit Bürstenverschiebung (BBC).

verschiebung, die bei den Repulsionsmotoren mit doppeltem Bürstensystem, System Déri, von BBC ausgeführt wird (Abb. 369, 370). Da der Repulsionsmotor für zukünftige Ausführungen zufolge seiner ungünstigen elektrischen Eigenschaften kaum in Betracht kommt, hat diese Regelmethode mehr geschichtliches Interesse.

Die BEW 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 welcher eine beschränkte Bürstenverschiebung erfolgt.

Die BEW-Steuerung (Abb. 371) bedient sich eines Transformators, der in ähnlicher Weise geschaltet wird, wie es beim Drehtransformator gezeigt wurde. Dieses System benötigt für eine 16-stufige Schaltung nur mehr 13 Schütze.

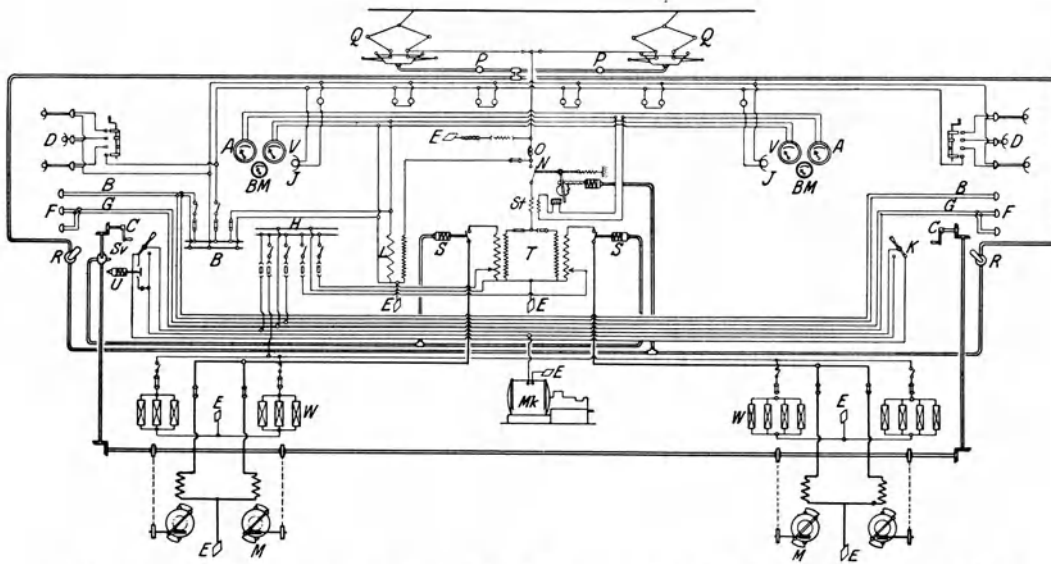


Abb. 370. Schaltbild eines viermotorigen Triebwagens der Bahn Martigny | Orsière, 5000 V, WS, Steuerung mit Bürstenverschiebung (BBC).

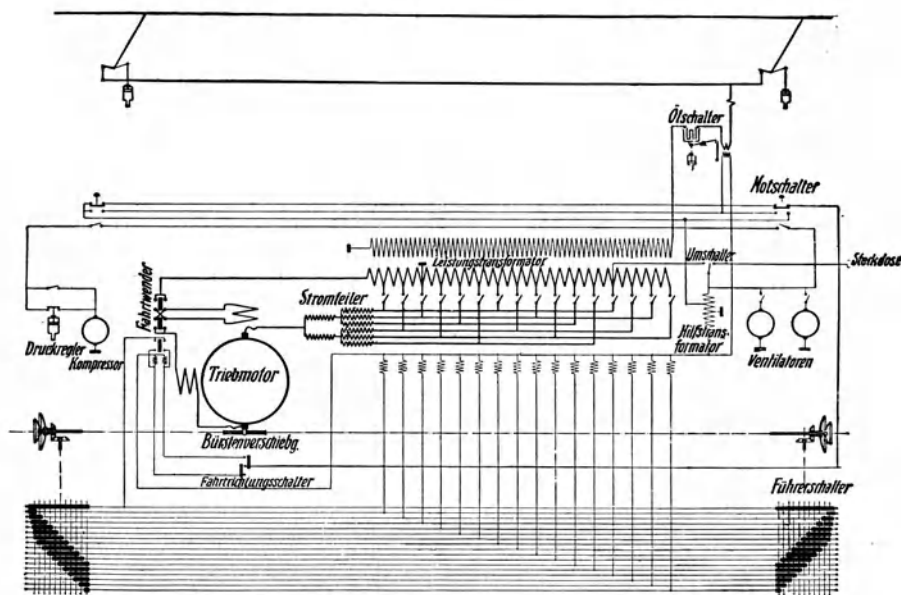


Abb. 371. Schaltbild der 1 — D — 2 — 3000 PS-Lokomotive, Reihe 235 der preuß. Staatsbahnen. Stufentransformator und Bürstenverschiebung (BEW).

Linienspannung 15000 V. Stromart WS 16. 2/3 Per. Motorspannung 350 V.

13. Kollektorregler von Döry. Dieser Regler vereinigt die Vorteile des Drehtransformators ohne dessen elektrische und mechanische Nachteile mit denjenigen der Bürstenverschiebung. Zu diesem Behufe wird ein Ringtransformator mit einem Kollektor versehen, welchem durch drehbare Bürsten der Strom zugeführt wird. Durch Verschieben der Bürsten wird die Achse der betreffenden Transformatorwicklung ebenso wie beim Potentialregler in bezug auf die Sekundärwicklung geändert und auf diese Weise die gewünschte Spannungsregelung erzielt (Abb. 372). Pöge, Chemnitz, hat diesen Regler für einen Motor mit 1600 PS Dauerleistung ausgeführt.

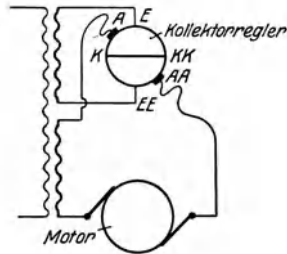


Abb. 372. Kollektorregler von Döry.

14. 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 die Betriebsspannung des Motors in regelmäßigen, verhältnismäßig zahlreichen Spannungsstufen erhöht.

Diese, von den MSW besonders durchgebildete Schaltung (Abb. 373) 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 er eine der Spannung des Leitungstransformators anfänglich entgegengesetzte, dann abnehmende und schließlich gleichgerichtete Zusatzspannung abgibt.

Das Anlegen der Primärwicklung des Zusatztransformators an die verschie-

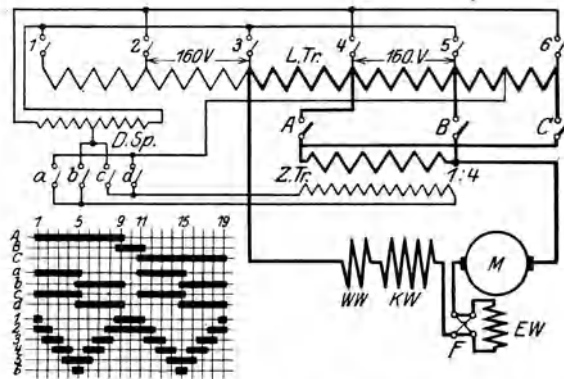
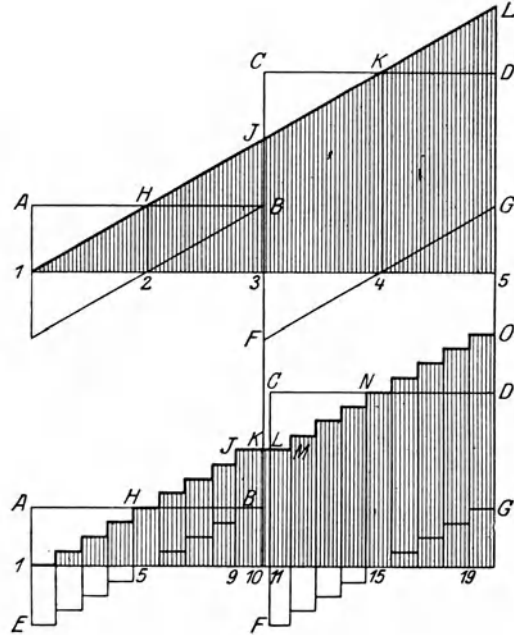


Abb. 373. Feinstufige Geschwindigkeits- (Spannungs-) Regelung mit Hilfe eines zu- und gegenschalteten Transformators. Oben: Spannungslinie für den Drehtransformator. Unten: Spannungsregelung mit dem Zusatztransformator (Wachsmuth).

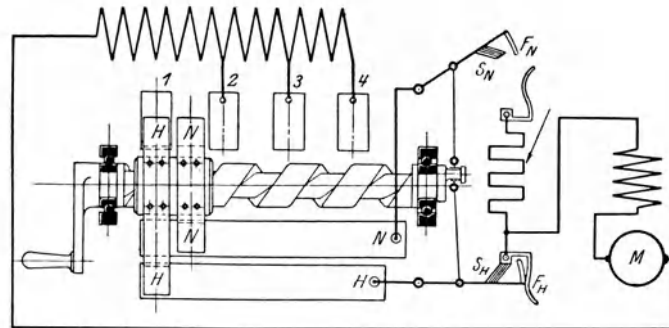


Abb. 374. Schematische Darstellung der unmittelbaren Steuerung mit Zellschalter. C + C-Lokomotiven, Reihe 551 der preuß. Staatsbahnen (BBC).

denen Spannungsstufen, sowie die Umschaltung von Gegenspannung auf Zusatzspannung erfolgt durch die Schalter 1 bis 6, bzw. a bis d (Abb. 373). Das dargestellte Schaltbild zeigt, in welcher Reihenfolge die einzelnen Schalter betätigt werden.

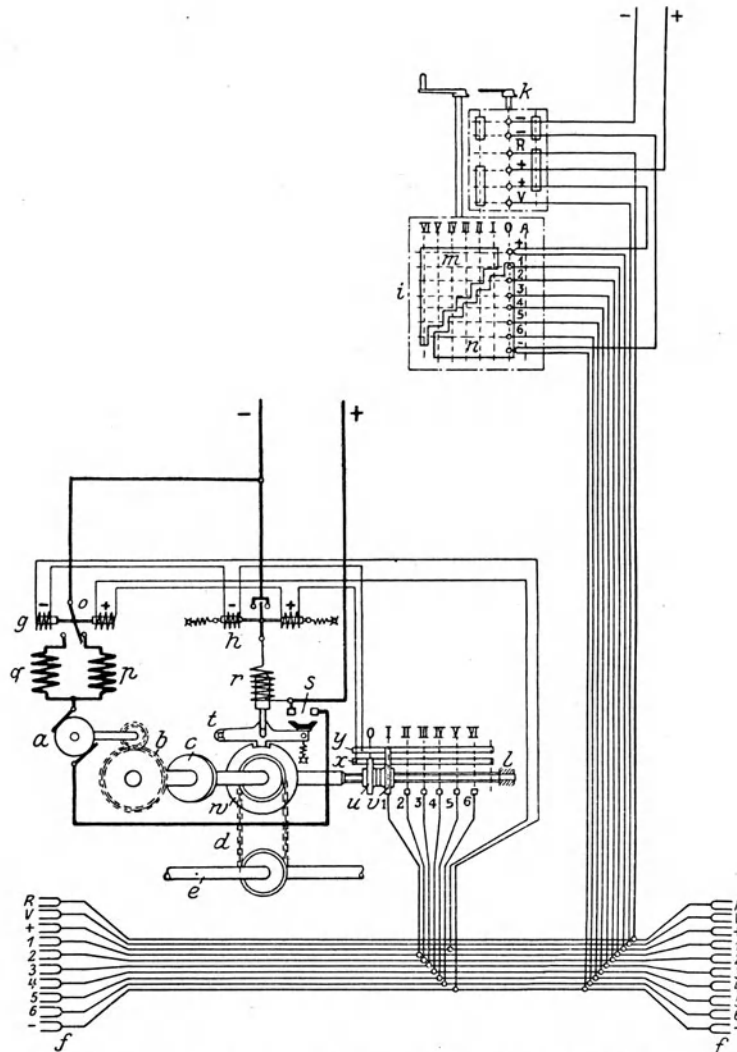


Abb. 375. Vielfachsteuerung mit Stufenschalter (BBC, Abb. 356).

a Steuermotor, *f* Kuppelungen der Steuerleitungen, *g* Steuerschalter, darüber Fahrtwender, *s* Sperrscheibe mit Rutsch-Kupplung, *V* Steuerleitung für Vorwärtsfahrt, *R* dasselbe für Rückwärtsfahrt, 0–VI Schaltstellungen, 1–6 Steuerleitungen.

15. Unmittelbare Schaltung. Eine Rückkehr zur unmittelbaren Schaltung stellt die Steuerung der BBC-Werke dar, die einen bei Akkumulatorzellenschaltern gebräuchlichen Behelf, den Wanderkontakt, benützt (Abb. 374, 375).

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 Hauptkontakte der elektromagnetisch betätigte Schütze vorzuziehen sein, so daß nur deren Zugspulen durch den Exzenter geschaltet werden. Ein Übelstand dieses Systems ist, daß man zur Betätigung ein Gestänge benötigt, das bei langen Lokomotiven ziemlich umständlich ausfallen kann.

16. 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 Ausnützung 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 n bzw. $v = f(J)$ 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

$$Jw = e - E;$$

da die Gegen-EMK des Motors

$$E = cJn,$$

und die Klemmenspannung

$$e = a \text{ (konst.) ist,}$$

wird

$$Jw = a - cJn$$

und hieraus

$$w = \frac{a}{J} - cn.$$

Hier bezeichnet n die Umlaufzahl der Triebmaschine und w den Gesamtwiderstand des Stromkreises.

Da annahmegemäß

$$\frac{a}{J} = \text{konst.},$$

wird w durch eine gerade Linie dargestellt und ist verhältnismäßig der Geschwindigkeit.

Für $n = 0$ berechnen sich die beiden Grenzwerte des Anfahrwiderstandes für die entsprechend der verlangten mittleren Zugkraft gewählten Höchst- und Mindestwerte des Anfahrstromes (J_{max} und J_{min}). Es ist für

$$n = 0, \quad w = w_R + w_m = \frac{e}{J_{max}} \quad \text{oder} \quad \frac{e}{J_{min}}$$

und für die widerstandslose Fahrstellung $w_R = 0$

$$w_m + \frac{e}{J_{max}} = cn' \quad \text{oder} \quad w_m + \frac{e}{J_{min}} = cn''.$$

Hier bezeichnet w_R den vorgeschalteten Anfahrwiderstand, w_m den Motorwiderstand und w den Gesamtwiderstand des Stromkreises.

Die Bestimmung der Größe und Anzahl der Vorschaltstufen läßt sich auf Grund der Kennlinien $z = f(J)$ und v bzw. $n = f(J_1)$ gemäß dieser Ableitung zeichnerisch durchführen. In Abb. 376 sind im Quadranten rechts der Ordinate die $v = f(J)$ -Kennlinien der Triebmaschine für volle und halbe Klemmenspannung dargestellt.

Im anschließenden, linksseitigen Quadranten werden die beiden Widerstandsgeraden für eine ideelle stetige Geschwindigkeitsregelung mit unveränderlichem Stromwert gezogen. Für diese beiden Geraden sind die Abszissenschnittpunkte für $n = 0$ bzw. $v = 0$ zu berechnen, da die Klemmenspannung e , J_{max} und J_{min} in der Aufgabe bekannt sind. Ebenso ist die Abszisse w_m für die widerstandslose Fahrt gegeben; die entsprechenden Ordinaten werden durch Hinüberloten der in der Kennlinie gegebenen Geschwindigkeitswerte (n' , n'') gefunden.

Die zwei Widerstandsgeraden sind die geometrischen Orte aller Geschwindigkeitswerte für J_{max} und J_{min} . Die erste Stufe w_{R1} (d. h. die senkrechte Gerade $w_{R1} = konst.$)

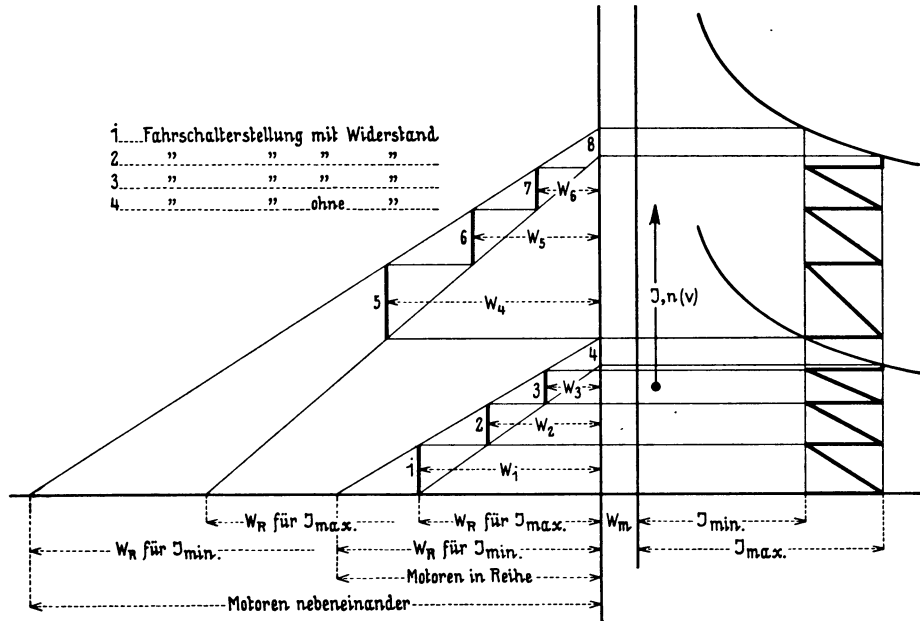


Abb. 376.

wird bei derjenigen Geschwindigkeit verlassen, bei welcher J_{min} erreicht wird, das ist der Schnittpunkt der Lotrechten $w_{R1} = konst.$ mit der für J_{min} gezogenen Widerstandsline; usf.

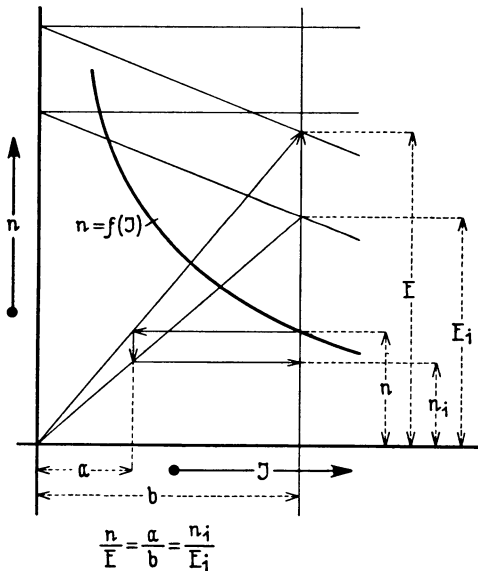


Abb. 377.

Zeichnerische Ermittlung einer Motorkennlinie.

nicht etwa so weit sinkt, daß der festgesetzte Mittelwert der Anfahrzugkraft nicht mehr erreicht wird.

Um die diesbezüglichen Zusammenhänge leicht erfassen zu können, ist es zweckmäßig, auf der Ordinatenachse die der Kennlinie entsprechenden Werte der Stromstärke und ebenso für $n = 0$ auf der Abszissenachse nach links neben den w_R -Werten die

Ist die Kennlinie für Reihenschaltung zweier Motoren, also für die halbe Linienspannung, gezeichnet worden, so werden die für das zweimotorige Fahrzeug in Reihenschaltung vorzusehenden Widerstandsstufen mit dem doppelten Wert zu bemessen sein. In der Parallelschaltung wird der so ermittelte Widerstand, da dieser im allgemeinen vom Strom zweier Motoren durchflossen wird, nur mit dem halben ermittelten Wert auszuliegen sein.

In der Regel ist die Aufgabe insofern umgekehrt gestellt, als vorhandene Fahrschaltertypen mit bestimmten Stufenzahlen zu verwenden sind. In diesem Fall kann eine der Stromgrenzen nicht mehr frei gewählt werden. Die obere Stromgrenze soll zwecks Ausnützung der Triebmaschine eingehalten werden, man wird demnach die untere Schaltstromgrenze aus der Stufenzahl bestimmen und nachprüfen, ob die Stromstärke wegen zu geringer Stufenzahl

zugehörigen Stromstärken skalenmäßig aufzutragen. Jede Gerade, die gleiche Stromwerte auf den beiden Ordinatenachsen verbindet, ist der geometrische Ort für alle Geschwindigkeits- bzw. Widerstandswerte für die betreffende Stromstärke.

Für die Auslegung der Geschwindigkeitsregelung werden für die Triebmaschinen des öfteren die $v = f(J)$ -Kennlinien für andere Spannungstufen benötigt, als für welche die Triebmaschine gebaut ist und für welche die experimentell ermittelten Kennlinien zur Verfügung stehen.

Aus der Kennlinie des Reihenschlußmotors lassen sich mit ausreichender Genauigkeit die für beliebige Spannungen geltenden Kennlinien auf Grund der Motoreigenschaft, daß die Umlaufzahl der Gegen-EMK verhältnismäßig ist, berechnen. Man zeichnet in das Bezugssystem der Kennlinie die EMK-Linie $E = e - JW$ ein (Abb. 377). Punkte mit gleichen Abszissen in der $n = f(J)$ -Linie stellen zusammengehörige Werte von n und E dar. Auf Grund der Proportionalität sind sodann z. B. für $E' = \frac{e}{2} - JW$

die zugehörigen n' -Werte zu finden.

Für den Nebenschlußmotor ist das Verfahren in bezug auf den Ankerstrom das gleiche.

17. Die Bemessung der Widerstände.

Wenn der Ohmsche Wert der Widerstandsstufen festgestellt ist, so muß auch noch ihre Wärmekapazität ermittelt werden. Für Stadtbahnen ist dies von besonderer Wichtigkeit, weswegen die auf Grund der mittleren Haltestellenentfernung gewonnenen Fahrpläne 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, so kann der genaue Verlauf der Erwärmung festgestellt werden.

Bei Straßenbahnen ist es nicht mehr nötig die Rechnung durchzuführen, weil auf Grund der Unzahl von vorhandenen Ausführungen bekannt ist, daß bei Verwendung von Nickel 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; insofern die elektrische Bremse nicht regelmäßig benützt wird, genügen etwa 150 kg.

18. Steuerung von Drehstromlokomotiven. Die Steuerungen von Drehstromfahrzeugen bilden eine besondere Gruppe für sich, weil bei diesen die Geschwindigkeit nicht mehr durch Regelung der an die Motoren angelegten Spannung, sondern nur durch Änderung

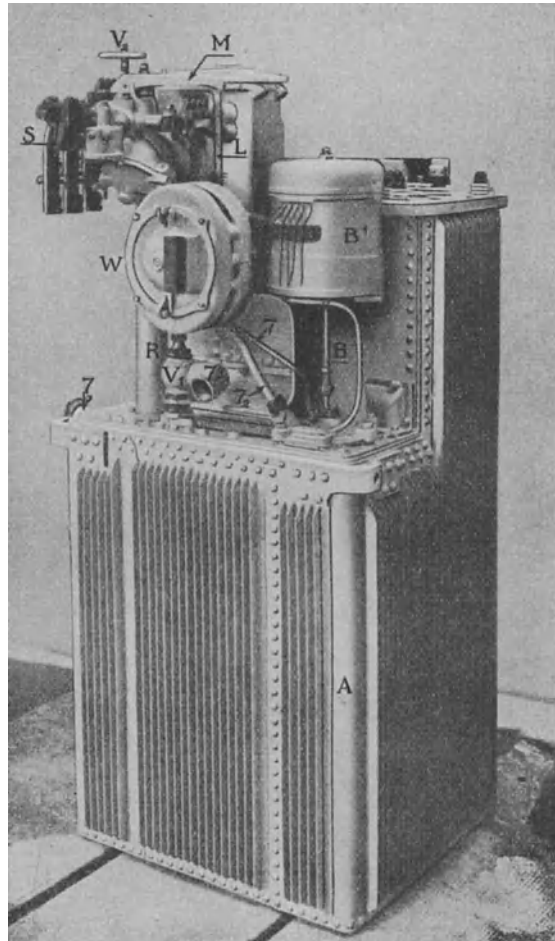


Abb. 378. Anlaßvorrichtung mit Flüssigkeitswiderstand der Drehstromlokomotiven, Reihe 50 der italienischen Staatsbahnen (West).

A Windkessel, A, Flüssigkeitsbehälter, R Druckrohr, B Umlaufpumpe, B, Motor für jede Umlaufpumpe, t Füllstutzen, W Regler für die Begrenzung der Leistung beim Anfahren.

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 für eine schalttechnisch geeignete, andere Spannung. Auch die zur Erreichung einer Geschwindigkeitsregelung anwendbaren Mittel sind ganz verschieden, je nachdem sie im Stator oder im Rotor zur Verwendung 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; zu diesem Behufe müssen in den Rotorstromkreis Widerstände geschaltet werden (Abb. 378, 379).

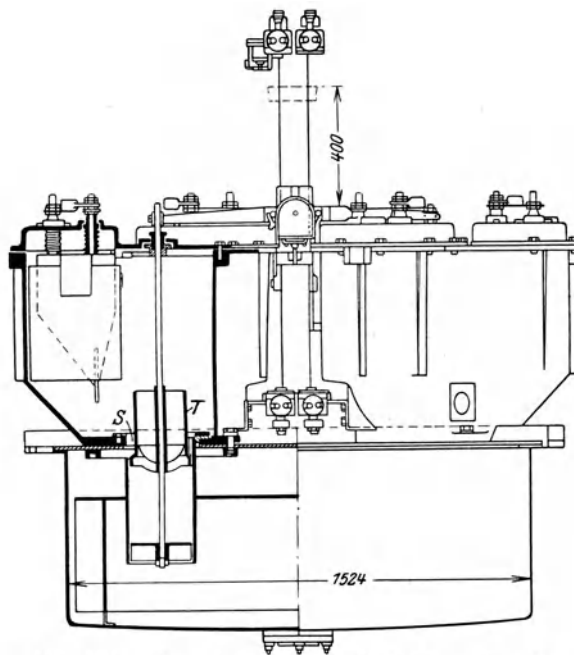


Abb. 379. Flüssigkeitsanlasser der Lokomotiven der Norfolk & Western-Bahn (West.).

Diese sind dann entbehrlich, wenn die Polumschaltung so weit getrieben 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. 380).

An Stelle der immerhin verwickelten 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. 381). Diese Schaltungsart ist verlassen worden.

Die Anordnung hat den mechanischen Nachteil, daß der eine Motor zeitweilig leer mitgeschleppt werden muß. Im Hinblick auf die großen Massen und das starre 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 Anker vermieden wird. Auf diesem Wege hat man vier wirtschaftliche Fahrstufen erzielt.

Die von Kandó (Ganz) für die Österr. Bundesbahnen zu liefernden zweimotorigen Spalt-Umformerlokomotiven erhalten fünf Geschwindigkeitsstufen, die durch Kaskaden- und Polumschaltung erzielt werden. In Nebeneinanderschaltung laufen die Triebmaschinen 5-, 8- und 12-polig, in der Kaskadenschaltung 16- und 24-polig; dementsprechend entstehen die Geschwindigkeiten

16·8, 25·2, 33·6, 50·4, 67·2 km/h.

Der Spaltumformer erzeugt aus dem aufgenommenen Einphasenstrom zwei-, drei- und vierphasigen Drehstrom.

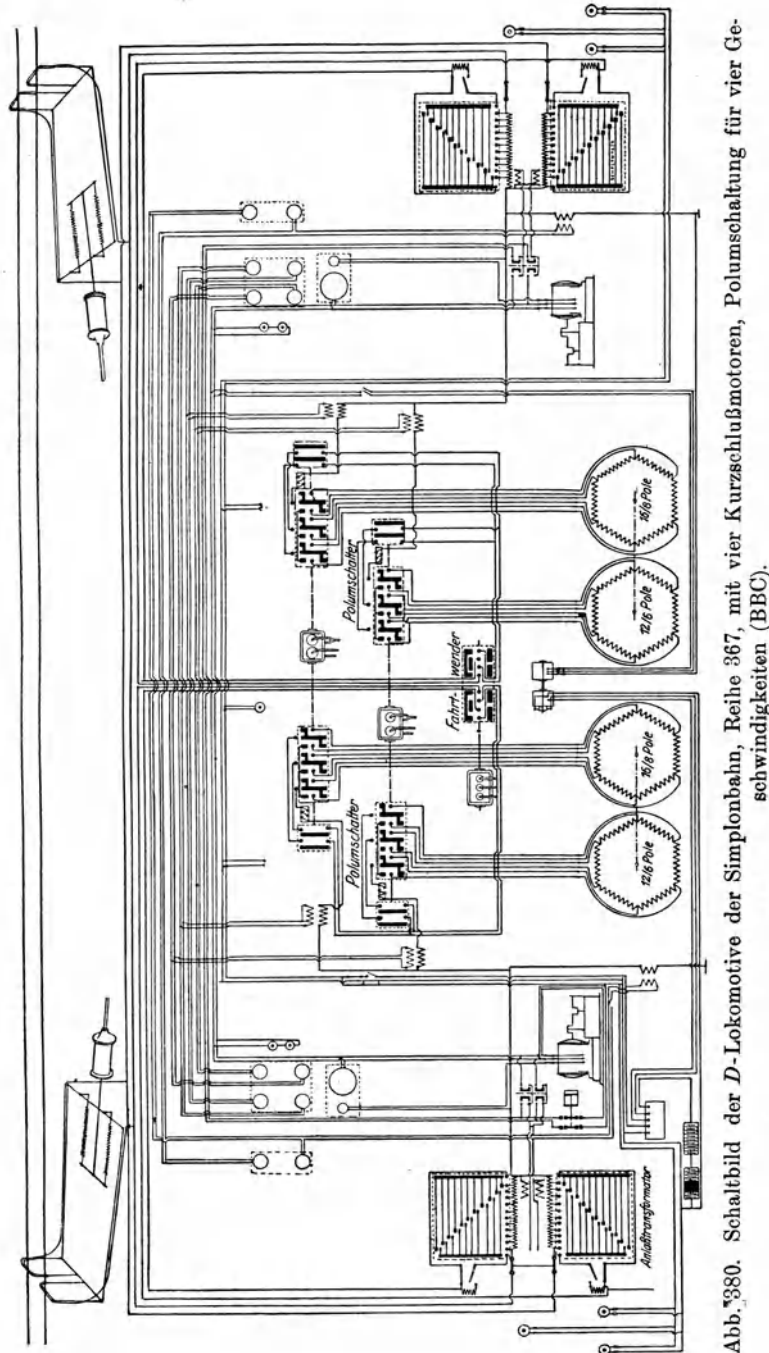


Abb. 380. Schaltbild der D-Lokomotive der Simplonbahn, Reihe 367, mit vier Kurzschlußmotoren, Polumschaltung für vier Geschwindigkeiten (BBC).

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 diesem

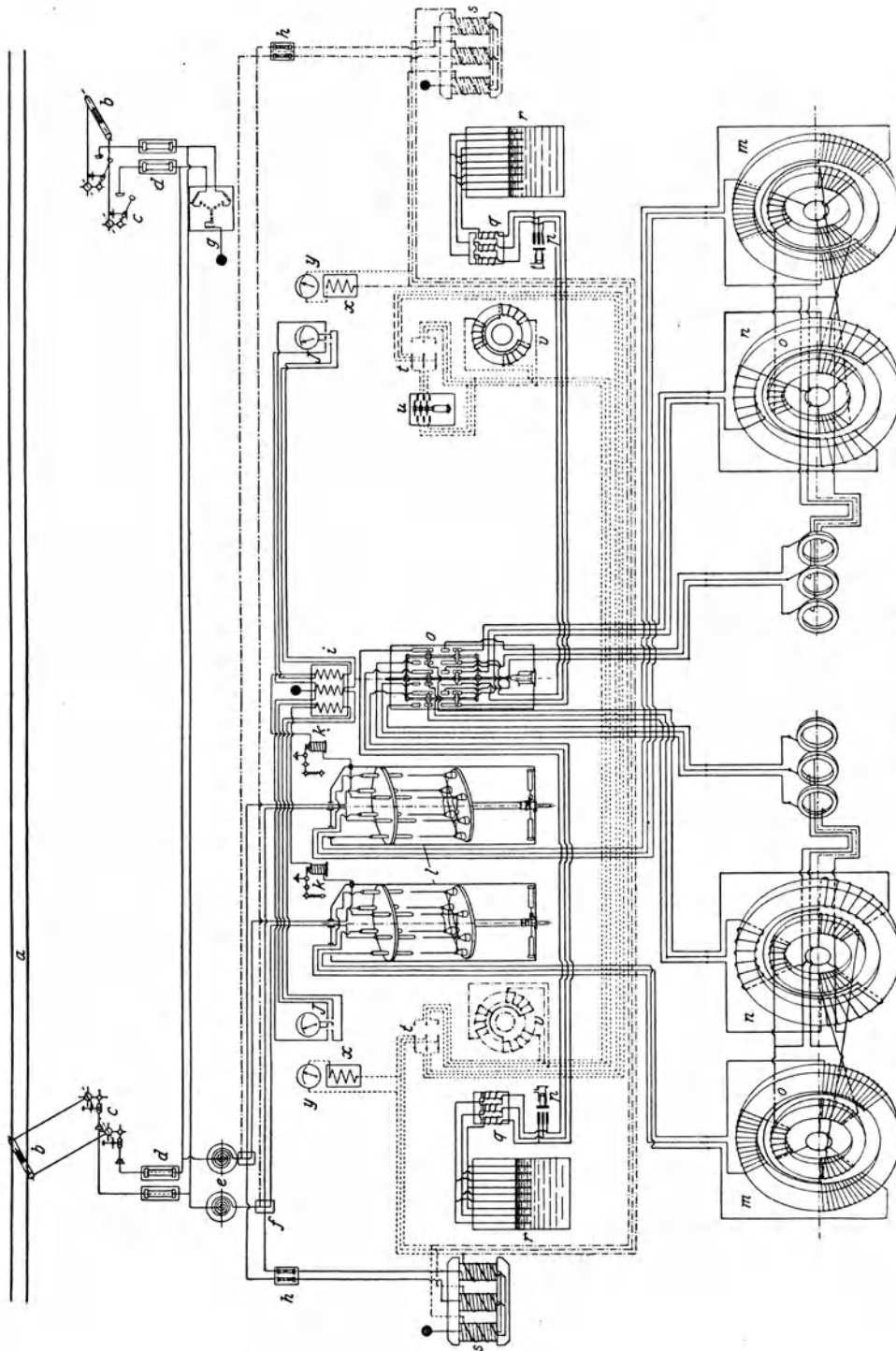


Abb. 381. Schaltbild der Drehstromlokomotiven, Reihe 36 der italienischen Staatsbahnen, zwei Geschwindigkeiten (Ganz).

Zweck pneumatisch betätigte Flüssigkeitswiderstände (Abb. 378), die nebenbei eine in diesem Falle besonders erwünschte stufenlose Anfahrregelung ermöglichen.

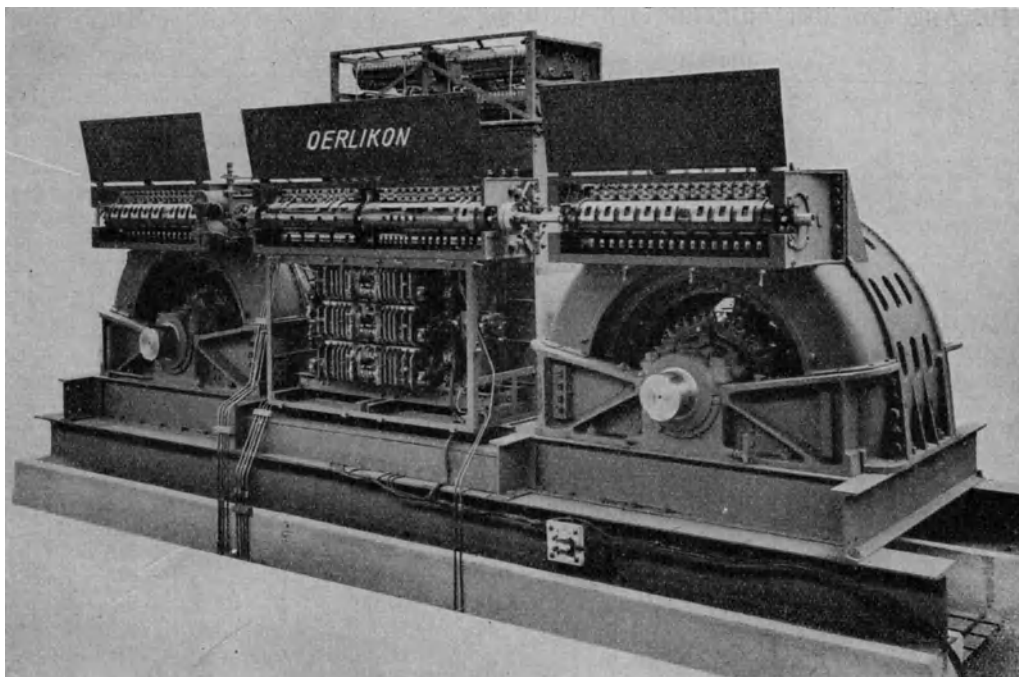


Abb. 382. Anordnung der Polumschalter an den Triebmaschinen der 2 — D — 2 Drehstromlokomotiven Reihe 332 der italien. Staatsbahnen (MFO).

Diese Widerstände bestehen aus zwei kommunizierenden Behältersystemen. Durch Steigen der Flüssigkeit in einem derselben wird über eintauchende Metallelektroden der Widerstand schrittweise bis zum Kurzschluß vermindert (Abb. 379).

Trotz dieser einleuchtenden Vorteile des Flüssigkeitsanlassers sind neuere Maschinen mit metallischen Anlaßwiderständen gebaut worden (Abb. 382).

Im Zusammenhang mit der innerhalb jeder Fahrstufe praktisch starren Geschwindigkeit 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 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 greift somit beim Drehstromsystem auch auf die Bestimmung der Polzahlen der Triebmotoren und die Bemessung des Raddurchmessers über.

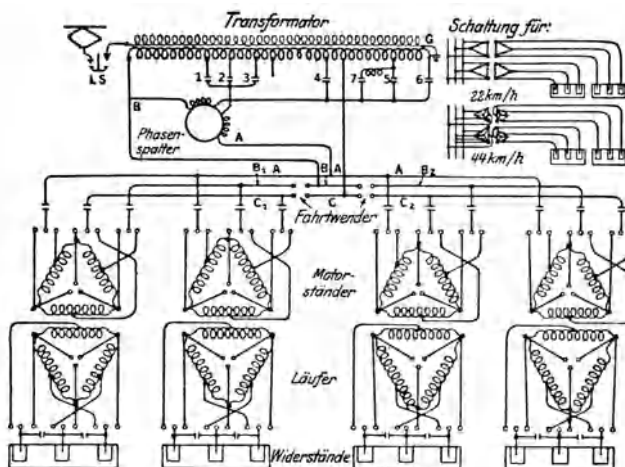


Abb. 383. Schaltplan der Wechselstrom-Drehstrom-Umformer-Lokomotive der Norfolk & Western-Bahnen (West.).

19. Angaben über ausgeführte Steuerungen.

Lokomotiven (Wechselstrom [Drehstrom] betrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Stromart, Perioden- zahl	Spannung V		Leistung PS	Beschreibung, Schaltbild
			Linie	Steu- erung		
Norfolk- und Westernbahn (West)	Pneumatisch betätigter An- laßwiderstand, Polumschal- tung	$\frac{W-D}{25}$	10000	—	8×450	ERJ Feb. 1916. Proc. 1916, S. 154.
Lötschberg, C + C (MFO)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Einzelschalter, Gleich- stromzugspulen	$\frac{W}{15}$	15000	420	2×1000	SBZ Bd. 57, Nr. 7.
Simplon, D (BBC)	Druckluftbetätigte Schalt- walzen für Polumschaltung, Stufenschaltung zum An- lassen	$\frac{D}{15}$	3000	3000	2×850	SETZ 1909, S. 405. SBZ 1909, S. 237.
Felten & Guil- laume. Lah- meyer.	indirekt, elektromagn. Aus- lösung pneumatischer Einzel- schalter	—	—	—	—	ETZ 1908, S. 204.
Preuß. Staatsb. ES 1 2—B—1, ES 6 1—C—1, EG—505 D (SSW).	stufenlos, indirekt, Dreh- transformator, elektromagn. Einzelschalter für die Span- nungsstufen und den Fahrt- wender	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	460 — 315	1×1600 1×1800 1×1800	ZVDI 1911, S. 1926. — GANr. 947, S. 177. — EKB 1912, S. 468 u. 491.
Preuß. Staatsb. EG 551—552 u. 567—470 C + C (BBC)	indirekt, abgestuft, Stufen- schalter	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	—	—	GA Nr. 950, S. 27.
Preuß. Staatsb. EG 506—507 —508, D	indirekt, abgestuft, Dreh- transformator mit Druckluft- antrieb, Drehtransformator mit elektr. Antrieb. Span- nungsstufen, elektromagnet. Einzelschalter	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	456	600	GA Nr. 947, S. 183. ETZ 1913, H. 31.
Preuß. Staatsb. ES 3, 2—B—1 (BEW)	direkt, Bürstenverschieber, indirekt, elektromagnetischer Einzelschalter	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	—	—	GA Nr. 948, S. 196.
Preuß. Staatsb. EP 235 2—D—1 (BEW)	wie vor	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	350	3000	GA Nr. 948, S. 198. EKB 1919, S. 140.
Preuß. Staatsb. ES 2, 2—B—1, EG 503 D (AEG)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Einzelschalter, Fahrt- wender mit Druckluft	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	570	1200 800	GA Nr. 948, S. 202.
Preuß. Staatsb. EG 511 B + B (AEG)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Einzelschalter	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	1100	2×600	GA Nr. 949, S. 3.
Preuß. Staatsb. EG 528, B + B + B (SSW)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Einzelschalter, Fahrt- wender mit Druckluftbetrieb	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	—	3×500	GA Nr. 949, S. 7.
Preuß. Staatsb., EB 201, 1—D—1, ES 5 1—C—1 (SSW)	direkt, teilweise allmählich, teilw. abgestuft, Drehtrans- formator m. Handbetätigung, Einzelschalter	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	320	2×1300 1×1900	GA Nr. 947, S. 180. — ZVDI 1915. A 562.
Preuß. Staatsb. ES 9, 1—C—1 EP 201, 1—C—1 (MSW)	direkt, abgestuft, Schaltwalze mit Nockenwalze zur Betäti- gung von Einzelschaltern	$\frac{W}{16\frac{2}{3}}$	15000	640	1×1800 1×1800	ETZ 1919, H. 31. — GA Nr. 950, S. 22.
Murnau—Ober- ammergau, 2—A	indirekt, abgestuft, elektro- magnetische Schützen	$\frac{W}{16}$	5500	280	2×175	EKB 1909, H. 28, S. 535.
New Haven Rd. Reihe 1—41 (West.)	indirekt, abgestuft, elektro- pneumatisch	$\frac{W-G}{25}$	$\frac{11000}{600}$	2·300	4×250	EKB 1908. ERJ Aug. 1907.

Lokomotiven (Wechselstrom [Drehstrom] betrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Stromart, Perioden- zahl	Spannung V		Leistung PS	Beschreibung, Schaltbild
			Linie	Steue- rung		
Ch. d. F. du Midi, 1—3 A—1, Atelier du Nord	indirekt, Drehtransformator	W	12000	230	3 × 500	IE 1913, S. 184.
Rjukan, 2 A + 2 A (AEG)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W 16	10000	220	4 × 125	EKB 1912, S. 722.
Mariazell, C + C (SSW)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W 25	6000	220	2 × 300	EKB 1912, H. 4.
Mittenwaldbahn, 1—C (AEGU)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W 15	15000	840	1 × 800	Eu.M 1913, S. 386.
Italienische Staatsb., 1—C—1 (West.)	pneumatische Flüssigkeits- steuerung. Handbetätigte Polumschaltung	D 15	3300	3300	2 × 1390	ERJ 1915, S. 284.
Italienische Staatsb., E(West.)	pneumatische Flüssigkeits- steuerung. Handbetätigte Polumschaltung	D 15	3300	3300	2 × 1000	RT 1914, Taf. 32.
Italienische Staatsb. 2—C—2 (West.)	pneumatisch gesteuerte Wal- zenschalter mit Hammer- kontakten	D 15	3300	3300	2 × 1100	BBCM 1918, S. 90.
Valle Maggia, B (MFO)	direkt, abgestuft	W 20	5000	800	1 × 250	SBZ 1911, Bd. 58, S. 31.
Preuß. Staatsb. Versuchslok. Oranienburg 2A+1—A, (AEG)	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W 25	5000	1000	3 × 350	ETZ 1908, H. 17.
Ch. d. F. du Midi, 1—C—1 (TH)	indirekt, abgestuft, elektro- magnetische Schützen, Nutz- bremsung	W 16	12000	720	2 × 750	TH 1912, H. 7—13.
Ch. d. F. du Midi, 1—C—1 (West.)	indirekt, abgestuft, elektro- pneumatisch	W 15	12000	420	2 × 750	GC 1912, S. 167. — LE 1912, S. 1075.
Ch. d. F. du Midi, 1—3 A—1 (Jeumont)	elektrisch betätigter Dreh- transformator	W 15	12000	230	3 × 550	ETZ 1912, S. 1075.
Italienische Staatsb., Gr. 38, 1—C—1 (Ganz)	Handbetätigte Kaskaden- schaltung, pneum. Flüssig- keitsanlasser	D 15	3300	3300	2 × 750	EKB 1907, S. 103.
Italienische Staatsb. Gr. 36, 1—C—1 (Ganz)	dasselbe	D 15	3300	3300	2 × 600	SETZ 1905, S. 703. Zf.E 1905, S. 239.
Riksgränsen- bahn, 2—B—2 (SSW)	elektromagnetische Schützen- steuerung, druckluftbetätigter Fahrtwender	W 15	1500	—	1 × 1000	EKB 1915, S. 235.
Riksgränsenbahn 1—C + C—1 (SSW)	dasselbe	W 15	1500	—	2 × 850	EKB 1915, S. 234.
Lötschbergbahn 1—E—1 (MFO)	Stufenschalter, durch Elektro- motor betätigt	W 15	15000	500	2 × 1250	ETZ 1913, S. 1342.
Simplon, 1—C—1 (BBC.)	Pneum. betätigte Schalt- walzen	D 15	3300	3300	2 × 550	SBZ 1909, S. 236.
Rhätische Bahn, 1—D—1 (MFO)	elektromagn. (Gl.-Str.) be- tätigte Schaltwalzen	W 15	11000	390	2 × 300	SETZ 1916, S. 116.
SBB, 1—B + B—1 (BBC)	elektromotorisch betätigter Stufenschalter. Vielfach- steuerung	W 16 ² / ₃	15000	—	4 × 550	BBCM Apr. 1919, Taf. III.
Burgdorf-Thun, Nr. 4. B + B (BBC)	direkt, abgestuft	D 40	750	750	2 × 260	BBCM 1919, S. 99.
New Haven Rd. Nr. 69 (West.)	elektropneumatisch	G—W 25	11000 600	500	8 × 212	ERJ 1912, S. 274.

Lokomotiven (Wechselstrom [Drehstrom] betrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Stromart. Perioden- zahl	Spannung V		Leistung PS	Beschreibung, Schaltbild
			Linie	Steue- rung		
Zahn b a h n e n.						
Brunnen — Morschach.	direkt, abgestuft	D $\frac{50}{}$	750	750	2 × 100	ZVDI 1906.
Corvovado.	direkt, abgestuft	D $\frac{50}{}$	750	750	2 × 155	EKB 1910, S. 607.
Jungfraubahn Lok. Nr. 8—11.	direkt, abgestuft. Nutz- bremsung. Schienenbremse	D $\frac{40}{}$	750	750	2 × 165	BBC 1917, S. 33.
Jungfraubahn Lok. Nr. 4, 6.	direkt, abgestuft	D $\frac{40}{}$	750	750	2 × 150	ZVDI 1904, S. 1813.

Triebwagen (Wechselstrombetrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Stromart. Perioden- zahl	Spannung V		Leistung PS	Beschreibung, Schaltbild
			Linie	Steue- rung		
Midlandbahn (SSW).	indirekt, abgestuft. Druck- luft-Einzelschalter mit elek- tromagn. Auslösung	W $\frac{25}{}$	6600	— 300	2 × 150 2 × 200	ETZ 1909, S. 944.
New Haven-Bahn New Canaan- Branch (West.).	indirekt, abgestuft. Elektro- magn. Schützen	W $\frac{25}{}$	11000	2·300	2 × 125	ERJ Mai 1909.
Ch. d. F. du Sud.	indirekt, abgestuft. Elektro- magn. Einzelschalter	W $\frac{25}{}$	6000	350	2 × 55	EKB 1912, S. 399. — GC 1911, S. 63.
Ch. d. F. départ. de la Haute- Vienne.	direkt, abgestuft	W	10000	600	4 × 70	EKB 1913, S. 466.
Bloomington— Peoria (West.).	indirekt, abgestuft, Schützensteuerung	W $\frac{25}{}$	3300	250	4 × 75	ETZ 1908, H. 5.
London— Brighton (AEG).	indirekt, abgestuft, vielfach, elektromagn. Schützen	W $\frac{25}{}$	6000	750	4 × 115 4 × 180	EKB 1911, S. 345.
Lyoner Omni- bus- u. Straßenb.- Gesellschaft.	direkt, abgestuft	G—W $\frac{15}{}$	600	2·300	2 × 45	EKB 1909, S. 593.
Locarno—Pon- telrolla—Bi- gnasco.	direkt, abgestuft	W $\frac{20}{}$	5000	750	4 × 40	SETZ 1907, S. 747.
Martigny—Or- sières.	direkt, allmählich, Bürsten- verschiebung	W $\frac{15}{}$	8000	500	4 × 90	SBZ 1911.
Richmond—Ce- sapeak-Bay.	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W $\frac{25}{}$	6600	—	—	ZVDI 1908, S. 1389.
Haute-Rhin.	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schütze mit mecha- nischer Verriegelung	W	6600	550	4 × 35	ETZ 1914, S. 979.
St. Avold (BEW).	direkt, abgestuft	W $\frac{50}{}$	750	750	2 × 60	ETZ 1911, S. 14.
Blankenese— Ohlsdorf (AEG).	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schütze	W $\frac{25}{}$	6000	750	3 × 100	EKB 1909, S. 600. ETZ 1909, S. 1043.
Schles. Gebirgs- bahn (SSW).	indirekt, abgestuft, elektro- magn. Schützen	W $\frac{16\frac{2}{3}}{}$	15000	—	2 × 250	EKB 1915, S. 99.
Pamplona—San- guesa (AEG).	direkt, abgestuft	W $\frac{25}{}$	6000	600	4 × 60	EKB 1913, S. 350. ETZ 1913, S. 28.
Parma (SSW).	direkt, abgestuft	W $\frac{25}{}$	4000	400	2 × 70	EKB 1911, S. 49.

Triebwagen (Wechselstrombetrieb).

Anlage	Art der Steuerung	Stromart. Perioden- zahl	Spannung V		Leistung PS	Beschreibung, Schaltbild
			Linie	Steue- rung		
Pittsburg — Butt- ler.	indirekt, abgestuft, elektromagnetisch	G—W 25	6 600 600	2·300	4 × 100	RJ 1907, S. 262.
Rotterdam — Haag.	indirekt, abgestuft. Elektro- magn. Schützen	W 25	10 000	340	2 × 180	ETZ 1909, S. 444.
Padua — Fusina.	direkt, abgestuft	W 25	6 000	600	2 × 80	EKB 1910, S. 245.

Lokomotiven (Gleichstrombetrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Spannung V	Leistung PS	Beschreibung, Schaltbild
Reibungsbahnen.				
Wiener Stadtbahn Probelokomotive (Krizik).	direkt, abgestuft	3000	4 × 130	ETZ 1906, S. 1069.
Berninabahn, C+C (BBC).	Handbetätigte Nockensteuerung u. pneum. betätigter Fahrtwender.	750	4 × 200	BBCM Sept. 1917.
Paris — Orleans, 2A+2A (TH).	direkt, abgestuft	650	4 × 250	GA 1901, Nr. 586.
Chicago — Milw. — St. Paul-Ry (GEC).	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen	3000	8 × 450	EKB 1919, S. 30.
Zahnradbahnen.				
Arth — Rigi.	direkt, abgestuft	800	2 × 130	SETZ 1907, S. 212. EKB 1907, S. 251.
Barmer Bergbahn. Usui — Toge.	direkt, abgestuft indirekt, abgestuft, elektromagn. Schütze, Zugspulen für 80 V	550 650	2 × 60 2 × 350	ZVDI 1902, S. 15. AEGZ 1914, Nr. 9, S. 514.
Montreux — Glion. Rittnerbahn.	direkt, abgestuft direkt, abgestuft	750 750	2 × 110 2 × 150	SBZ 1909, S. 69. EKB 1908, H. 31.
Schöllenenbahn.	direkt, abgestuft, Nockensteue- rung.	1200	2 × 160	BBCM 1918, S. 74.
Wengernalpbahn.	direkt, abgestuft	1650	2 × 150	ZÖIAV 1919, S. 133. SchDZ 1910.
Triest — Opcina. Wendelsteinbahn.	direkt, abgestuft direkt, abgestuft, Nocken- schalter	550 1500	2 × 100 2 × 100	EB 1904, H. 15. ETZ 1914, S. 911.

Triebwagen (Gleichstrombetrieb).

Anlage. Type	Art der Steuerung	Spannung V	Leistung PS	Beschreibung, Schaltbild
Bellinzona — Me- socco.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen	1500	4 × 66	E u. M 1907, S. 950. EKB 1909, S. 84.
Berninabahn.	direkt, abgestuft	750	4 × 75	E u. M 1910, S. 767.
Frankfurt — Hom- burg.	direkt, abgestuft	1000	2 × 25	LRy&TrJ 1910, S. 357.
Lugano — Tesserete.	direkt, abgestuft	1000	4 × 45	SBZ 1910.
Michigan UTCO.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Einzelschalter, 150 V-Batterie	5000	4 × 100	ERJ 1915, S. 661. ETZ 1916, S. 2.
Berner Oberland.	direkt, abgestuft	650	4 × 65	Allioth.
Pittsburg — Buttler.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen, Dynamotor 600 V	1200	4 × 100	GEB Jan. 1914.
Rhein — Haardt.	direkt, abgestuft	1200	2 × 97	EKB 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, Schaltbild
Tabor—Bechyne.	direkt, abgestuft	1400	4 × 30	Krizik 1904.
Stockholm—Salt- jöbaden.	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen, 65 V Hilfst.	1200	4 × 150	ETZ 1914, S. 231.
Tatrabahn (SSW).	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen, Dynamotoren	1650	4 × 60	EKB 1914, S. 596.
Trient—Malé (AEGU).	direkt, abgestuft	800	4 × 66	ZÖIAV 1909, Abb. 29.
Bourg—Madame (TH).	indirekt, Schützensteuerung	850	4 × 50	RGCF 1912, S. 303.
Cöln—Bonn (SSW).	indirekt, abgestuft, elektromagn. Schützen	1000	2 × 130	GA 1908, S. 31.
Mailand—Monza (BBC).	direkt, abgestuft, Vielfach- steuerung	550	4 × 52	BBCM 1919, S. 115.
Biasca—Aquarossa.	direkt, Nockenschalter	1200	2 × 75	ZÖIAV 1912, S. 134.
New York, Stadt- bahn.	indirekt, abgestuft, elektro- pneum. Einzelschalter	650	—	ETZ 1907, H. 8.
London & North- western.	indirekt, abgestuft, elektr. Einzelschalter	600	4 × 250	MFOM 1921, Nr. 103.
Zahnradbahnen.				
Filderbahn.	direkt, abgestuft	600	2 × 150	EKB 1906, H. 16.
Martigny—Chate- lard.	direkt, abgestuft, Vielfach- steuerung	750	4 × 60	SETZ 1908, S. 552.
Monthey—Cham- pery.	direkt, abgestuft	750	4 × 75	SBZ 1909.
Münster—Schlucht.	direkt, abgestuft	750	4 × 85	SETZ 1908, S. 255.

VIII. Stromabnehmer.

Albert: Von der Rolle zum Kohlenschleifbügel. VT 1921, Mai/Juni.

Bearce: Record breaking current collection tests at Erie. GER 1923, Nr. 9.

BBC: Die Lebensdauer der Schleifstücke von Stromabnehmern. BBCM, Bd. 4, S. 115. — ETZ 1918, H. 12.

BBC: Scherenstromabnehmer für elektrische Fahrzeuge. BBCM 1916, H. 5.—BBCM 1916, H. 6.

Case: Current collection. GER Nov. 1914.

Cremer: Der Bügelstromabnehmer für elektrische Bahnen. EKB 1906, H. 5.

Ewing: Wat happens at the trolley contact. ERJ 1920, Bd. 56, Nr. 17.

Hixson: Contact conductors and collectors for electric railways. Proc. Juli 1915.

Mailloux: The trolley shoe or slide at low speed. ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 16. — ERJ 1922, Bd. 59, S. 197, 641. Ref. ETZ 1922, H. 23.

Moellendorf: Modernisierung der Elemente zur Stromabnahme bei elektrischen Bahnen. ETZ 1913, H. 48.

Schaake: 3000 V current collector for the Chic. Milw.-St.Paul locomotives. EJ 1920, Juli.

Stocker: Die Druckverhältnisse bei Bügelstromabnehmern. ETZ 1916, H. 31. — SBZ 1916, S. 58.

Storjehann: Kohlenschleifstücke für elektrische Bahnen. EKB 1918, H. 24.

Zur Rollen- und Bügelstromabnehmerfrage. EKB 1920, H. 26.

Collecting 5400 A at 58 m/h. ERJ 1923, Bd. 62, Nr. 4.

1. Allgemeines. Die Zuverlässigkeit des elektrischen Betriebes ist letzten Endes eine 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 vorkommenden Lagenänderungen der Leitung ohne Stromunterbrechung folgen können.

Diese Abweichungen sind im allgemeinen bei Oberleitungen von beträchtlicherer Größenordnung als bei Stromzuführung mit Stromschiene und Unterleitung. Weiters unterscheidet sich die Oberleitung von den beiden letztgenannten Stromzuführungssystemen insofern grundsätzlich, als die neuzeitlichen Oberleitungsbauarten durchwegs elastisch, die Stromschiene und die Leiter der Unterleitung dagegen vollständig starr und unnachgiebig gebaut sind.

Eine starre Arbeitsleitung und geringe Abweichungen von der Regellage stellen ganz andere Anforderungen an den Stromabnehmer als große Abweichungen und ein elastischer Leiter.

Nach diesen wesentlich verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet, bilden die Stromabnehmer

- a) für Oberleitung,
- b) für Stromschiene und
- c) für Unterleitung

je eine Sondergruppe ganz verschiedener Bauart. Diese Unterschiede verschärfen sich zwischen der Gruppe a und b noch insofern, als die abgenommenen Stromstärken im Falle b das Vielfache derjenigen von a betragen, weil man zur Stromzuführung mit Stromschiene übergeht, wenn die Stromstärken mit einer Fahrleitung nicht mehr zu bewältigen sind.

2. Stromabnehmerarten für Oberleitung. Vom Standpunkt desjenigen Maschinenelements betrachtet, welches unmittelbar mit dem Fahrdraht 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) der 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 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 bei amerikanischen Bahnen selbst bei Geschwindigkeiten von 80 bis 90 km/h und darüber und Betriebsspannungen bis etwa 750 V allgemein gebräuchlich. (Abb. 384.)

Die Rolle ist dadurch gekennzeichnet, daß ihr Durchmesser größer als ihre Breite ist. 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 gepreßtem Messing oder Stahlblech mit Aluminiemeinlage sind mit gutem Erfolg erprobt worden. Letztere Ausführung hat den Vorteil geringeren Gewichtes.

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



Abb. 384. Stangenkopf mit Stromabnehmerrolle.

Soweit die Rolle in Europa überhaupt verwendet wird, pflegt man höchstens 400 A mit einer Rolle abzunehmen.

Zur klaglosen Stromabnahme ist ein Berührungsdruk von 8 bis 20 kg notwendig, wobei der niedrigste Wert für Straßenbahnbetriebe mit geringer Geschwindigkeit gebräuchlich ist. Mit Zunahme der Geschwindigkeit bzw. bei Anlagen mit ungünstigen Richtungsverhältnissen werden größere Drücke nötig.

Die Rolle läuft in einer aus gepreßtem Blech oder Temperguß erzeugten Gabel — dem Kontaktkopf — und ist meist für Graphitsmierung eingerichtet. 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 zum 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 wagrechte Achse drehbar ist. Den verlangten Berührungsdruk erzeugen im Gestell angeordnete Spiralfedern (Abb. 385).

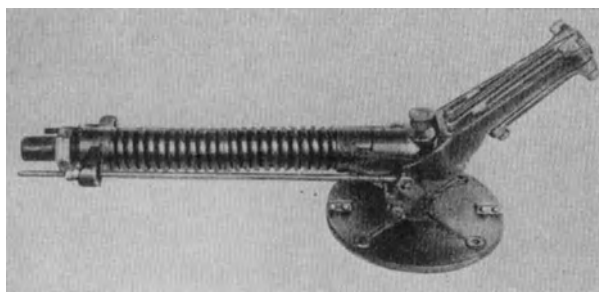


Abb. 385. Drehbarer Federbock für Rollenstromabnehmer (AEG).

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; weiters je geringer die der Lenkung der Stange entgegenwirkenden Widerstände sind. Diese Anforderungen widersprechen sich zum Teil, denn der Stromabnehmer wird um so leichter lenk-

bar, je länger die Stange wird, andererseits wird das ganze System wieder schwerer, wenn die Länge der Stange vergrößert wird.

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 und wieder an den Fahrdraht anlegen kann. Unter Berücksichtigung der vorkommenden Wagenlängen werden die Stangen 3,75 bis 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.



Abb. 386. Rollenstromabnehmer für große Höhenunterschiede der Fahrleitung (SSW).

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 V 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 V an der Grenze des Zulässigen.

Für Grubenbetriebe mit geringer Stollenhöhe wählt man oft den Rollenstrom-

abnehmer, weil dieser die Anbringung eines seitlichen Schutzes gegen Berührung der Fahrleitung ermöglicht (Abb. 64).

Einen Nachteil bildet dagegen die Unmöglichkeit, die Stange wegen ihrer Länge beim Fahrtrichtungswechsel umzulegen. Es müssen daher zwei Stromabnehmer vorgesehen oder es muß sehr vorsichtig mit nach vorne liegender Stange gefahren werden. Hierzu 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 Scherengestell (Abb. 386). Diese Bauarten sind nur für ganz mäßige Geschwindigkeiten bis etwa 10 km/h brauchbar.



Abb. 387. Stromabnehmer mit drehbarem Schleifschuh.

Um die Schäden und Störungen, welche die Entgleisung der Rolle verursachen, möglichst einzuschränken, sind vielfach Fangvorrichtungen in Benutzung. Dieselben beruhen auf der Tatsache, 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 den Lagenänderungen der Leitung wird nicht gehemmt, nur die Leine leicht gespannt. Erst 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. 387 dargestellte drehbare Schleifschuh, eine amerikanische Abart dieser in Europa früher vereinzelt verwendeten Stromabnehmertypen.

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 entsprechend 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 instandgehaltene Fahrleitung, sorgfältig gewartete Stromabnehmer) 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 abwälzt. In der Folge kommen daher stets andere Stellen der Rolle mit der Leitung in Berührung. Aus der gleichen Ursache findet wenigstens theoretisch an den Berührungsstellen kein Gleiten zwischen Rolle und Leitung statt. Tatsächlich läßt sich das Gleiten nicht vermeiden, weil der Draht je nach der zufälligen Lage auch seitlich an die Rolle anläuft.

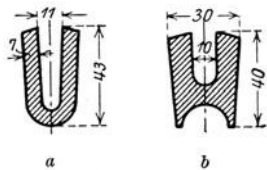


Abb. 388. Regelquerschnitte für Aluminium-Schleifstücke; a ohne, b mit durchgehendem Stahlrohr.

Beim Schleifbügel gleitet ein geeignet gestaltetes Gleitstück am Fahrdrabt, 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 $\frac{0}{10}$ igen) Kupferzusatz. Das Aluminium eignet sich zu diesem Zwecke, weil es die Kupferfahrleitung am wenigsten angreift, insbesondere wenn das Schleifstück mit Schmierrille versehen ist. Außerdem ist das geringe Gewicht von Belang (Abb. 388).

Die Lebensdauer der Stromabnehmer kann durch Einlegen von Kohlenstücken, wie sie bei Gleichstrommotoren gebräuchlich sind, mit gutem Erfolg gesteigert werden.

Wenn besondere Anforderungen, namentlich in bezug auf die Größe der abzunehmenden Stromstärke vorliegen, verwendet man als Gleitstücke auch Kupfer- oder Messingrohre, drehbare Dreieckrohre, Kohlen-schleifstücke und dergl. (Abb. 389).

Der Bügeldruck beträgt 3 bis 6 kg, bei niedrigen Geschwindigkeiten kommt man mit kleinerem Druck aus. Im allgemeinen erweist es sich als zweckmäßig, im Sommer mit geringerem Druck zu fahren als im Winter.

Für die meist verbreiteten U-förmigen Aluminiumschleifstücke liegen bezüglich der zulässigen Stromstärke und Lebensdauer reichliche Erfahrungszahlen vor.

Befriedigende Ergebnisse in bezug auf die Instandhaltung und Lebensdauer der Schleifstücke wird man nur dann erwarten können, wenn ein Berührungspunkt im regelmäßigen Betrieb mit höchstens 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.



Abb. 389. C-b-Lokomotive der Perner-Oberland-Bahn. 800/500 PS, 1500 V. Doppelscherenstromabnehmer mit doppelten Vierkantbügeln (MFO).

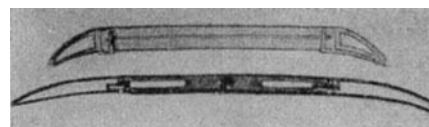


Abb. 390. Schleifstück aus Stahl amerikanischer Wechselstrombahnen.

Bei Hochspannungsbahnen werden Laufleistungen von mindestens 5000 bis über 55000 km, im Mittel etwa 40000 km erzielt.

In Amerika hat der Schleifbügel erst durch die Erhöhung der Betriebsspannung bei Überlandbahnen auf 1200 V und darüber Eingang gefunden. Die Typen sind noch wenig „standardisiert“. In Abb. 390 sind Ober- und Unterseite der aus galvanisiertem Stahl hergestellten Schleifstücke der 11000 V-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 Fahrdraht angegriffen haben, was beim stählernen Schleifstück nicht der Fall ist.

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.

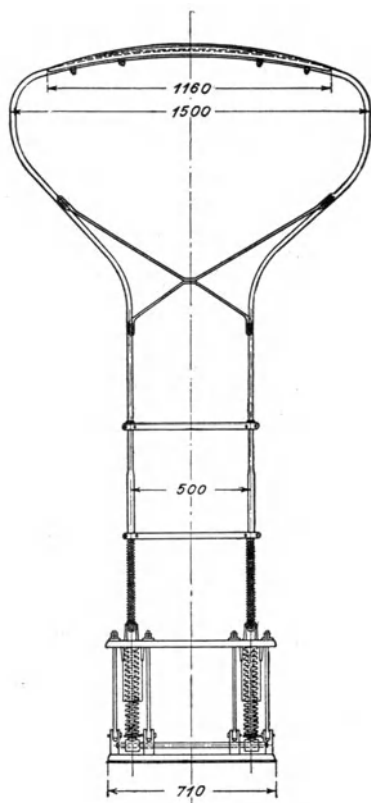


Abb. 391. Schleifbügelstromabnehmer mit teleskopischem Rohrsystem und unter dem Schleifstück geschlossenem Rohr (AEG).

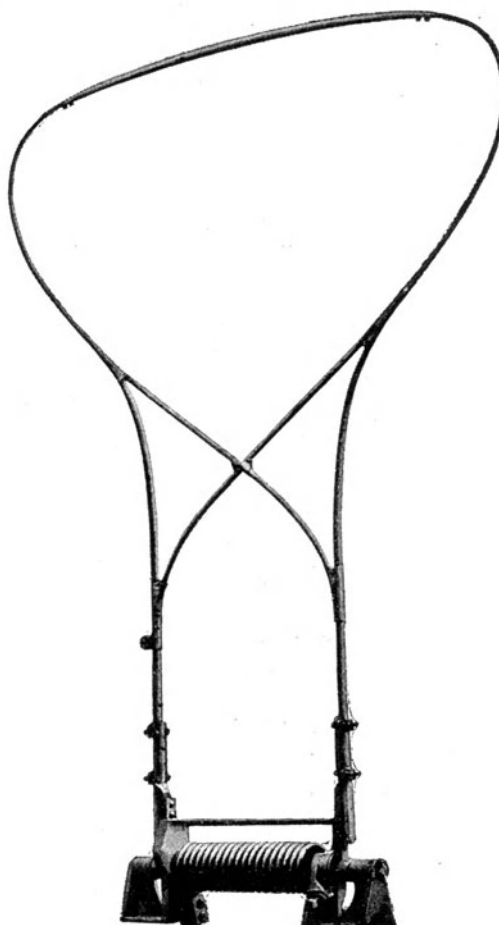


Abb. 392. Schleifbügel-Stromabnehmer (SSW).

Das Schleifstück wird zwischen die zwei Enden eines Rahmens eingesetzt und ist in dieser Anordnung selbsttragend; die Abnutzung darf daher 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 mit 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. Dieser Bügel wird aber etwas schwerer (Abb. 391).

Rahmen und Gestell des Schleifbügels weisen, dem jeweiligen Zweck entsprechend, mannigfaltige Ausführungen auf.

Die Grundform bildet der leierförmige Rahmen von Siemens-Halske (Abb. 392). 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 ge-

kennzeichnet; 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 gespannter Leitung ist hierzu ein nicht geringer Kraftaufwand an der Bügelleine nötig; oft ist

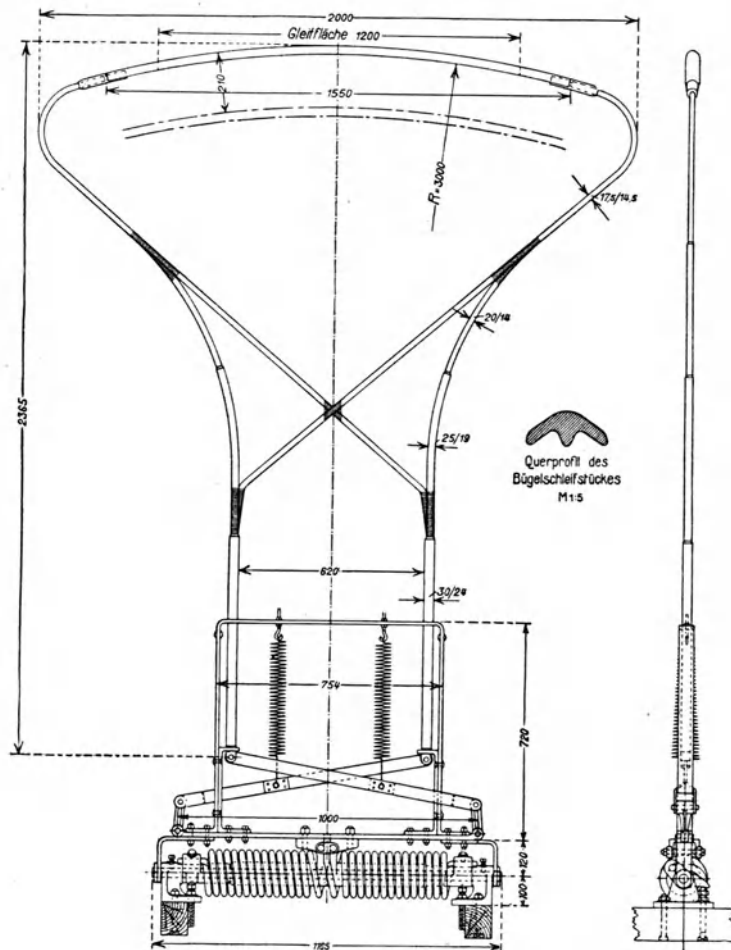


Abb. 393. Schleifbügel-Stromabnehmer mit durchdrückbarem Gestell.
(Züricher Straßenbahn.)

das Umlegen überhaupt nur in der Mitte des Spannungsfeldes möglich, unter Umständen, z. B. bei steilen Zahnradbahnen, überhaupt undurchführbar.

Den Eigenheiten dieser Bauart Rechnung tragend, zieht man in den 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 jedoch wesentlich mehr Bestandteile als der vorherbeschriebene Bügel, erfordert daher im Betrieb sorgfältige Wartung (Abb. 391).

Eine Vermischung der beiden beschriebenen Bauarten verwenden die Straßenbahnen in Zürich (Abb. 393).

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. 394).



Abb. 394. Bügelstromabnehmer mit drehbarem Federbock (AEG).

Die beschriebenen Bauarten eignen sich vornehmlich für Straßenbahnbetriebe mit mäßigen Geschwindigkeiten und mit im allgemeinen wenig veränderlicher Höhenlage der Fahrleitung. Kommen Tunnels, Unterführungen und dergl. oft vor, die mit Geschwindigkeit befahren werden müssen, so eignet sich hierzu die in Abb. 395, 396 dargestellte Anordnung besser, weil bei dieser sich der Arbeitswinkel des Schleifstückes bei Änderung der Höhenlage konstant bleibt. Diese Bauart 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 Fahrdrabt gewahrt bleibt. Vermehrt wird dieser Übelstand noch durch die verhältnismäßig große, dem Winddruck ausgesetzte Fläche des Bügelrahmens.

Unbequem ist namentlich beim Hochspannungsbetrieb das Umlegen des Bügels.

Für Vollbahnen, wo diese Eigenschaften des leierförmigen Gestelles nicht in Kauf genommen werden können, ist daher der Scherenstromabnehmer mit pendelndem Schleifstück zur Regel geworden (Abb. 397 bis 399).

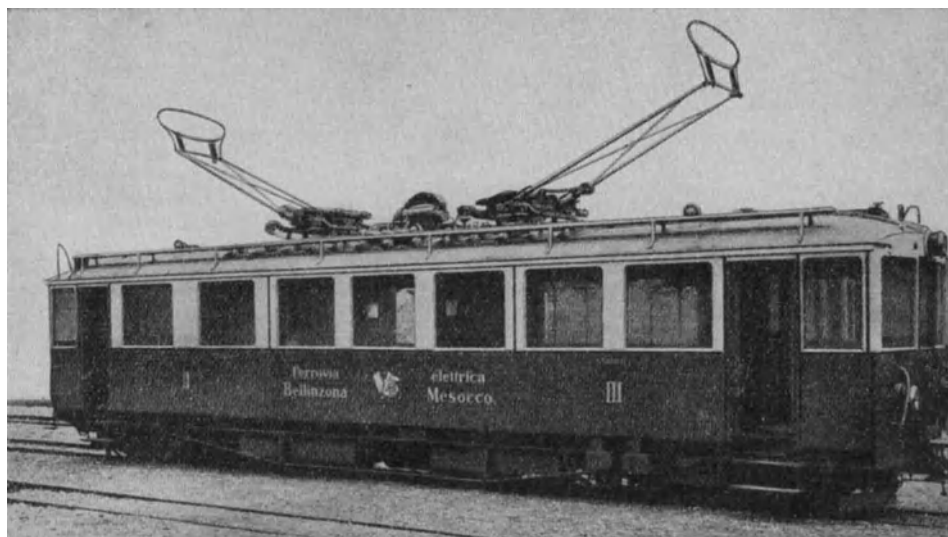


Abb. 395. Bügelstromabnehmer für große Höhenunterschiede (MFO).

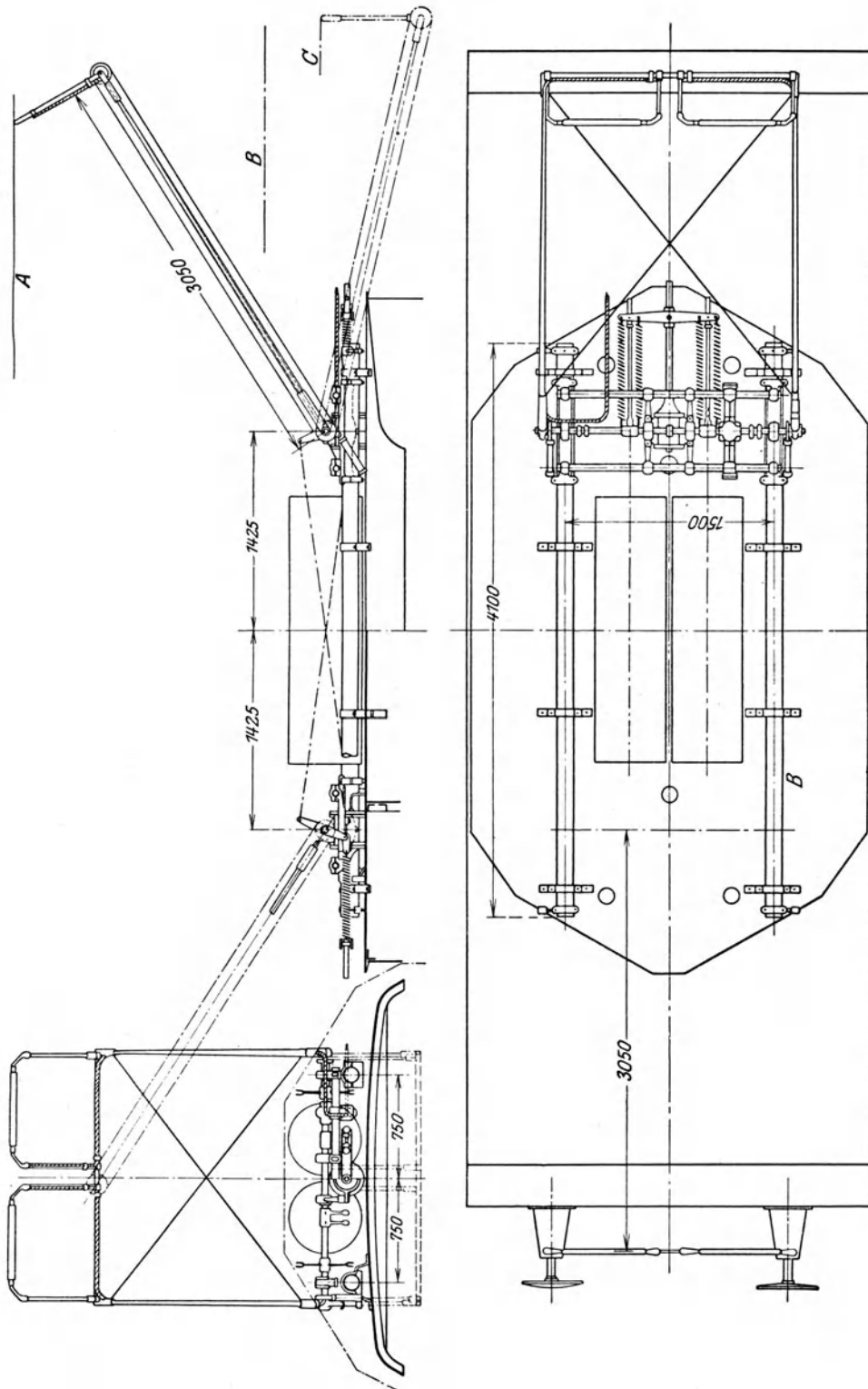
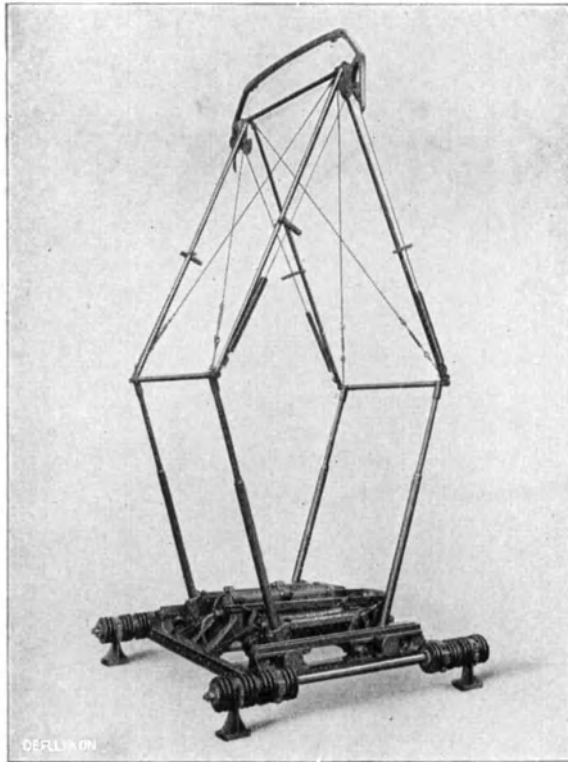
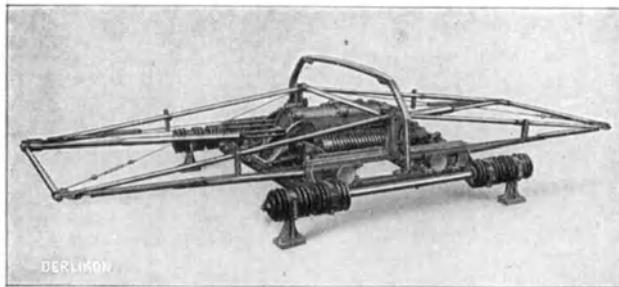


Abb. 396. Doppelbügelstromabnehmer für Drehstrombetrieb. Italienische Staatsbahn. Betriebsspannung 3000 V (West.).

Der Scherenstromabnehmer mit der in Abb. 397 dargestellten Bauart — von welcher andere Ausführungen nicht grundsätzlich verschieden sind — legt sich bei Fahrtrichtungswechsel selbsttätig um. Die Gewichtsverteilung und die Federcharakteristik ist



a



b

Abb. 397. Scherenstromabnehmer für Fahrleitungshöhen von 4–7 m; *a* hochgezogen, *b* niedergelassen. Bügeldruck 2–4 kg (MFO).

500 kg beansprucht. Hierin ist der Druckluftbetätigungszyylinder inbegriffen. Die Druckluftbetätigung wird benötigt, um den Bügel jederzeit rasch und gefahrlos herablassen zu können. Zu diesem Zwecke werden die Widerlager der Spannfedern mit einem durch Druckluft betätigten Hebelsystem in Verbindung gebracht, so daß durch Ablassen der Druckluft die Federspannung nachläßt und der Bügel niedergeht.

Scherenstromabnehmer sind mehrfach mit zwei Schleifstücken ausgeführt worden, um die Strombelastung eines Bügels zu verringern. Diese Anordnung befriedigt

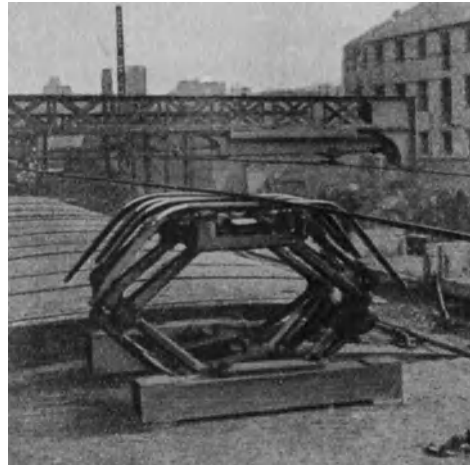


Abb. 398. Bügelstromabnehmer niedriger Bauart der Nord-Süd-Untergrundbahn, Paris.

eine solche, daß der Bügel unvermittelten Änderungen in der Höhenlage der Leitung selbst bei hoher Fahrgeschwindigkeit folgen kann. Dabei ist es ohne weiteres erzielbar, daß sich der Berührungsdruk selbst bei sehr großen Höhenunterschieden der Fahrdrathlage nicht viel ändert. Nichtsdestoweniger ist es zur Vermeidung von Überspannungen, verursacht durch Störungen am Bügel bei hoher Fahrgeschwindigkeit oder unvorhergesehenen Unebenheiten der Fahrleitung, zur Regel geworden, diese Bauart, die meist für Hochspannungsbetriebe gebräuchlich ist, zu zweit auf einem Fahrzeug anzuordnen.

Der Bügelstromabnehmer mit Leiergestell wiegt in der für Straßenbahnen üblichen Bauart etwa 60 bis 65 kg, wogegen ein Scherenstromabnehmer für Vollbahnbetriebe ein Baugewicht von

im Betriebe namentlich bei höheren Geschwindigkeiten nicht, weil der beabsichtigte Zweck, mehrere voneinander unabhängige Berührungsstellen zu gewinnen, nur unvollkommen erreicht wird, da sich die beiden Schleifstücke gegenseitig beeinflussen (Abb. 389, 401).

5. Der Walzenstromabnehmer. (Abb. 401, 402.) Dieser soll die Eigenschaften des Bügels und der Rolle in sich vereinigen, indem mit der Walze Stromstärken abgenommen werden können, die denjenigen der Rolle nicht nachstehen, andererseits die Entgleisungsgefahr beseitigt ist. Im größeren Maßstabe und für technisch hochwertige Aufgaben ist die Walze mit Parallelogramm-Rahmen für den Betrieb der italienischen Drehstrombahnen ausgebildet worden. Sie wurde in Amerika für schweren Vollbahnbetrieb mit hochgespanntem Gleichstrombetrieb für Stromstärken bis 600 A versucht, ist dann durch Schleifbügel, die die Abnahme bis zu 3000 A gestatten, ersetzt worden.

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 90 000 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.

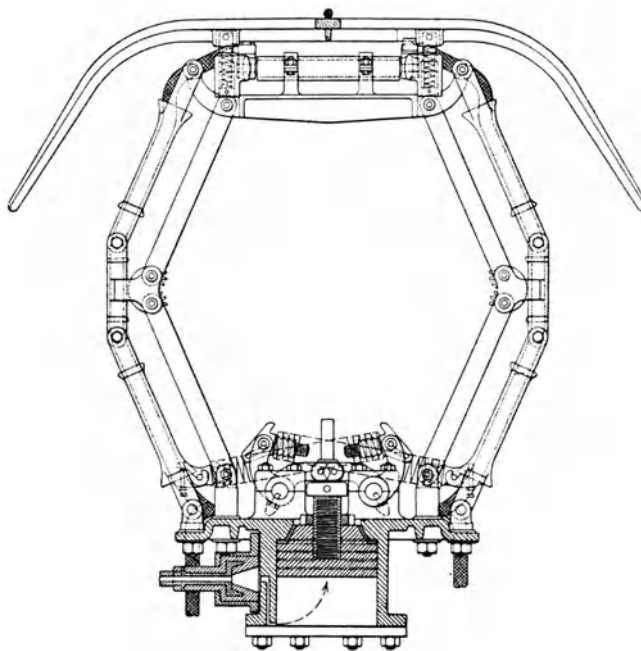


Abb. 399. Bügel-Scherenstromabnehmer niedriger Bauart der Pariser Nord-Süd-Untergrundbahn.

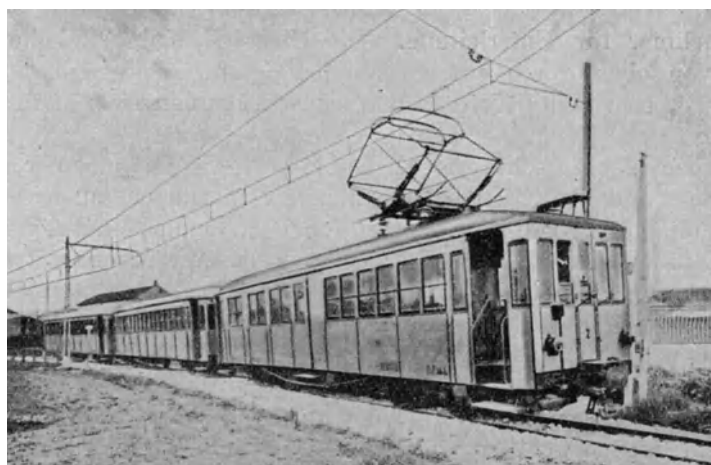


Abb. 400. Scherenstromabnehmer mit zwei Schleifstücken (Neapel—Piedimonte, 6000 V).
Seefehlner, Elektr. Zugförderung. 2. Aufl.

Die Butte-Anaconda-Bahn, die mit 2400 V Gleichstrom betrieben wird, hat noch die Walze; die nach ihrem Muster mit 3000 V 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, während man später auf den Bügel übergegangen ist.

Außer der feinmechanischen Herstellung liegt der Hauptnachteil der Walze in ihrem großen Trägheitsmoment. Die Federkraft reicht infolgedessen nicht aus, um dem System bei Unebenheiten der Leitung die zur ungestörten Stromabnahme nötige Be-

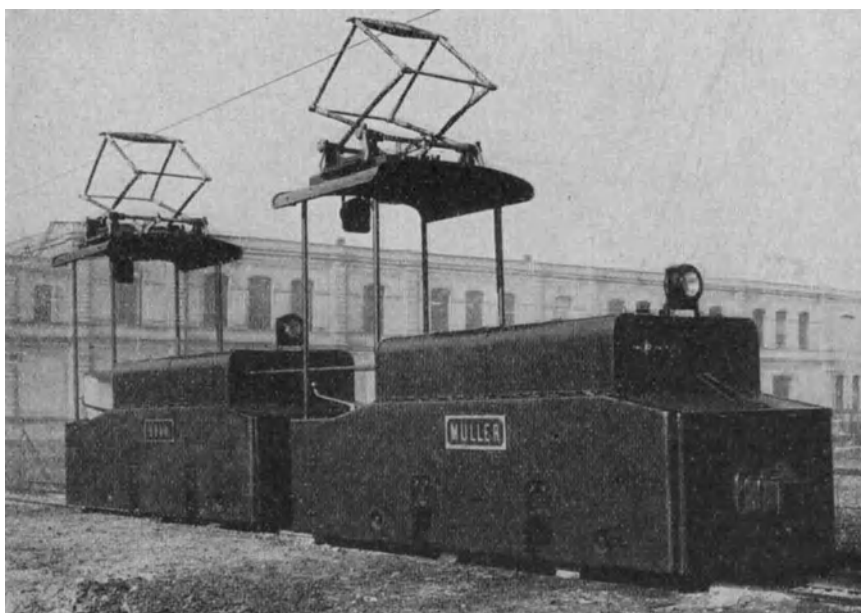


Abb. 401. Walzenstromabnehmer mit Scherengestell (SSW).

schleunigung zu erteilen. Dies gilt insbesondere für die Bauart der Valtellina-Lokomotiven (Abb. 402); das scherenförmige Gestell, das sonst meistens verwendet wird, arbeitet in dieser Hinsicht besser.

6. Stromabnehmer für Unterleitung. Die Unterleitungen sind in Kanälen angeordnet, welche von oben durch einen schmalen Schlitz zugänglich sind. Dieser darf höchstens 28 bis 32 mm lichte Weite haben, sonst klemmen sich in ihm die Räder der Straßenfahrwerke.

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 wenn man bedenkt, daß er, um nach Bedarf hochgezogen werden zu können, mit zusammenklappbaren Schleifstücken versehen sein muß. Diese Aufgabe ist tatsächlich nicht befriedigend gelöst worden und daher haben die meisten Unternehmungen dieses Stromzuführungssystem wieder verlassen.

Verhältnismäßig gut arbeitet der früher bei den Straßenbahnen in Wien und zur Zeit noch in Budapest gebräuchliche Schlitzkanalstromabnehmer (Abb. 114). In Budapest ruht er auf einem in den Schlitz geführten Schleifschuh unmittelbar auf der Schiene, wodurch der Stromabnehmer auch in Krümmungen unabhängig vom Wagenradstand gut gelenkt wird.

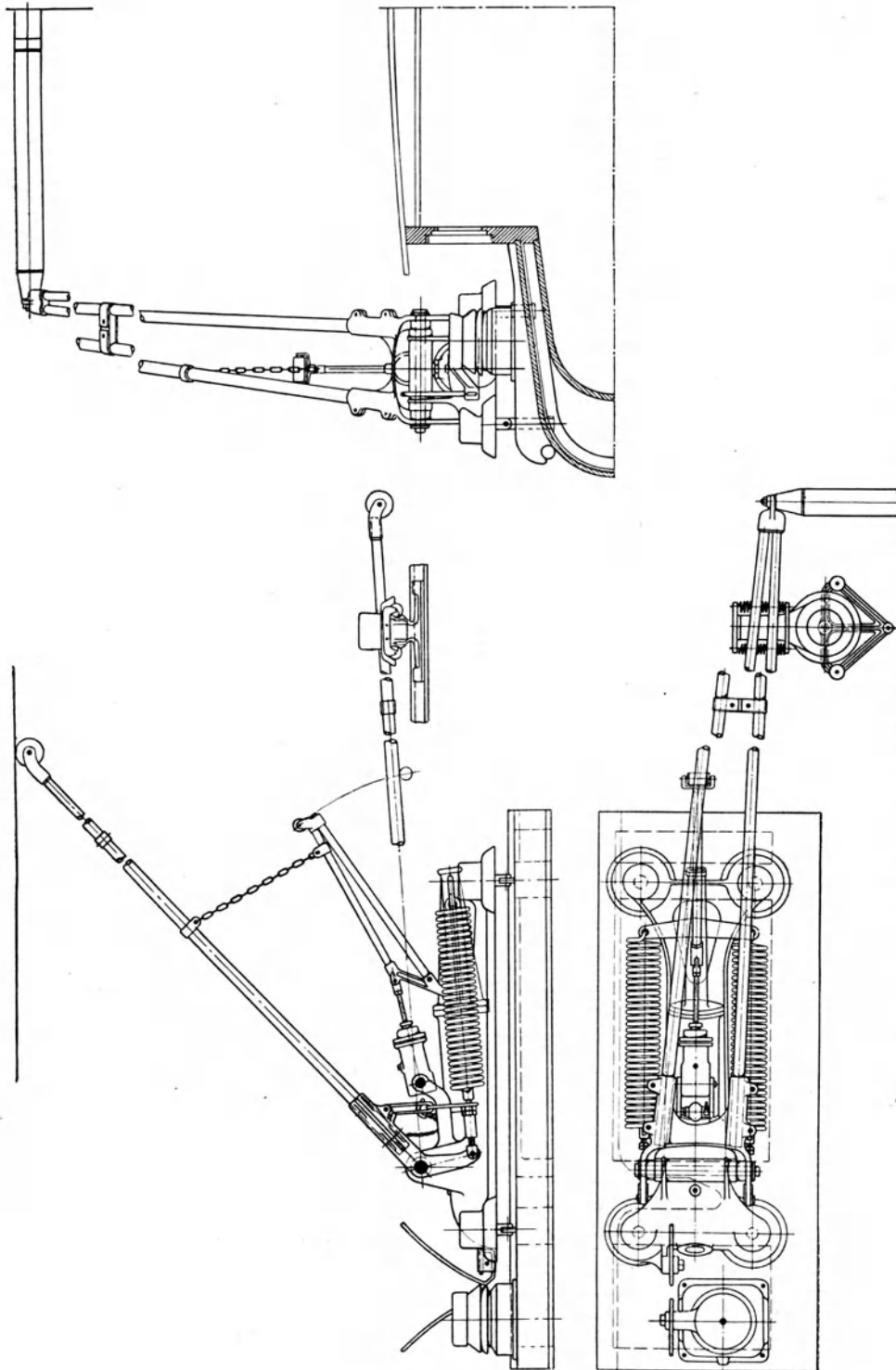


Abb. 402. Doppelwalzen-Stromabnehmer mit Rahmengestell der Valtellinabahn (Ganz.).

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.

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 Schuhs (Abb. 403) oder durch Federdruck erzeugt (Abb. 404). Die Anordnung ist für obere oder untere Bestreichung (Abb. 405) ziemlich gleich.

Die Lebensdauer der Schleifstücke wird sehr verschieden angegeben. Auf der New



Abb. 403. Stromabnehmer für Stromschiene, Berührungsdruck durch Eigengewicht erzeugt.

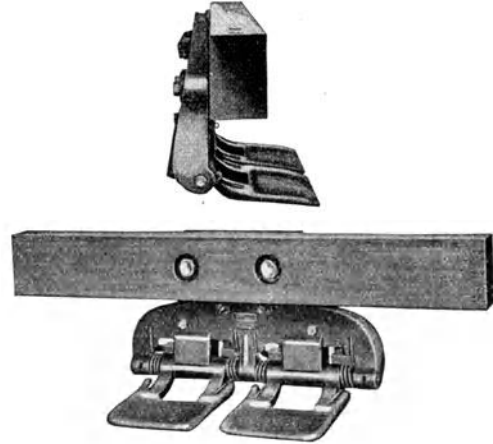


Abb. 404. Stromabnehmer für Stromschiene mit Federdruck.

York-Zentralbahn (untere Stromabnahme) läuft ein Schuh nur etwa 5700 km, wogegen die Aurora-Elgin-Bahn eine Lebensdauer von 160 000 km angibt; im Mittel darf mit etwa 50 000 km gerechnet werden.

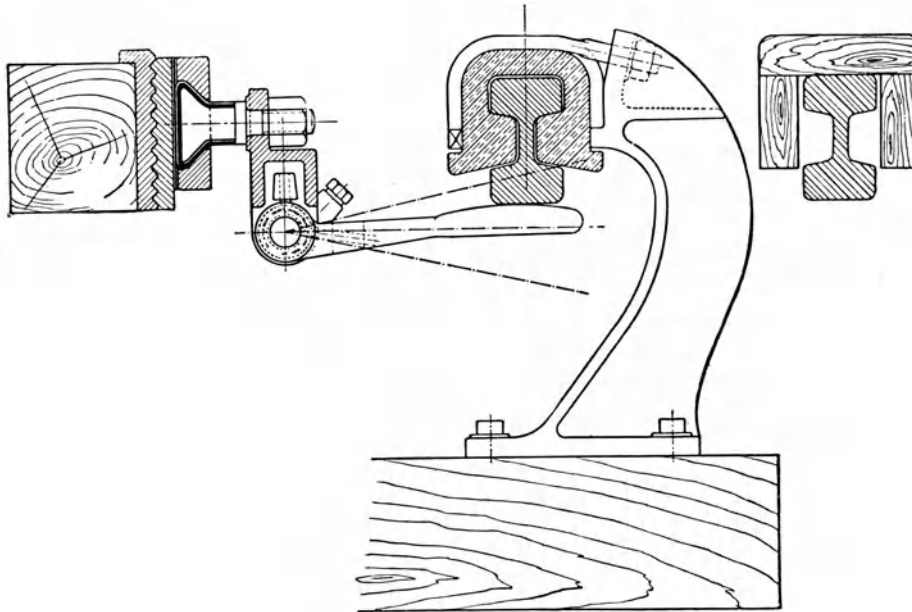


Abb. 405. Stromabnehmer für die Stromschiene, untere Berührung.

8. Isolation der Stromabnehmer. Für Betriebsspannungen bis etwa 800 V können die Stromabnehmer auf Bohlen aus gutem, trockenem 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 durch mehr oder weniger leitenden Staub zu rechnen ist, sind besondere Porzellanisolationen vorzusehen.

In Hochspannungsbetrieben ist doppelte Isolation üblich.

IX. Nebeneinrichtungen.

- Buchli: Der Elektrodampfkessel. BCM 1921, Nr. 3.
 Dürler: Zugheizung bei der Rhätischen Bahn. SBZ 1922, Bd. 79, Nr. 21.
 Hoepner: Beleuchtung der Eisenbahnfahrzeuge. Zf.B 1921. — Ref. ETZ 1922, H. 8.
 Nordmann: Die Zugheizung auf elektrischen Vollbahnen. VT 1921, H. 3.
 Rosenberger: Steam heating electr. trains. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 6.
 Whittaker: Layout of apparatus in the cab of the Ch.-M. & St. P.-Locomotives. EJ 1920, S. 249.
 Zeulmann: Die elektrische Zugheizung. EJ 1922, Nr. 6.
 Niederspannungsbeleuchtung elektrisch betriebener Überlandbahnen. SETZ 1919, S. 35.

Dem Stromlauf vom Stromabnehmer zum Steuerapparat folgend, sind verschiedene Behelfe (Abb. 406, 407) zur Wahrung der Betriebssicherheit nötig:

1. In keinem Falle darf eine Drosselspule 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.

Bei Gleichstrombahnen sind Hörnerblitzableiter (Abb. 408) oder Funkenstrecken (Abb. 409), 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.

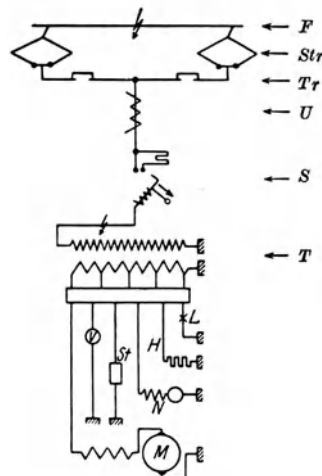
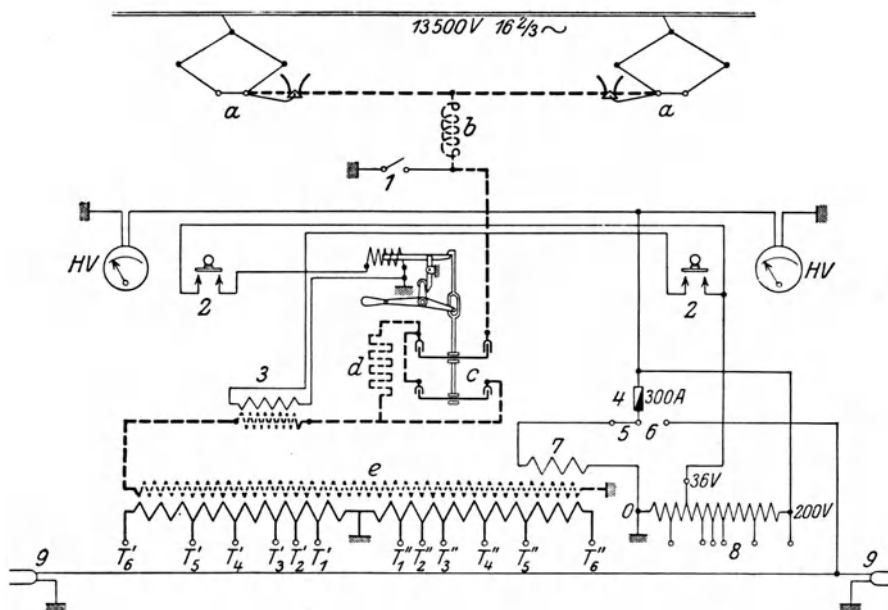


Abb. 406. Grundsätzlicher Schaltplan einer Wechselstrom-Lokomotive.

Zeichenerklärung: Hochspannungskreise: *F* = Fahrleitung, *Str* = Stromabnehmer, *Tr* = Trennschalter, *U* = Uberspannungsschutz, *S* = Ölschalter mit elektromagnetischer Auslösung und Schutzwiderstand, *T* = Haupttransformator.

Niederspannungskreise: *M* = Haupt-Triebmaschinen, *N* = Hilfsmotoren, *St* = Steuerstrom, *V* = Meßapparate, *H* = Heizung, *L* = Beleuchtung.



Zeichenerklärung:

- a* = Stromabnehmer,
- l* = Drosselspule,
- 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. 407. Schaltbild für den Hochspannungskreis einer Wechselstrom-Lokomotive. Preuß. Staatsbahnen, Reihe 511, 15000 V Betriebsspannung.

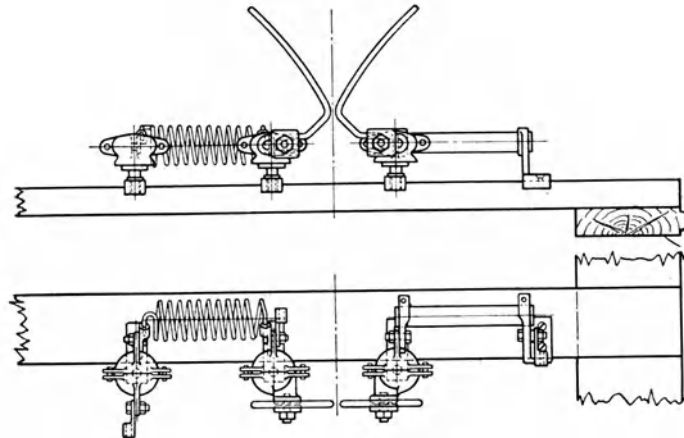


Abb. 408. Hörnerblitzableiter mit Drosselspule für Triebwagen;
Dachanordnung für Betriebsspannung bis 1000 V (SSW).

2. Schmelzsicherungen, die namentlich für 500 V Gleichstrombahnen üblich waren, sind so gut wie verlassen. Sie wirken viel zu langsam, die Zerstörungen durch Kurzschluß können daher sehr bedeutend werden. Besser entsprechen selbsttätige elektro-

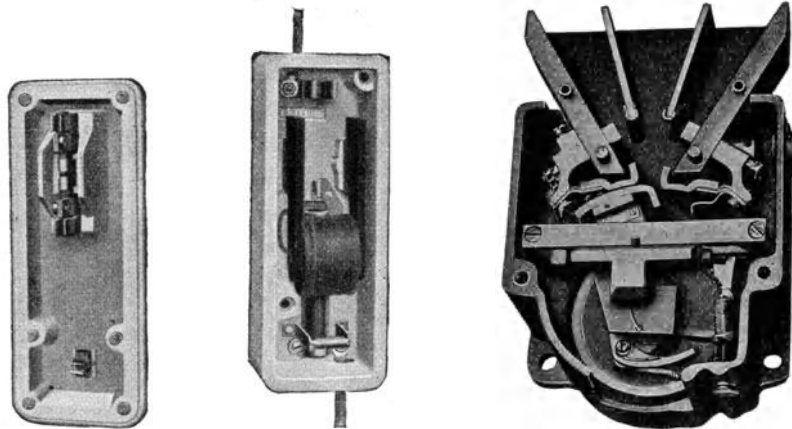


Abb. 409. Blitzableiter mit einstellbarer Kohlen-Funkenstrecke u. magnetischer Bläterspule f. Gleichstrom, Spannungen bis etwa 800 V geeignet (GEC).

Abb. 410. Höchststrom-Selbst-Ausschalter für Triebwagen; Gleichstrom bis 1000 V (AEG).

magnetische Höchststromausschalter, die für Gleichstrom mit elektromagnetischer Funkenlöschung versehen sind (Abb. 410). Für Hochspannungsbetriebe verwendet man die in ortsfesten Anlagen gebräuchlichen Ölschalter. Der Bedienungshebel oder -griff dieses Schalters ist stets in der Nähe des Fahrers, von diesem leicht erreichbar, anzuordnen.

3. Die Beleuchtung wird soweit irgendmöglich von der Fahrleitung gespeist. Bei 500 bis 1000 V sind dann 5 bis 10 Lampen in Reihe zu schalten. Ein Defekt an einer Lampe löscht jedoch 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 hielt man es ursprünglich für notwendig, zur Beleuchtung dickdrähtige Niederspannungs-Glühlampen (10 bis 30 V) zu verwenden, um die Lichtschwankungen zu mildern. Es hat sich gezeigt, daß die

Beleuchtung selbst mit 100 voltigen Metallfadenlampen ganz erträglich ist, wenn die Birnen mit lichtbrechenden Glasglocken (Holophanglas) umhüllt werden.

Für Fahrzeuge, die unbeleuchtetes Gebiet befahren, sind hochkerzige 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 das Licht vom Wageninneren abgeblendet werden.

Von 1000 V Betriebsspannung aufwärts ist es unzulässig, die Beleuchtung unmittelbar anzuschließen. Zur Speisung der Lichtstromkreise und gegebenenfalls anderer Nebenbetriebe sieht man kleine Motorgeneratoren (Dynamotoren) zur Umformung der Spannung vor. Fallweise können für diesen Zweck auch Zugsbeleuchtungsmaschinen, die bei Dampfbahnen gebräuchlich sind und von einer Laufachse angetrieben werden, verwendet werden.

4. Die Heizung der Fahrzeuge elektrischer Bahnen kann nur dort mit elektrischem Strom besorgt werden, wo dessen Kosten erschwinglich sind. Hierüber gibt z. B. die Tatsache Aufschluß, daß in einem Großstadtbetrieb für die Fortbewegung eines Wagenzuges, durchschnittlich bestehend aus 2 bis 2,5 Wagen von je etwa 10 m Länge, im Mittel eine Leistung von etwa 10 bis 12 kW erforderlich ist. Für die Heizung dieses Zuges — nur mit 0,1 kW für das Raummeter 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, durch den bei Ausschaltung des Fahrstromes die Heizung eingeschaltet wird.

Abgesehen von dem verhältnismäßig großen Verbrauch — man hat mit 0,25 bis 0,1 kW für das Raummeter 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 neuerdings für Abteile III. Klasse mit zwei Außenwänden 300 W/m^3 , für Abteile mit 3 Außenwänden 350 W/m^3 und für Abteile I.—II. Klasse 400 W/m^3 vor; außerdem im Seitengang 150 W/m^3 . Die Heizung der auf den Pariser Vorortlinien verkehrenden 22 m langen Triebwagen erfordert 20 kW, d. s. $0,08 \text{ kW je m}^3$.

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 verursachen.

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.

Die Nichtbeachtung der einpoligen Erdung verursacht 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 tunlichst einzuschränken: es sind grundsätzlich einpolige Kupplungen vorzuziehen, sofern die Schaltung dies zuläßt. Besondere Sorgfalt erfordern die Bremskupplungsdosen (Abb. 411), weil das Herausfallen einer Kupplung die Bremswirkung aufheben kann.

Man sichert die Bremskupplungen durch besondere Deckelhaken gegen Herausfallen. Außerdem schaltet man einen Widerstand parallel, um der Gefahr der Unterbrechung des Brennstromkreises bei Herausfallen einer Kupplung vorzubeugen.

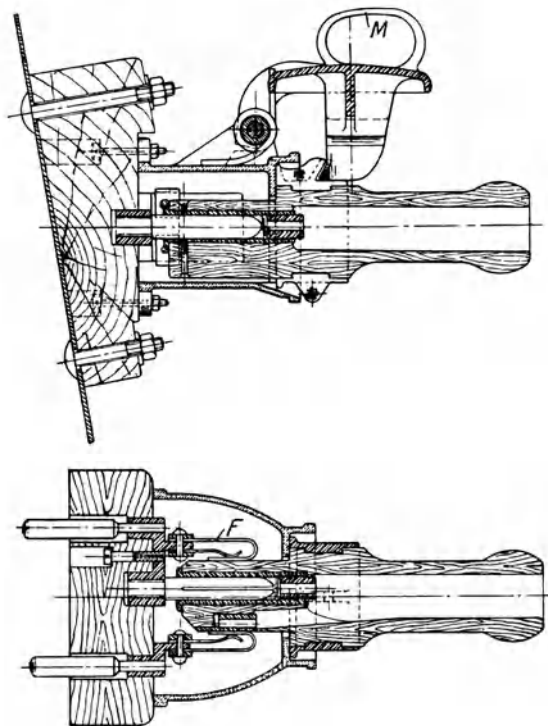


Abb. 411. Bremskupplungsdose mit Deckelsicherung für das Bremskabel (SSW).

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 Schläuchen aus Hanf mit Gummieinlage, Holz- oder Isolierrohr verlegt werden. Es ist anzustreben, die Anzahl der Leitungen möglichst zu verringern.

Die einzelnen Stromzweige können somit nicht besonders gesichert werden, es ist daher in jeder Beziehung auf sorgfältigste Herstellung der Leiter und der Isolation zu achten. Es ist Regel, nur feinflitzige Kabel zu verwenden, denn nur diese vertragen auf die Dauer Erschütterungen ohne Schaden und nur bei ihnen 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 Speise-

stellen ist die Isolation sorgfältig abzubinden, die Kabelenden sind durch Verlöten zu einem stiftartigen Ende auszubilden.

Eine sorgfältige Verzinnung der Drähte ist mit Rücksicht auf die Rostgefahr in Fahrzeugen von besonderer Wichtigkeit.

Bei Vollbahnfahrzeugen führt man die Verbindungen zwischen Steuerung und Transformator als blanke Schienen aus, was konstruktiver aussieht, doch ist auch hier auf genügende Elastizität zu achten.

Bauregeln für Triebfahrzeuge mit Reibungsbetrieb.

- Bestimmungen über die Vorlage der Typenpläne und die Bauart von Fahrbetriebsmitteln. Wien: Staatsdruckerei 1900.
- Cramer u. Mikuli: Handbuch für den Eisenbahnbau-, Bahnerhaltungs- und Bahnaufsichtsdienst. Wien: Perles.
- Kummer: Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung. Berlin: Springer 1915.
- Zehme: Fahrzeuge für elektrische Eisenbahnen. Die Eisenbahntechnik der Gegenwart. IV. Band. Abschnitt E. Wiesbaden: Kreidel 1914.
- Kundmachung des österr. Eisenbahnministers vom 15. Juni 1908 betr. die technische Einheit im Eisenbahnwesen. Wien 1908.
- Technische Vereinbarungen. Verein Deutscher Eisenbahnverwaltungen. Wiesbaden: Kreidel.
- Grundzüge für den Bau und die Betriebseinrichtungen der Lokalbahnen. Verein Deutscher Eisenbahnverwaltungen. Wiesbaden: Kreidel.

Der Unter- und Oberbau der 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 sich auch im Zusammenhang mit dem elektrischen Betrieb, namentlich der Straßenbahnen, bestimmte Oberbausysteme und Bettungsarten entwickelt haben und einzelne Anordnungen möglich geworden sind — wie die Anlage von Rasenflächen innerhalb 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 wirtschaftlicher 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. Von einer Verminderung der Steigungen in den Gleiskrümmungen kann namentlich bei Gebirgsmit verhältnismäßig großen Steigungen abgesehen werden,

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 Dampftrieb. In dieser Hinsicht besteht auch zwischen der Wahl der Spurweite und dem elektrischen Betrieb ein Zusammenhang.

Weiters 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 und 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 ihm größere Massenwirkungen zur Geltung kommen und bei Untergestellmotoren außerdem ein Teil des Motorgewichts die Achsen ungefedert belastet. Es kann daher dem elektrischen Betrieb bei 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 bezüglich Ausgestaltung des Bahnkörpers auf die angeführten Momente; diese 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.

- Adler: Ein neuer Straßenbahnwagentyp. (Berlin) VT 1919, H. 11.
 Albert: Rollenlager für Geleisfahrzeuge. VT 1923, H. 9.
 Behr: Kugel- und Rollenlager für Schienenfahrzeuge. ZVDI 1921, Bd. 65, Nr. 49.
 Clemens: Die neuen Triebwagen der Saarbrücker Straßenbahn. VT 1922, Nr. 20.
 Dehore: Leichte Wagen auf amerikanischen Überlandbahnen. GER 1922, Nr. 6. — Ref. E u.M 1922, H. 51.
 Delmez: Neuere Erfahrungen und Verbesserungen auf dem Gebiete des rollenden Materiales elektrischer Straßenbahnen. Kasten und Plattformen. ISKBV 1910.
 Favarger: Nouvelles voitures motrices et de remorques de la Cie Généroise des Tramways Electriques. SBZ 1920, Bd. 76, Nr. 22.
 Hartmann: Über Wagenkasten elektrischer Fahrbetriebsmittel. EKB 1920, H. 19.
 Hoepner: Fahrzeugabfederung. VT 1922, Nr. 18.
 Hubendick: Motorwagen für Eisenbahnbetrieb. Tekn. Tidskrift 1922, H. 35. — Ref. E u.M 1922, H. 51.
 Juliusburger: Über Handbremsen für elektrische Straßen- und Kleinbahnen. EKB 1913, H. 3.
 Kindler: Neue Triebwagen für die Berliner Straßenbahn. ETZ 1921, H. 30.
 Kindler: Verbesserung alter Triebwagen bei der Berliner Straßenbahn. VT 1923, H. 8.
 Largiader: Motorwagen und Anhängewagen neuer Bauart der Städtischen Straßenbahn Zürich. SBZ Sept. 1919, S. 134.
 Largiader: Kugel- und Rollenlager. ISKBV 1914.
 Litchfield: Applying engineering principle in design of trucks. ERJ Juli 1918.
 Müller: Ein neuer Triebwagen für elektrische Straßenbahnwagen. VT 1922, H. 5. — Ref. E u.M 1922, H. 28.
 Nordmann: Neuere amerikanische Straßenbahnwagen. EKB 1913, H. 15.
 Pforte: Rollenlager im Betriebe der Hagener Straßenbahn. VT 1922, Nr. 7.
 Roffhak: Neue Wagentypen bei der Bremer Straßenbahn. VT 1922, Nr. 35.
 Schörling: Rollen- und Kugellager. ISKBV 1914.
 Seefehlner: Zur Frage der rein elektrischen Bremsung der Straßenbahnwagen und über einen neuzeitlichen Motorwagenentwurf. EKB 1919, H. 24.
 Soberski: Der Einmannwagen und seine Bedeutung für den Straßenbahnbetrieb. GA 1922, Nr. 1108.
 Spängler-Stahl: Neuere Erfahrungen und Verbesserungen des rollenden Materiales elektrischer Straßenbahnen. ISKBV 1910.
 Stahl: Abnutzung und Lebensdauer der wesentlichsten Teile des rollenden Materiales bei Straßenbahnen. (Lieferungsbedingungen.) ISKBV 1908.
 Trautvetter: Einmann-Wagen. ETZ 1921, H. 12. — GER 1920, S. 597. — Ref. ETZ 1921, H. 25. — ERJ 1921, Bd. 57, S. 982. — Ref. ETZ 1921, H. 30.
 Wernecke: Straßenbahnbetrieb ohne Schaffner. Frankfurter Zeit. „Das techn. Blatt“ 1921, Nr. 12.
 Wernecke: Neue Straßenbahnwagen in England. GA 1923, Nr. 1095.
 Westhues: Ein moderner Straßenbahnwagen. VT 1923, H. 36.
 Zehme: Fahrzeuge für elektrische Eisenbahnen. Die Eisenbahntechnik der Gegenwart. Wiesbaden: Kreidel 1914.
 Zehme: Die Betriebsmittel der elektrischen Eisenbahnen. Wiesbaden: Kreidel 1903.
 Die Vereinheitlichungsarbeiten des Vereines Deutscher Straßenbahnen, Kleinbahnen und Privateisenbahnen. (Nach dem Stande vom Okt. 1920.) VT 1920, Nr. 32.
 Die Normung der Straßenbahnwagen in Amerika. Zf.KB 1920, H. 12.
 Neue Gesichtspunkte beim Bau von Straßenbahnwagen. BIEBKV 1913, Nr. 8.
 Neuere schweizerische Straßen- und Kleinbahnwagen. EVB 1922, H. 6.
 Nouvelle voiture motrice de tramway de la Soc. des Transports commun de la Région parisienne. GC 1922, Bd. 81, Nr. 21.
 Sample car tried in San Francisco. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 5.
 SKF-Rollenlager. ZOIAV 1922, H. 718.
 Some recent interurban car designs. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 1.
 Straßen- und Überlandwagen mit Mittelplattform. EKB 1920, H. 26.

Übersicht über Eisenbahnlagerfragen. ZOIAV 1922, H. 35/36.

Über Versuche mit Kugellagern an den Wagen der schwedischen Staatsbahnen. RGCF 1921, Bd. 24, S. 292. — Ref. ETZ 1921, H. 32.

Verbesserungen an den Hoch- und Untergrundbahnwagen der Stadt New York. ETZ 1921, Nr. 35.

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 allerdings erst durch den elektrischen Antrieb geworden, indem diese Betriebskraft bei einfacher Bedienung die wirtschaftliche Unterteilung der Zugkraft in die nötige Anzahl verhältnismäßig kleiner Einheiten betriebssicher gestattet.

Die Straßenbahn-Triebwagen 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 demselben aufhalten können. Das Einheben des Fahrgeldes pflegt im Wagen zu erfolgen, der Schaffner muß daher 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 wird, 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, da der Schaffner bei dem oftmaligen Wechsel der Reisenden nicht imstande ist, von allen das Fahrgeld einzuheben.

Hieraus folgt, daß Motorwagen für Straßenbahnen mit Haltestellenentfernungen von 250 bis 500 m mit kleinerem Fassungsraum gebaut werden sollen als solche 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 spricht insbesondere bei Überlandbahnen die bessere Lauffähigkeit eines verhältnismäßig langen Fahrzeuges, was bei höheren Geschwindigkeiten von Belang ist.

Der an sich größere Eigenwiderstand eines Triebfahrzeuges spricht dagegen, den Motorwagenfassungsraum über dasjenige Maß zu steigern, bei welchem einerseits die Zugkraft der Triebmotoren ausgenutzt wird und welcher andererseits vom Schaffner noch beherrscht werden kann. Auch der mit den Längsdimensionen wechselnde Krümmungswiderstand spricht gegen große Wagen bei zweiachsigem Laufwerk.

Die Ausnützung des Fahrers und der kostbaren elektrischen Triebeinrichtung wird wirtschaftlich durch Mitnahme von Anhängewagen gesteigert.

Wie weit das Reibungsgewicht ausgenützt werden darf, d. h. wieviele Beiwagen mitgenommen werden können, läßt sich an Hand der im IV. Teil durchgeführten Betrachtungen ermitteln. Weiters 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 50 PS-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 zu je 75 kg, 1 Sitz- und 4 Stehplätze, 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 auf einer Steigung von 60‰ schleppen, auf 40‰ dagegen schon fast zwei Wagen des gleichen Gewichtes.

Der Beiwagenbetrieb erfordert große Geleiselängen 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.

2. Bauformen. Diesen Anforderungen entsprechend, haben sich gewisse Bauformen und Ausmaße eingebürgert, die einer kritischen Betrachtung deshalb zu unterziehen

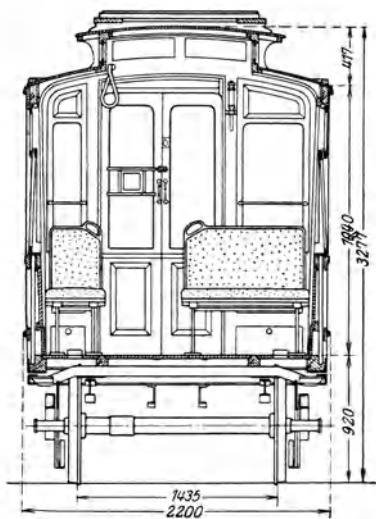


Abb. 412. Querschnitt durch einen Triebwagen mit besonderem Untergestell und Laternendach.

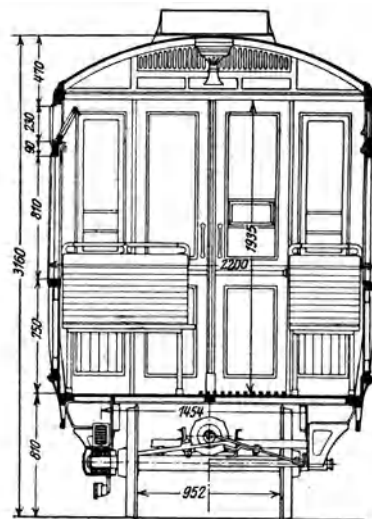


Abb. 413. Querschnitt eines Straßenbahn-Triebwagens m. getrenntem Untergestell und Tonnendach.

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 bei dieser Anordnung auf der jeweils rückwärtigen Plattform.

Die verfügbaren Straßenbreiten sind bestimmend für die Wagenbreiten. Anfänglich baute man verhältnismäßig schmale Wagen, Breite etwa 1,9 m. Diese sind unwirtschaft-

lich und lassen nur Längsbänke zu. 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 sind für zwei Bankreihen 1,5 m Wagenlänge erforderlich.

Die Höhe des Fußbodens ist gegeben durch den Treibraddurchmesser, dieser ist wieder bestimmt durch die Abmessungen der Triebmaschine. Die gangbaren Typen verlangen Durchmesser von 800 bis 850 mm, wobei zwischen Zahnradkasten, als dem-

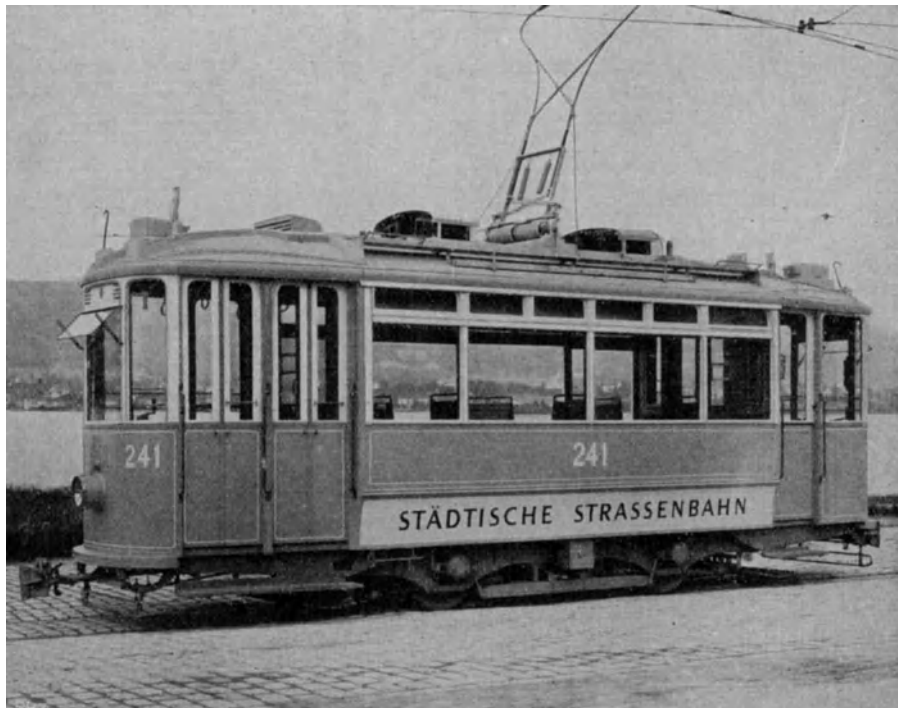


Abb. 414. Triebwagen der Züricher Straßenbahn, Tonnendach, große Plattformen.

jenigen Teil des Motors, der am tiefsten herabreicht, und Schienenoberkante — ganz abgenützte Radreifen vorausgesetzt — 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 werden, 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, mit Rücksicht auf die Pferde sogar erwünscht. Bei den viel größeren Wagen des elektrischen Betriebes 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 unzutragliche Stufenhöhe

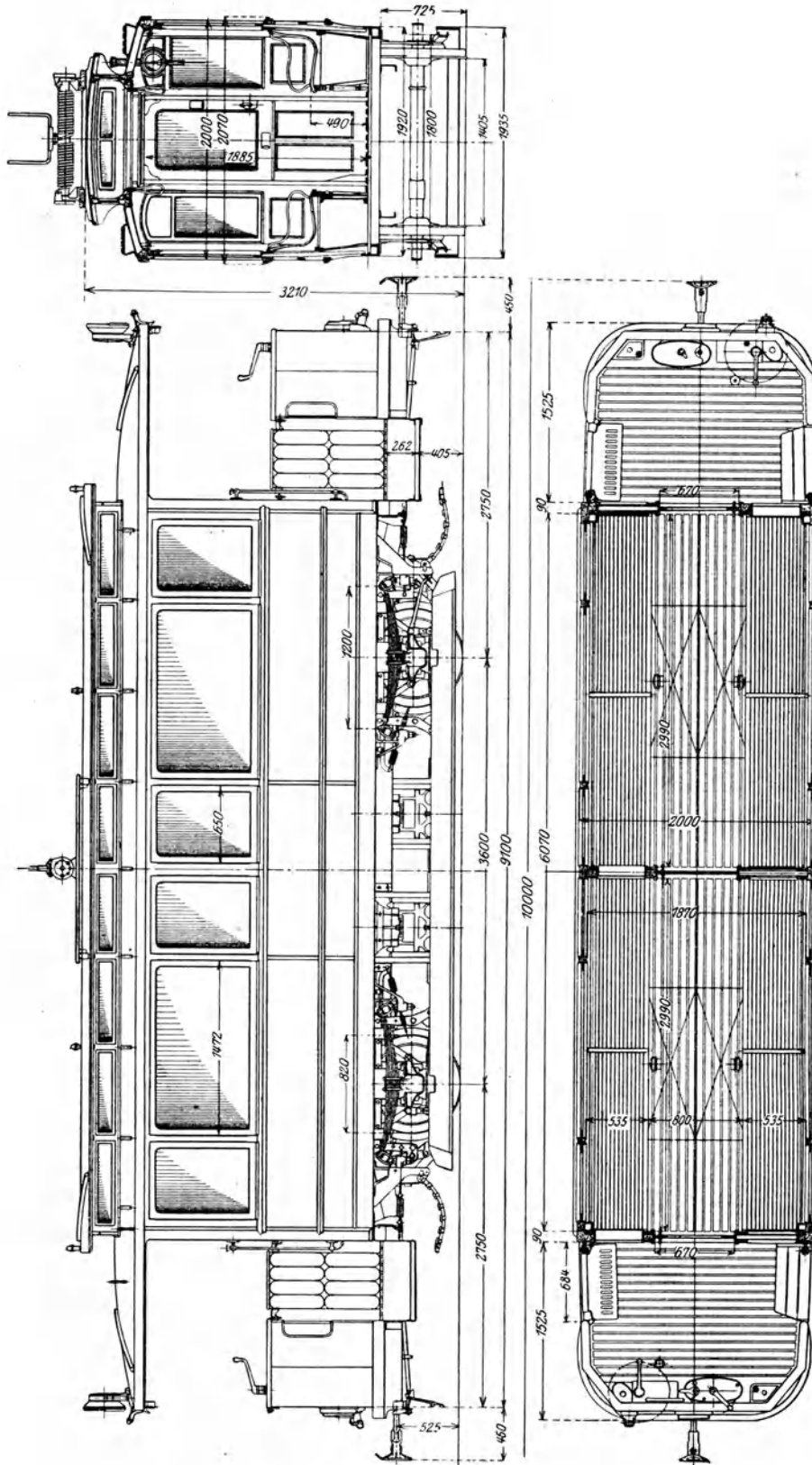


Abb. 415. Triebwagen älterer Bauart der Wiener Straßenbahn, Lenkachsen, Lenkachsen, einfache Federung, Laternendach, Längssitze.

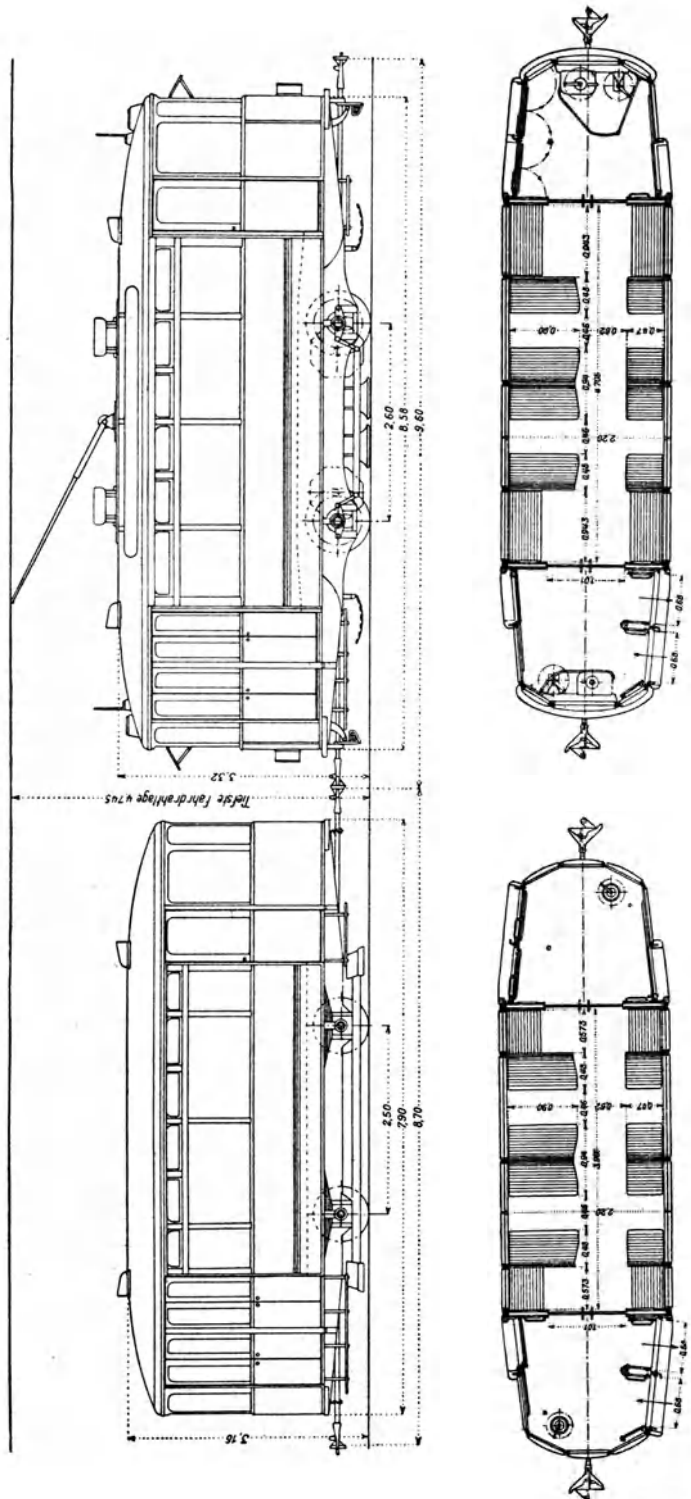


Abb. 416. Ansicht und Grundriß eines Trieb- und eines Anhängewagens der Züricher Straßenbahn, Tommendach, Quersitze.

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-

zeiten, die Regel ist. Die Amerikaner gelangten zuerst zu der Erkenntnis, daß Endbühnen wegen der unvermeidlichen Bauhöhe und wegen des verhältnismäßig langen Weges, den die Reisenden und auch der Schaffner im Wageninnern zurückzulegen haben, unzweckmäßig sind. Es wurden daher Wagen mit trogartig versenktem Mitteleinstieg gebaut. Mit Ausnahme einer einzigen Stufe von 25 bis 30 cm sind in diesen Fahrzeugen keine Treppen vorhanden, da 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 Länge 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 eine reiche Einnahmequelle darstellen, da sie die Stehplatzzahl vermehren 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. 419).

Weiter pflügt man die Wagen mit einem Ventilationsaufbau zu versehen. Die auf diese Art entstehende Querschnittsform des Kastens (Abb. 412—415) 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. 415). Diese bildet allerdings ein arges Verkehrshindernis. Einwandfrei sind nur Kasten mit Tonnendach (Abb. 413, 414, 416).

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.

Dieser Grundsatz ist zweifellos richtig, denn in der Erhaltung der Fahrzeuge ist

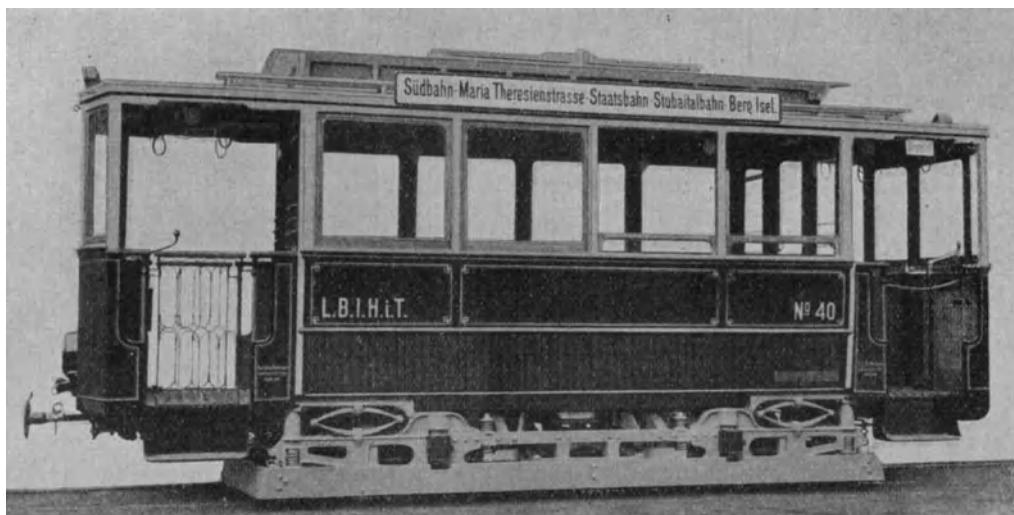


Abb. 417. Triebwagen mit besonderem Untergestell und doppelter, jedoch ungenügender Federung.

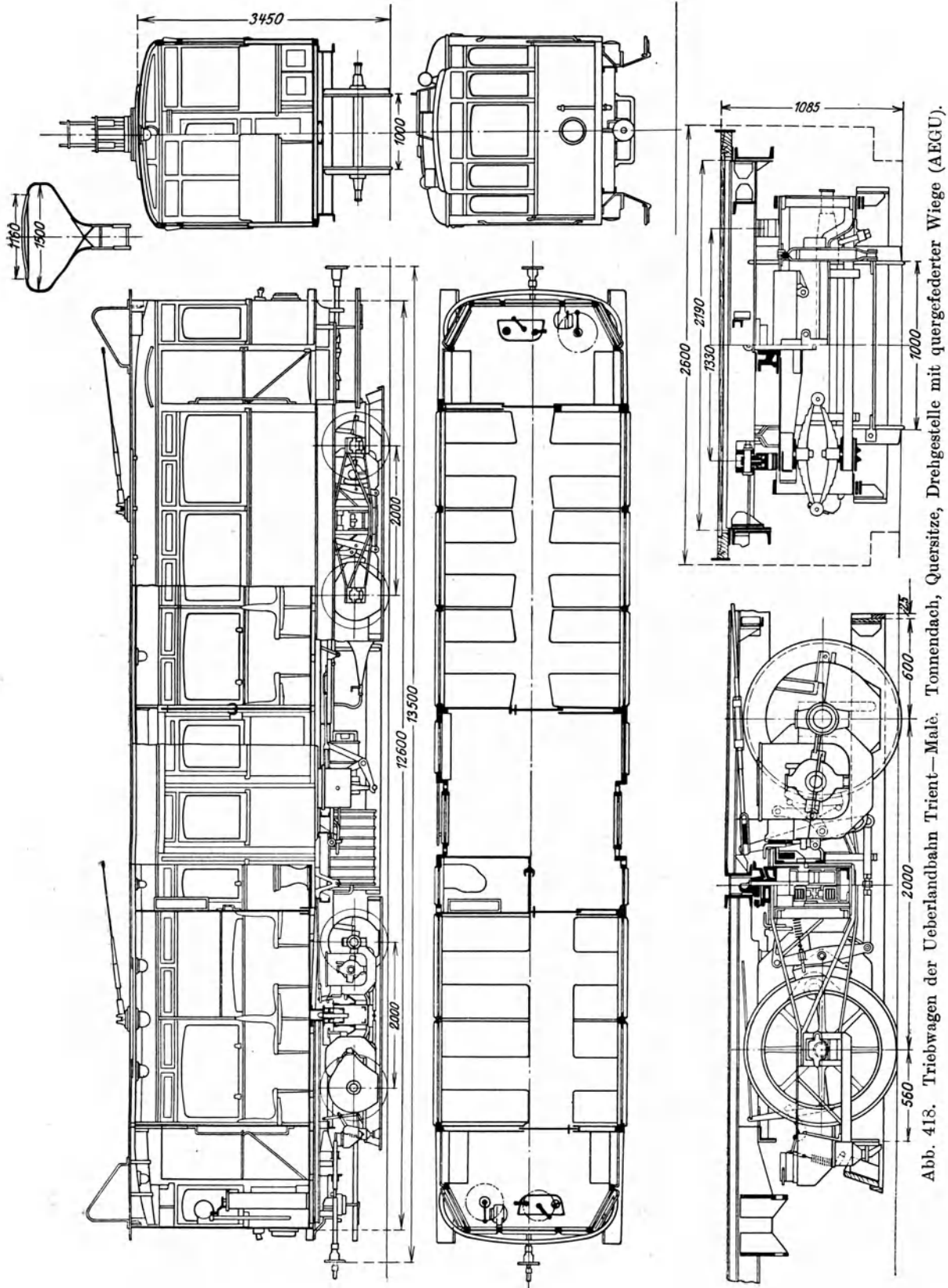


Abb. 418. Triebwagen der Ueberlandbahn Trient—Male. Tonnendach, Quersitze, Drehgestelle mit quergefederter Wiege (AEGU).

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. 417).

Von einer guten Federung muß verlangt werden, daß sie ein ausreichendes Arbeitsvermögen besitzt, weich und in ihrer Wirkungsweise auch gedämpft ist.



Abb. 419. Vierachsiger Triebwagen für die Überlandbahn M. Ostrau—Karwin. Doppelte Federung, tragfähige Fenstersäulen, Tonnendach (OSSW).

Diesen Bedingungen entsprechen nur die Blattfedern, niemals Schraubenfedern, wie sie oberhalb der Achskisten zur Abfederung der Untergestelle gebräuchlich sind.

Auf Grund dieses Mangels ruhte 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. 418, 419) unter den Kasten, andererseits ging man auf die Lenkachsenbauart (Abb. 415) der Vollbahnwagen über, die große Radstände zuläßt.

Die Drehgestellwagen ermöglichen scharfe Kurven zu befahren; sie laufen aber 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. 419).

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 axialem und radialem Spielraum in den Achsgabeln. Auf diese Weise können die Radstände etwa verdoppelt werden, wodurch es möglich wurde, dem Verkehrsbedürfnisse entsprechend große Wagen bis 10 m Länge, die ruhig liefen, zu bauen; andererseits war das ganze Gewicht abgedert bis auf den 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 jedoch aus den erwähnten Gründen nicht befriedigen.

Weiter ist die einfache Abfederung selbst unter Hinzufügung von Schraubenfedern unzureichend.

Man baut neuerdings in sachlich begründeter Weise Wagen mit getrenntem

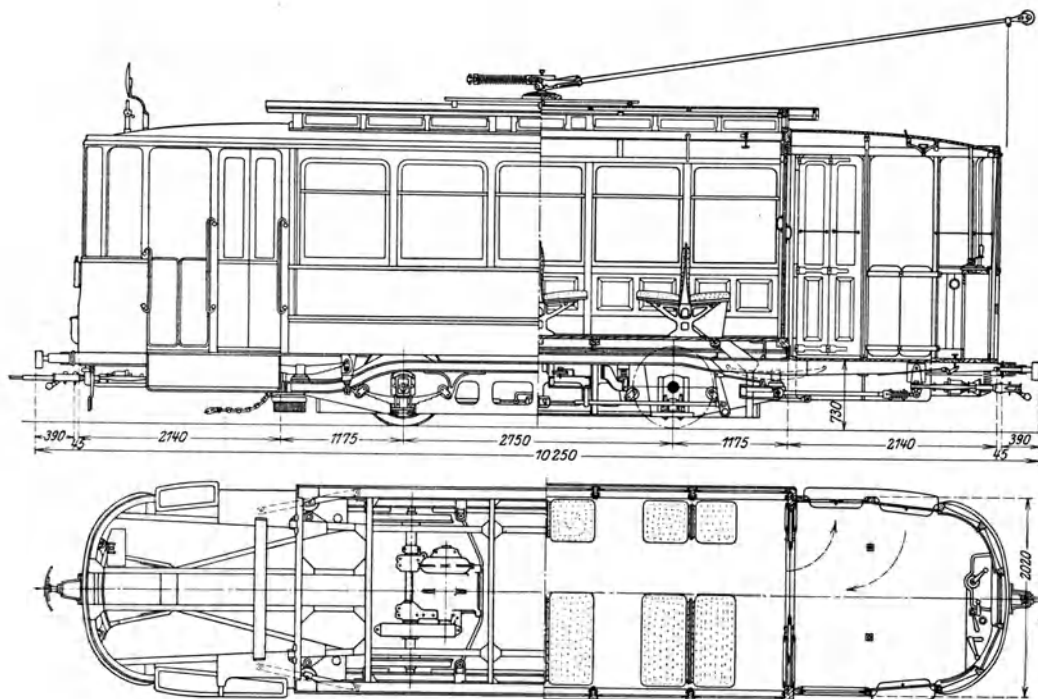


Abb. 420. Triebwagen der Straßenbahn Düsseldorf mit besonderem doppelt mit Blattfedern gefedertem Untergestell.

Untergestell, und setzt dieses unter Zwischenschaltung reichlicher Blattfedern auf die Achsen. Zwischen Wagenkasten und Untergestell befindet sich die zweite Federung (Abb. 420).

4. Wagen mit Mitteleinstieg. Die Bauart (Abb. 421) ermöglicht selbst bei der zweiachsigen Type einen versenkten Mitteleinstieg anzubringen, jedoch müssen dann die Motoren außerhalb der Achsen angeordnet werden.

Die Wagen schlingern 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 die Verlegung der Motoren nach außen unbedenklich.

5. Gewichtsangaben. 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/m, Vierachser und einachsige Drehgestelle 980 kg/m.

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.

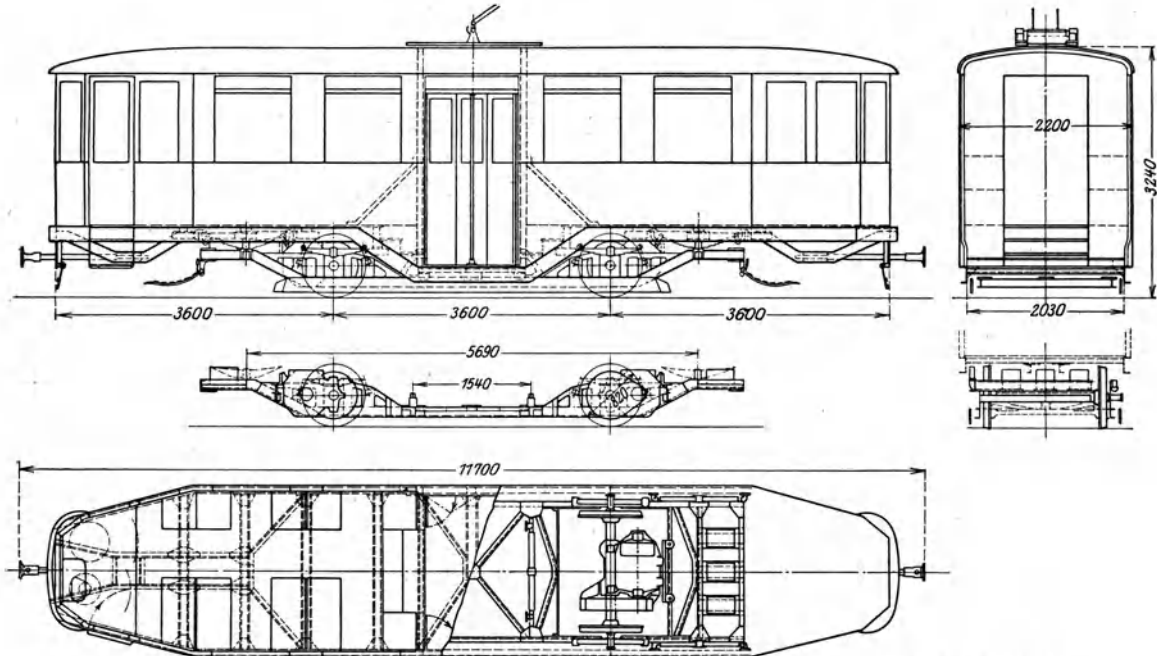


Abb. 421. Entwurf eines zweiachsigen Triebwagens mit getrenntem Untergestell, Mitteleinstieg, Tonnendach, zweckmäßige Fensterteilung (Entwurf des Verf.).

Die elektrische Bremse vermehrt wegen der erforderlichen Widerstände das Gewicht um etwa 200 bis 300 kg, sofern die Leistung der Motortype noch ausreicht.

6. Schutzvorrichtungen. Der rege Verkehr öffentlicher Straßen bringt es mit sich, daß zufallweise Personen vom Triebwagen niedergestoßen werden. Eine rasch und zuverlässig wirkende Bremse im Zusammenhang mit einer guten Sandstreu-

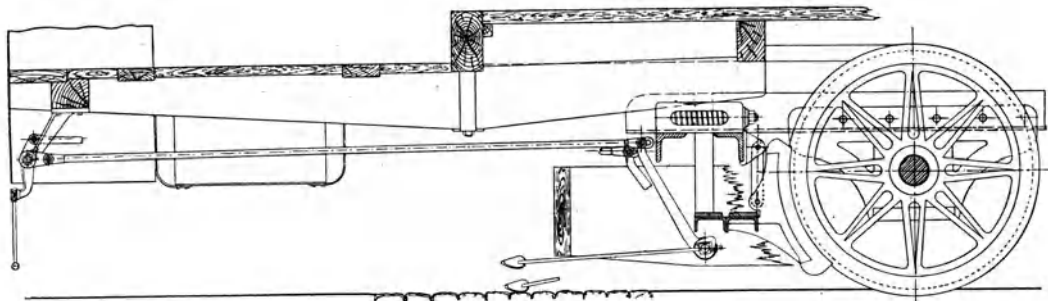


Abb. 422. Selbsttätige Schutzvorrichtung mit Tastgitter und Fangkorb.

vorrichtung sind zunächst die Voraussetzung, um derartige Gefahren zu mildern. Weiters sind Vorkehrungen nötig, um zu verhindern, daß niedergestoßene Personen unter die Räder oder die Triebmotoren gelangen. Die Lösung dieser Aufgabe war Jahre hin-

durch die Beute geldhungriger Erfinder. Nach vielen mehr oder weniger abenteuerlichen und dilettantenhaften Lösungen hat sich fast überall ein System durchgesetzt, bei welchem grundsätzlich 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 Person aufnimmt. Der Fangkorb ist möglichst nahe zu den Rädern anzuordnen (Abb. 422).

Diese Anordnung gewinnt dadurch Berechtigung, als man ein mit etwa 20 km/h in Fahrt befindliches Fahrzeug im äußersten Notfall über eine Weglänge von 12 bis 15 m zu bremsen 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 Verbände 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 pneumatischen Bremsen gegenüber.

Die besonderen Eigenheiten der ersteren sind im IV. Teil, IV. Kap. eingehend behandelt worden, hier wäre nur noch anzuführen, daß es vom Betriebsstandpunkt außerordentlich verlockend ist, über eine Bremse zu verfügen, die unabhängig von der Backenbremse ist, demnach wirklich ein zweites, von der ersteren unabhängiges Bremssystem darstellt, wobei zu diesem Zweck keine besonderen Einrichtungen vorzusehen bzw. anzuschaffen sind. 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 Triebmotoren, 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 Luftsaug- und die Luftdruckbremse.

Die erstere mag an sich, namentlich bei langen Zügen und auf Gebirgsstrecken, ihre Vorzüge 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 Fahrmotoren in derartigen Betrieben arge Beschädigungen durch Überlastungen erleiden, weil die Fahrer den Fahrstrom oft vor dem Lösen der Bremse einschalten. 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 beträchtlichen Schwankungen durch Witterung, Verunreinigungen, Nässe, 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.

In zahlreichen Betrieben, insbesondere mit andauernden Gefällstrecken, hat auch die elektromagnetische Schienenbremse, speziell die einspulige Bauart, Anwendung gefunden.

XI. Triebwagen für Stadt-(Untergrund-)Bahnen.

Ayasse: Wälzlager im schweren Schienenfahrzeugbau. VT 1922, Nr. 37.

Dietl: Die neuen AEG-Wagen der Bahn Blankenese-Ohlsdorf. EKB 1909, H. 31.

Dietl: Probewagen für die Stadt- und Vorortbahn Blankenese-Ohlsdorf. EKB 1905, H. 31.

Gerlach: Die städtische Untergrundbahn in Berlin-Schöneberg. Berlin: Ernst & S. 1911.

Gerlach: Die städtische elektrische Untergrund-Nordsüdbahn zu Berlin. ETZ 1914, H. 24.

Mattersdorf: Bau- und Betriebsanlagen der Hamburger Hochbahn. ETZ 1912, H. 23.

Meyer: Die elektrische Zugförderung auf der Vorortbahn Berlin-Groß-Lichterfelde. ZVD1 1903.

Platzmann: Die städtische Untergrundbahn in Berlin-Schöneberg. ETZ 1913, H. 10.

Rudolph: Der Probewagen für die AEG-Schnellbahn. EKB 1917, H. 3. — GA 1917, Nr. 950.

Wechmann: Gewichte von Stadtbahnzügen. GA 1908, Nr. 743.

Zehme: Die elektrischen Stadtschnellbahnen in den V. S. von N.-A. GA 1911, Nr. 824.

Elektrische Zugförderung auf Pariser Vorortbahnen. EKB 1912, H. 31. — LE Sept. 1912.

Berliner Stadt- und Ringbahn-Triebwagenzüge. ETZ 1920, H. 50.

Die neuen Wagen der elektrischen Stadtschnellbahnen in New York. ETZ 1916, H. 15. — ERJ Bd. 43, S. 1261.

Verbesserungen an den Hoch- und Untergrundbahnwagen der Stadt New York. ERJ 1921, Bd. 57, S. 1037. — ETZ 1921, H. 35.

Die neuen Wagen der Londoner Untergrundbahn. ERJ 1920, Bd. 54, S. 4. — Ref. ETZ 1920, H. 52. — The Locomotive 1921. — ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 10.

1. Grundlagen für den Entwurf. Die Bauformen der Eisenbahnfahrzeuge entsprechen im allgemeinen den jeweiligen Transportaufgaben, 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 durchschnittliche Entfernungen von mindestens 4 bis 6 km handelt. Die Benützung der Straßenbahn mit nur etwa 12 km/h Reisegeschwindigkeit wird durch die hierfür erforderliche Reisezeit zu zeitraubend, andererseits auch für das Straßenbahnunternehmen verlustbringend, weil die Tarife aus Zweckmäßigkeitsgründen nicht dem Reiseweg entsprechend abgestuft werden können; daher zahlt der öfter wechselnde Fahrgast relativ mehr.

Stadtbahnen müssen eine nennenswert höhere Fahrgeschwindigkeit aufweisen als Straßenbahnen, im allgemeinen etwa 50 km/h, um die erforderliche Reisegeschwindigkeit von 20 bis 30 km/h zu erzielen.

Diese hohe Fahrgeschwindigkeit läßt sich mit dem übrigen Straßenverkehr nicht in Einklang bringen, Stadtbahnen müssen daher mit eigenem Bahnkörper (ober- oder unterirdisch) gebaut werden.

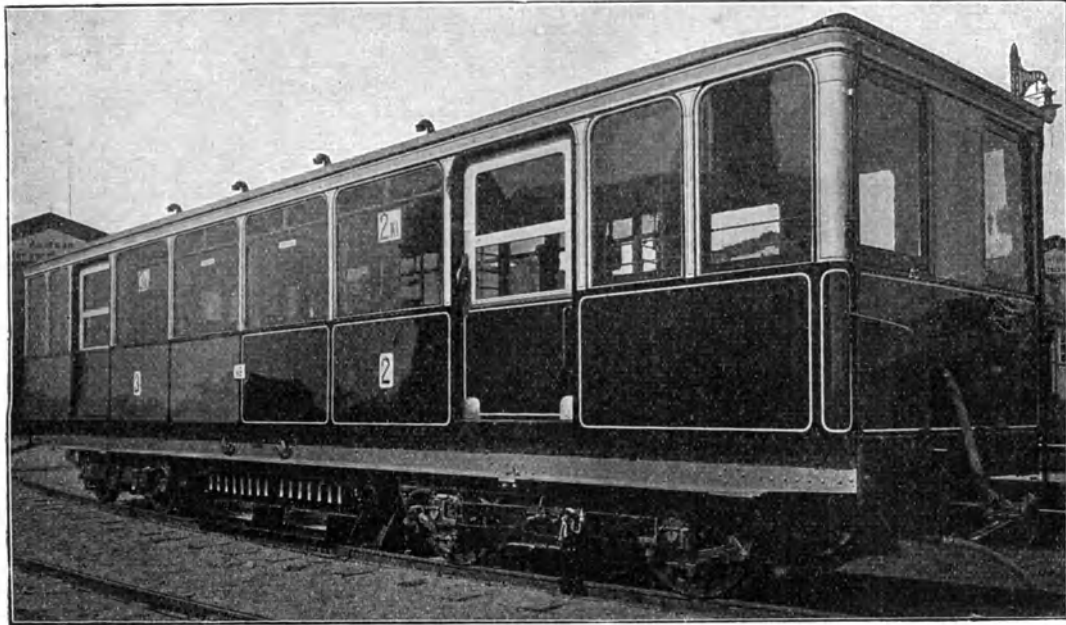


Abb. 423. Ansicht des Triebwagens der Hamburger Stadtbahn.

Die baulichen Anlagen sind sehr kostspielig, weil sie im Stadtinnern errichtet werden müssen, durchweg Kunstbauten sind und wegen Aufrechterhaltung des sonstigen Verkehrs mit beträchtlichen Erschwernissen bei der Ausführung zu rechnen ist. Diese

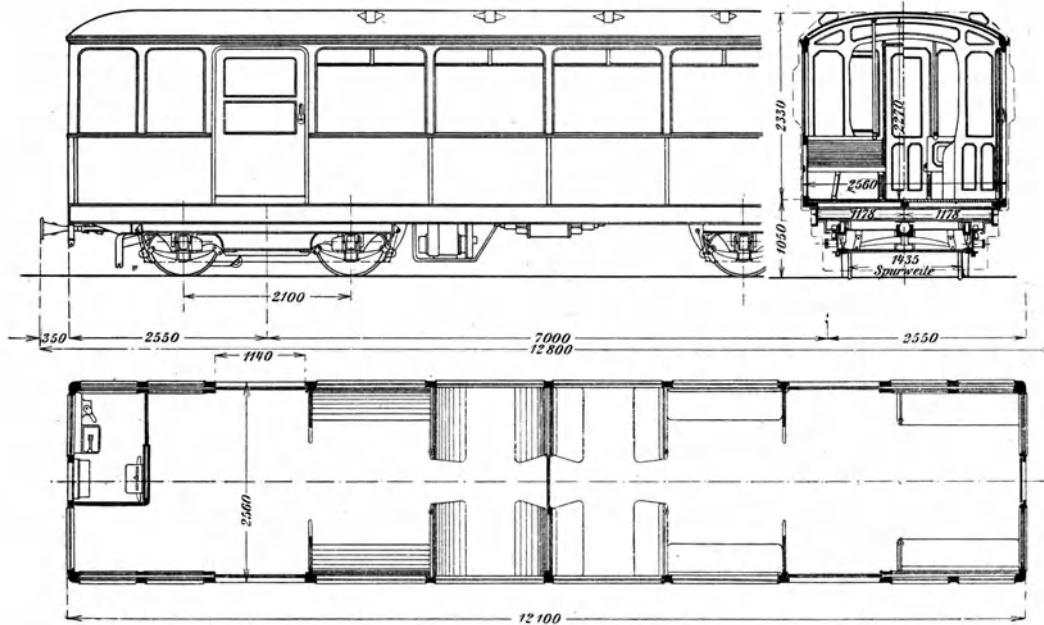


Abb. 424. Triebwagen der Hamburger Stadtbahn.

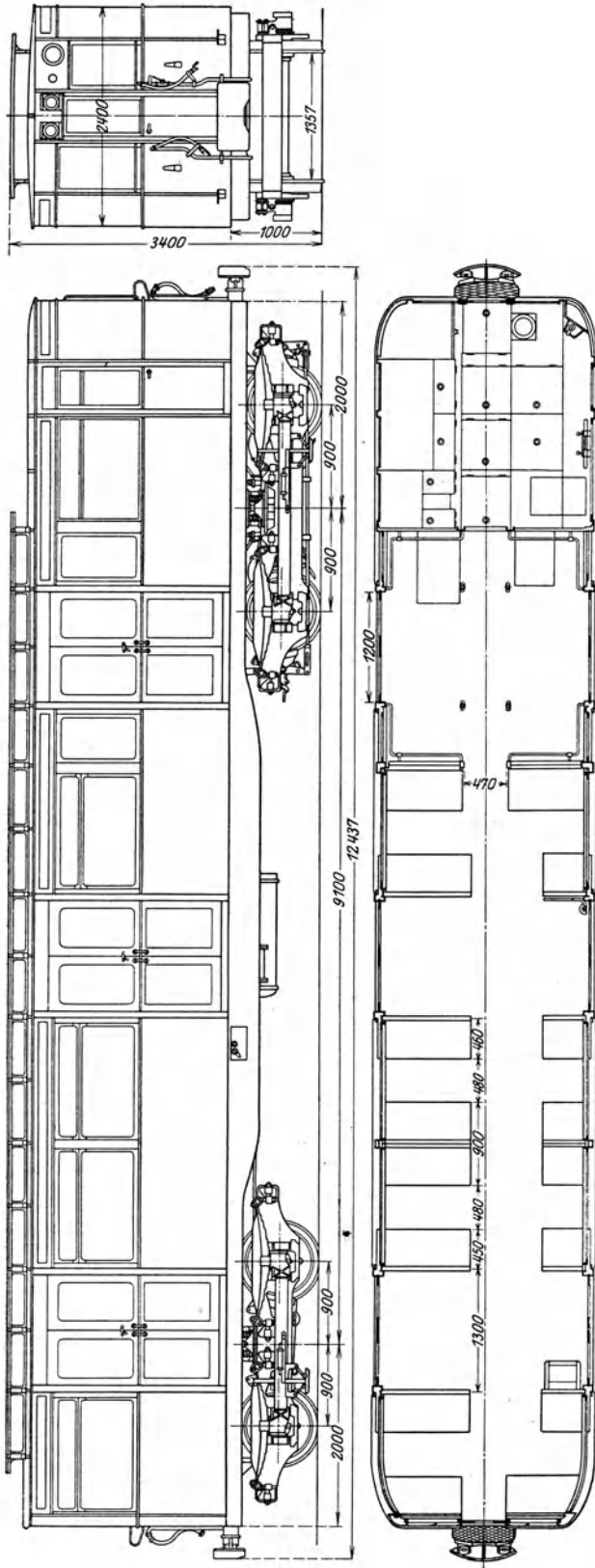


Abb. 425. Triebwagen der Pariser Metropolitan - Bahn.

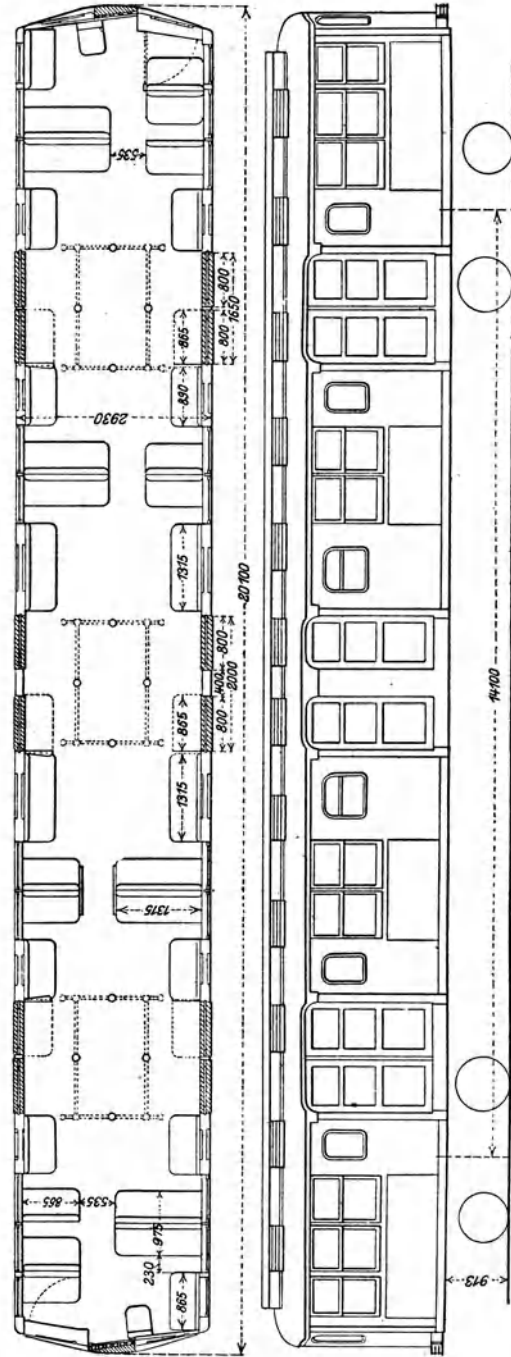


Abb. 426. Triebwagen, Reihe 1916 der elektrischen Stadt-Schnellbahnen in New York. Anordnung der Türen und Sitze.

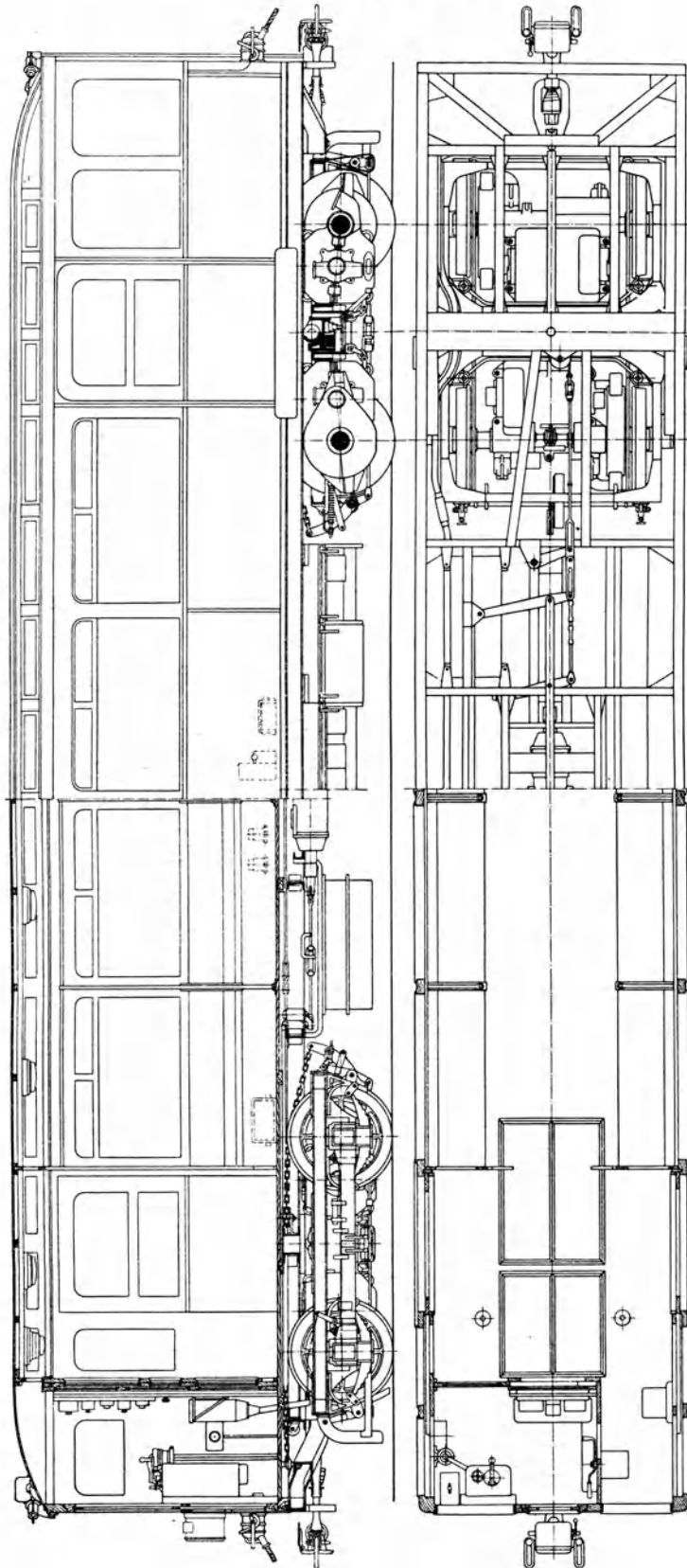


Abb. 427. Triebwagen der Schöneberger Untergrundbahn (Berlin).

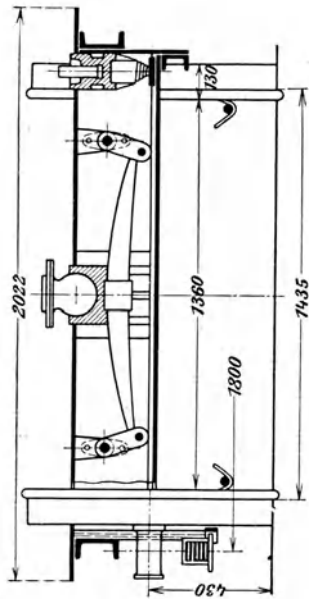
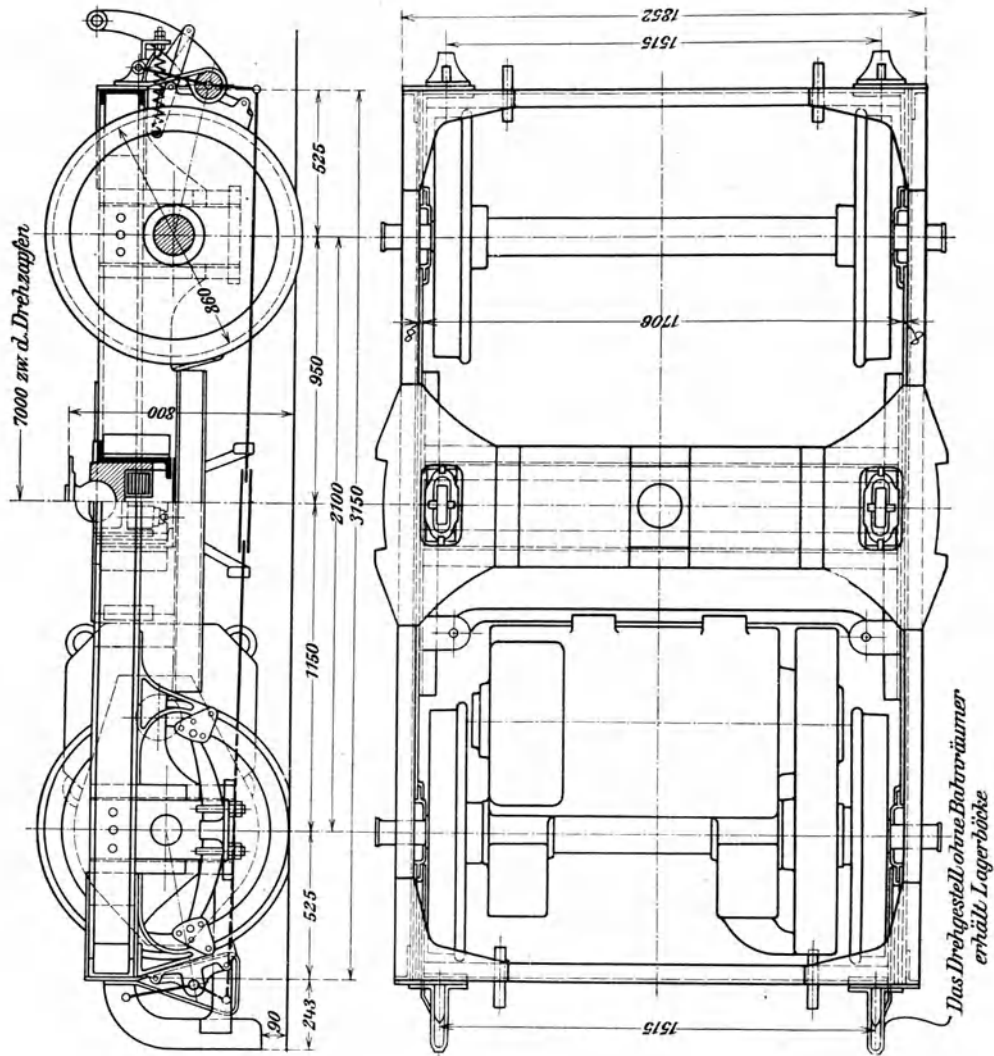


Abb. 428. Drehgestell der Triebwagen der Hamburger Stadtbahn mit eingebautem Motor.



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; daher ist alles daran zu setzen, um sie zu verringern.

Ausschlaggebend hierfür ist die Kubatur bzw. der Querschnitt des Bahnkörpers. Der Querschnitt wird bestimmt durch das Umgrenzungsprofil der Wagen. Hieraus folgt, welche Bedeutung der richtigen Formgebung der Fahrzeuge zukommt. Die Triebfahrzeuge müssen namhafte Leistungen entwickeln können, um die verlangte Reisegeschwindigkeit von 20 bis 30 km/h bei etwa 50 km/h Höchstgeschwindigkeit und verhältnismäßig kurzen Haltestellenentfernungen — 500 bis 1000 m — zu erzielen.

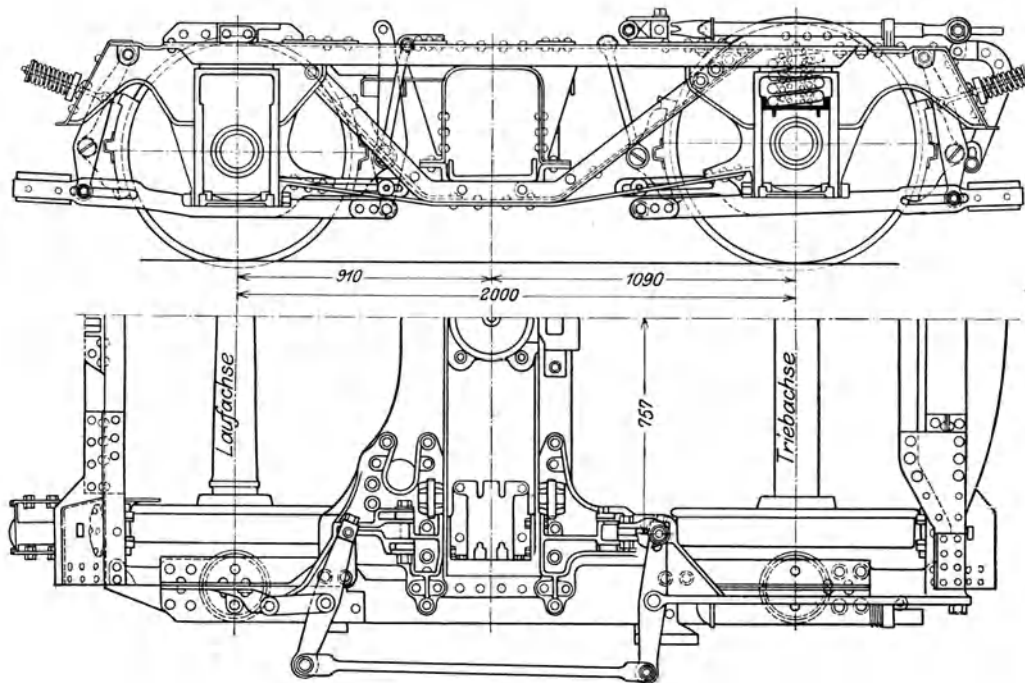


Abb. 429. Drehgestell der Triebwagen, Reihe 1916, der elektrischen Stadt-Schnellbahnen in New York.

Andererseits verringern die vergleichsweise zahlreichen Haltestellen und die für den Wechsel der Reisenden nötigen Haltezeiten die Reisegeschwindigkeit. Es müssen daher alle Vorkehrungen getroffen werden, um rasches 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. 423 bis 427, 431, 432).

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 — 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 50 m Halbmesser kommen vor. Die Fahrzeuge für Stadtbahnen erhalten daher ohne Ausnahme Drehgestelle (Abb. 428 bis 430).

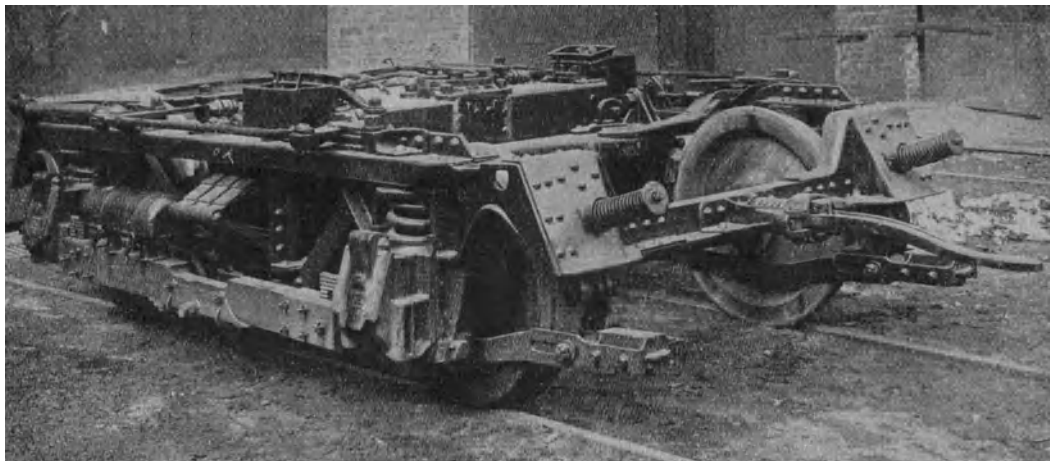


Abb. 430. Ansicht eines Drehgestelles der Triebwagen Abb. 430.

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. Nichtsdestoweniger pflegt man einen schwereren Oberbau zu wählen, als diesem Achsdruck entsprechen würde, um trotz der dichten Zugfolge und hohen Triebkräfte mit möglichst langer Lebensdauer und geringen Erhaltungskosten rechnen zu können.

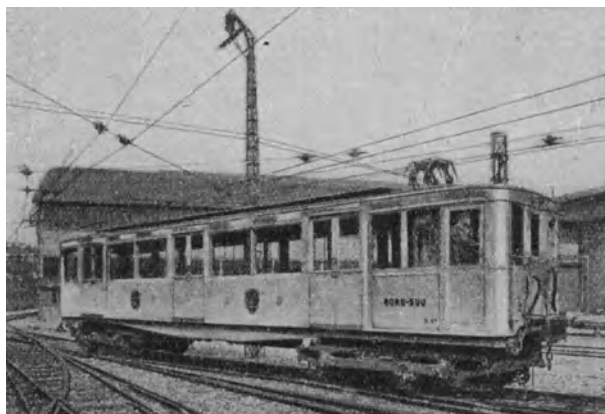


Abb. 431. Triebwagen (vierachsig) der Pariser Nord-Süd-Untergrundbahn.

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 m/sek² 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 wird.

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 anzuordnen 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 einfachen und unschädlichen Mitteln erreichen, daß die Triebachsen mehr belastet werden als die Laufachsen. Rüstet man dagegen je ein Gestell mit je einem Motor aus, so ist dies nur

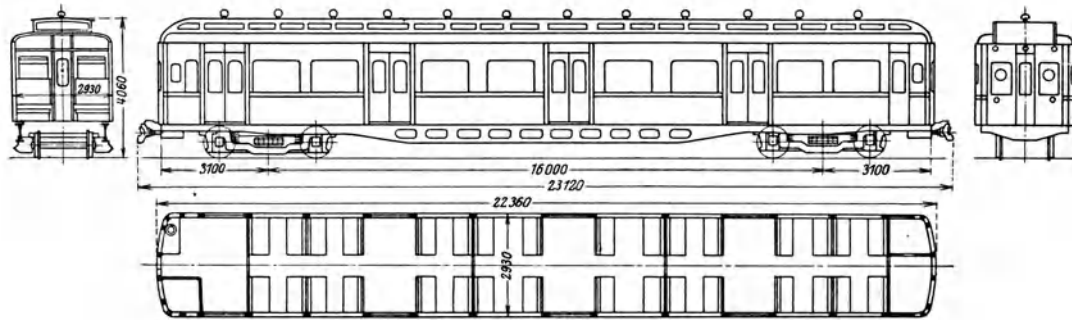


Abb. 432. Triebwagen der Franz. Staatsbahn für den Pariser Vororte-Verkehr. (Die Wagen sind mit zwei dreiachsigen statt zweiachsigen Drehgestellen ausgeführt.)

in geringerem Maß und nur durch 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.

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 Belastung)	4,0 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 Hauptmaße der in Aussicht genommenen Fahrzeuge bestimmt werden. Hierauf sind die Fahrlinien auszuarbeiten, um die Gegenprobe darauf zu machen, daß der gewählte Motor tatsächlich ausreicht bzw. nicht übermäßig stark ist.

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 Laufkreisdurchmesser 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. 437, 438).

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 bis zur Erreichung der Tür im Mittel 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.

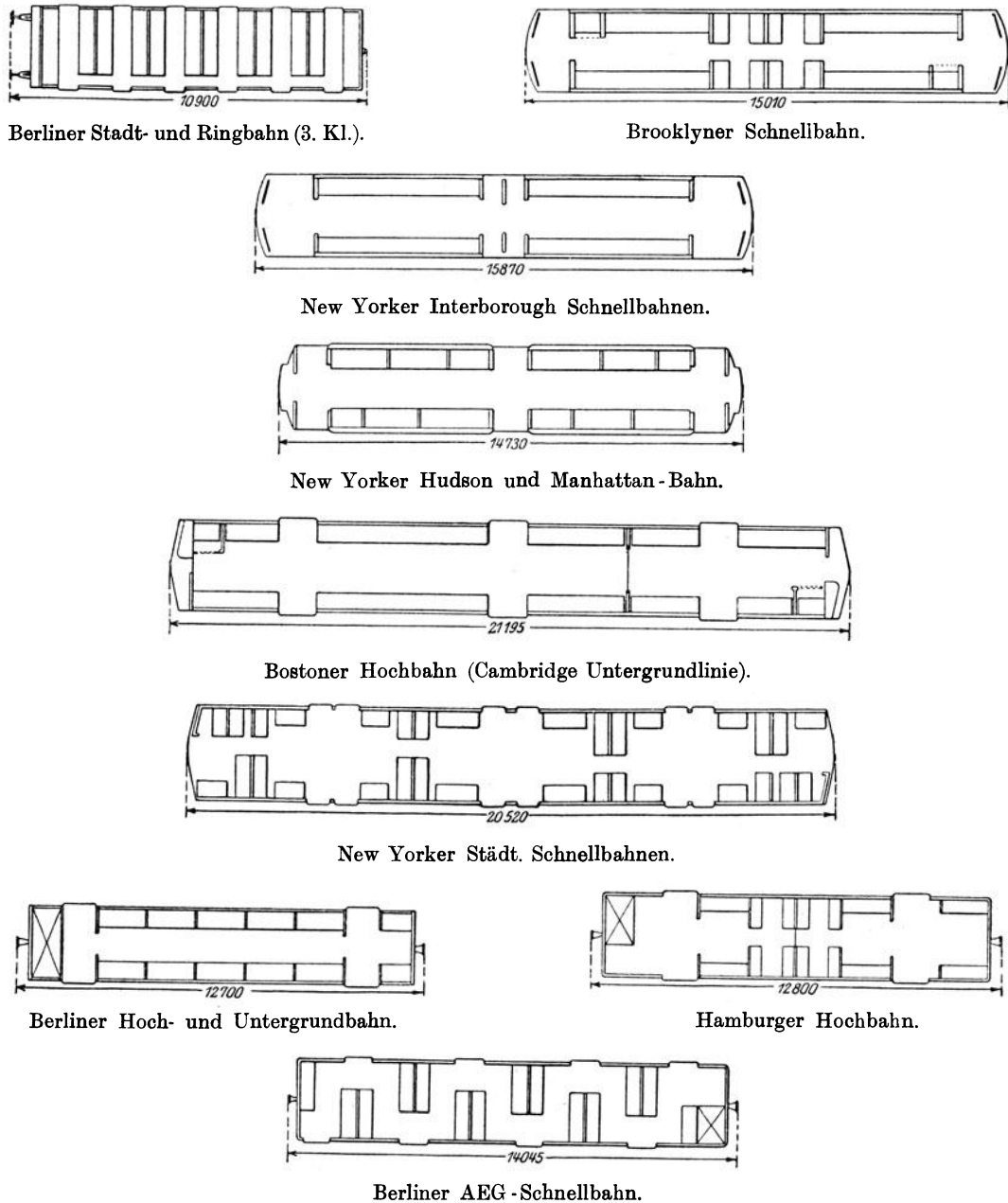


Abb. 433. Grundrisse, Sitz- und Türanordnungen von Stadtbahnwagen.

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.

Die niedrigste Zahl weist die Berliner Stadtbahn mit 16 Personen je Tür auf; allerdings verliert man durch das Schließen der zahlreichen Türen Zeit.

Bei der AEG-Schnellbahn in Berlin entfallen 36,25, bei der Nord-Südbahn 25,2 Fahrgäste auf eine Tür, wobei 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 höchstens 3,6 m.

3. Stromzuführung. Elektrische Ausrüstung. Das gleiche Moment ist auch mitbestimmend für die Anordnung der Arbeitsleitung und der Stromabnahme. Mit Ausnahme der Budapester Untergrundbahn wendet man ausschließlich Gleichstrom bis 800 V mit Zuführung durch Stromschiene an, weil diese die erforderlichen großen Querschnitte ohne Vergrößerung des Tunnelprofils unterzubringen gestattet.

Jede Oberleitung braucht zur Anordnung eine Bauhöhe 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.

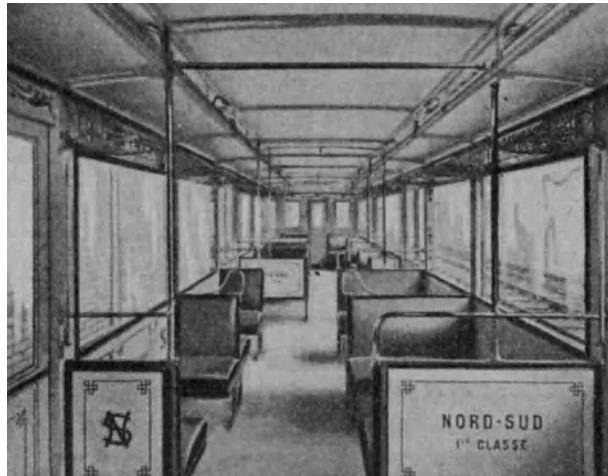


Abb. 434. Innenansicht und Sitzordnung eines Wagens der Pariser Nord-Süd-Untergrundbahn.

Angaben von Stadtbahnmotorwagen.

Anlage	Wagen-		Bodenfläche qm	Fassungs- raum		Gewicht t			Leistung		Treibgewicht in % des Zuggewichtes bei voller Besetzung
	länge m	breite m		Per- sonen max	je qm	leert	besetzt	je m Länge (leert)	je Zug PS (insgesamt)	je t (volle Besetzung)	
Berlin, Hoch- und Untergrundbahn, 1 MW + 1 AW	12,7	2,36	29,2	100	3,59	18,0	25,0	1,42	4 × 75 = 300	6,3	53,0
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
Berlin-Schöneberg	12,8	2,36	30,2	100	3,32	20,0	27,0	1,56	2 × 80 = 160	6,0	57,0
Boston-Cambridge, MW	21,5	2,62	56,5	266	4,70	39,0	56,0	1,81	2 × 200 = 400	7,2	55,6
Brooklyn Rapid Transit, 3 MW + 2 AW Buenos-Aires	15,0	2,62	39,2	154	4,00	32,5	44,3	2,16	6 × 200 = 1200	6,8	41,6
Hamburger Stadtbahn	16,0	—	—	—	—	30,0	—	—	2 × 115 = 230	—	—
Hudson-Manhattan Rd., MW	12,8	2,56	32,8	100	3,30	24,0	31,0	1,87	2 × 100 = 200	6,45	57,0
Interborough Rapid Transit, New York, 3 MW + 2 AW	14,8	2,49	37,0	158	4,30	33,6	43,7	2,27	2 × 160 = 320	7,4	54,9
London & South Western, 2 MW + 1 AW London & North Western Ry, 2 MW + 1 AW	16,2	2,60	41,6	169	4,07	35,2	46,0	2,20	6 × 200 = 1200	5,8	38,3
Long-Island, 3 MW + 2 AW	16,1	2,45	39,5	170	4,3	36,6	48,0	3,00	4 × 275 = 1100	8,3	—
Long-Island-Suburban, MW	18,3	2,75	—	170	—	112,0	124,0	—	4 × 250 = 1000	8,1	44,0
Melbourne, 3 MW + 2 AW	15,7	—	—	154	—	36,0	46,0	2,30	2 × 200 = 400	6,3	42,2
New Yorker Stadtbahn (reiner Motor- wagenbetrieb)	19,6	—	—	186	—	47,5	59,3	2,42	2 × 235 = 470	7,0	56,4
Paris-Metropolitain, 2 MW + 3 AW	—	—	—	—	—	48,0	60,7	—	12 × 140 = 1680	6,5	67,5
Paris-Nord-Süd, 2 MW + 3 AW	20,4	2,76	53,5	270	5,00	38,6	55,8	1,89	2 × 140 = 280	5,0	49,9
Paris, Vorortlinien	20,4	2,93	60,0	270	4,50	38,3	55,3	1,88	2 × 160 = 320	5,8	57,0
Philadelphia, MW	13,4	2,40	32,3	—	—	28,5	37,0	2,12	4 × 150 = 600	4,1	39,0
	14,4	2,40	34,6	—	—	32,5	41,0	2,24	8 × 125 = 1000	6,6	50,0
	23,1	2,93	68,0	104	—	—	80,0	—	4 × 160 = 640	8,0	—
	15,4	2,67	41,0	170	4,0	36,0	47,0	2,34	2 × 125 = 250	7,0	50,0

Bemerkung: MW = Motorwagen; AW = Anhängewagen; Gewicht je Fahrgast in Amerika mit 63,5 kg, in Europa mit 70,0 kg gerechnet.

Daß eine durchgehende Druckluftbremse für die Betriebssicherheit unerläßlich ist, bedarf keines besonderen Nachweises.

Als besondere Eigentümlichkeit der Stadtbahnen ist die starke Erhitzung der Bremsklötze und Radreifen und die hierdurch verursachte 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 doch die allgemeine Einführung an der Umständlichkeit der Schaltung.

XII. Industrielokomotiven.

Bright: The modern electric mine locomotive. Proc. 1915.

Bütow und Dobbelstein: Vergleichende Untersuchungen an Grubenlokomotiven. Glückauf 1912.

Eaton: The development of the electric mine locomotive. Proc. 1914.

Gunderloch: Neuerungen an elektrischen Grubenlokomotiven. Glückauf 1922, Bd. 58, S. 616. — Ref. ETZ 1922, H. 41.

Heldé: Perfectionnements récents dans les locomotives électriques à voie étroite. RGE 1923, Bd. 13, Nr. 7.

Krug: Maintenance of trolley-type mine locomotive. EW 1921, Bd. 78, Nr. 19.

Listen: Eine neue Bauart von Grubenlokomotiven. GER 1920, Nr. 5. — Ref. E u.M 1921, H. 7.

Grubenlokomotiven. GER 1915, Nr. 4.

High power electric locomotives for narrow gauge goods trains. El. 1919, S. 225.

Les mérites respectifs des différentes locomotives de mines. EW 1922, Bd. 80, S. 703.

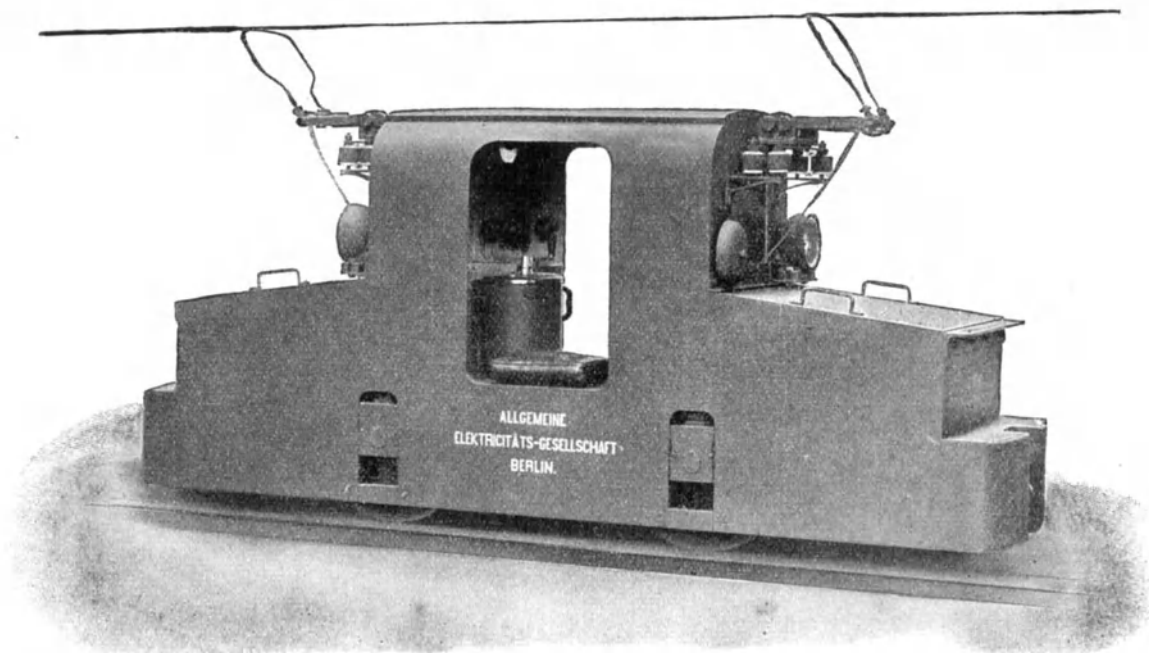


Abb. 435. Grubenlokomotive, Achsfolge 2 A, mittlerer, versenkter Führerstand, Motoren außenliegend.

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.

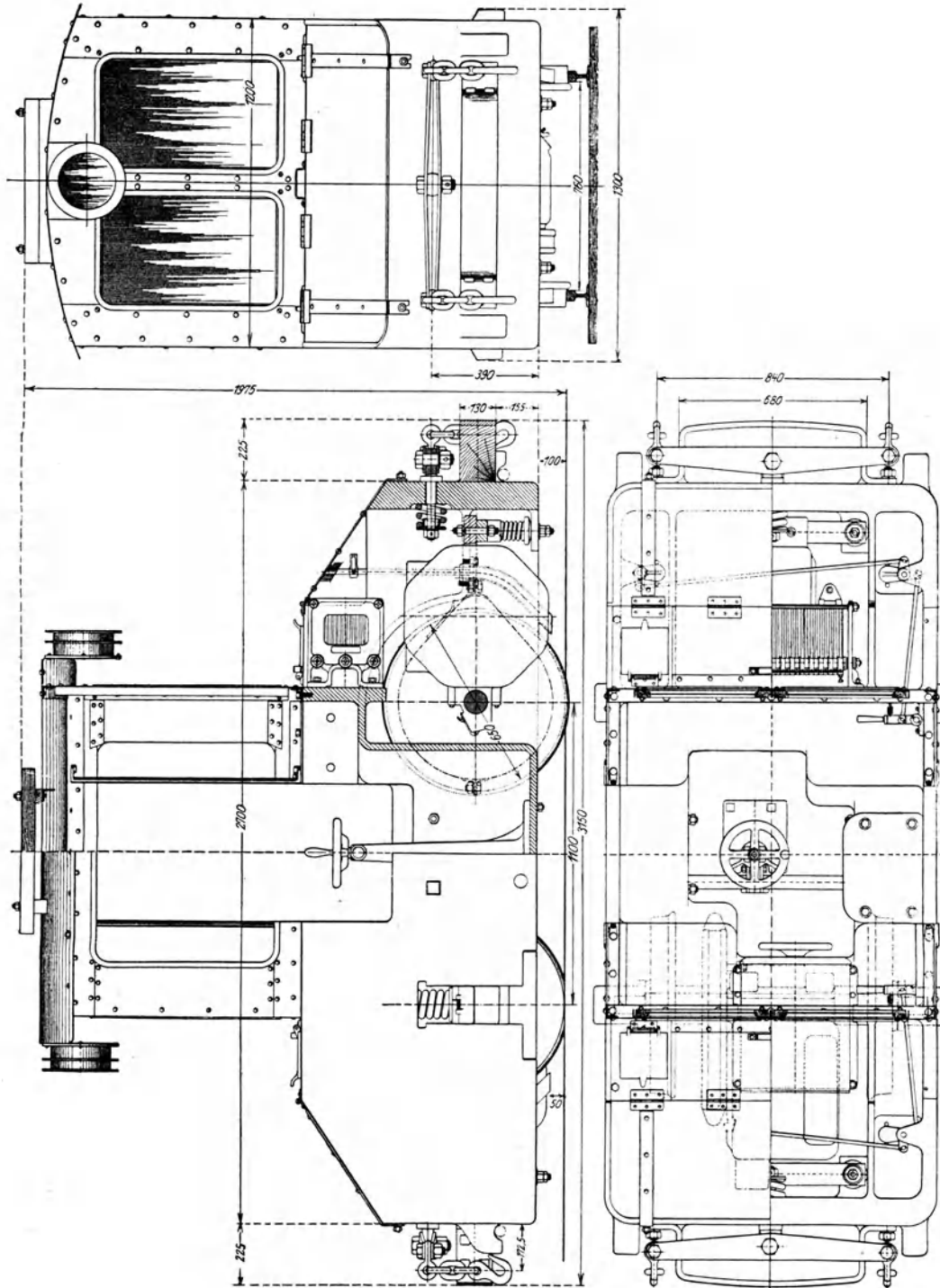


Abb. 436. Industriebahn-Tageslokomotive mit kurzem Achsstand, Motoren außenliegend, Führerstand versenkt (TH).

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.

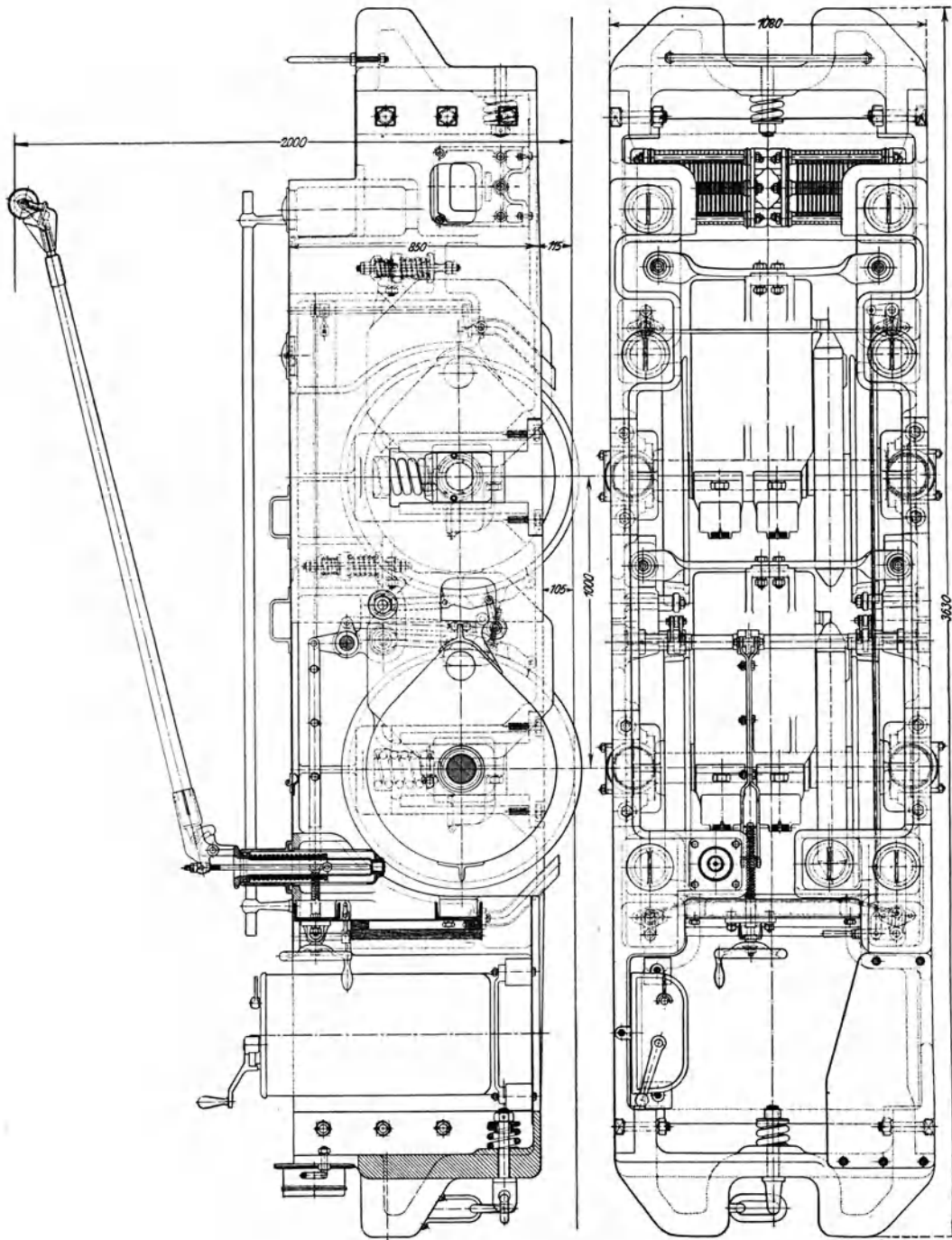


Abb. 437. Grubenlokomotive mit hintereinander angeordneten Motoren, offener Führersitz.

Für Industrielokomotiven sind als besondere Anforderungen kennzeichnend:

- schmale Spur, herab bis zu 480 mm,
- scharfe Krümmungen . . . $R > 5$,
- kleine Leistungen 5—100 PS,
- kleine Achsdrücke 1—4 t,
- Geschwindigkeiten < 15 km/h.

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.

Der durch den vorhandenen Oberbau bestimmte Achsdruck begrenzt die Leistung und Zugkraft, die eine Achse entwickeln kann, woraus sich die Achszahl des Fahrzeuges ergibt.

Hiezu bedient man sich zweckmäßigerweise Projektsbehelfen (Abb. 146, 147), denen diese Werte für die üblichen Achsdrücke bereits ausgerechnet zu entnehmen sind.

Dem Lageplan entnimmt man die vorkommenden Krümmungshalbmesser, aus welchen unter Berücksichtigung des durch die Triebmaschine gegebenen Raddurchmessers der anzuwendende Radstand berechnet werden kann.

Für Bahnen öffentlichen Charakters enthalten die TV diesbezüglich Vorschriften.

Die Amerikaner stellen als Regel auf, daß die schärfste Krümmung einen Halbmesser haben soll, der mindestens das 5- bis 6fache des Achsstandes beträgt.

Bei Lokomotiven, die für Untertag-(Stollen-)betrieb bestimmt sind, unterliegt die Höhe und Breite einer besonderen Einschränkung. Typen mit nur 800 mm Höhe sind auch schon gebaut worden.

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.

Wenn man sich des weiteren noch vor Augen hält, welche Bestandteile auf der Lokomotive unterzubringen sind, so kann die Bauform organisch entwickelt werden.

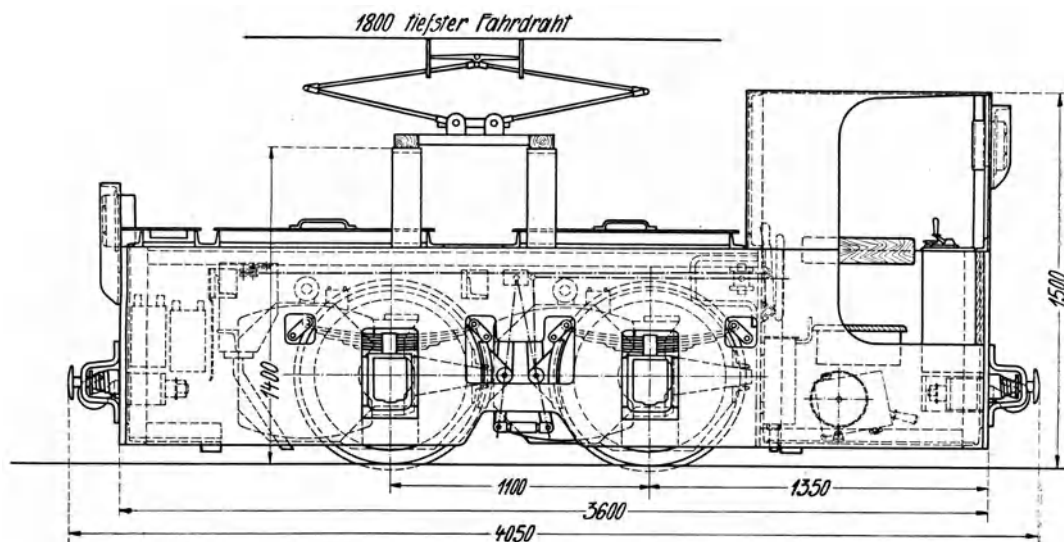


Abb. 438. Grubenlokomotive mit gedecktem Führersitz, Blattfedern, Motoren hintereinander.

Im Hinblick auf den wirtschaftlich bedeutenden Umstand, daß die Lokomotive den vorhandenen, meist sehr leichten Oberbau nicht mehr oder nicht nennenswert mehr beanspruchen soll als die geschleppten Fahrzeuge, ist im Gegensatz zu älteren primitiven Bauarten der guten Lagerung der Achsen und der sorgfältigen Federung des Gestelles besonderes Augenmerk zu widmen. Blattfedern sind anderen Formen wegen ihrer guten Dämpfung vorzuziehen; wenn es möglich ist, die Anordnungen so zu treffen, daß die springende Achse das Gewicht der Feder selbst nicht anhebt, so ist die durch diesen Kniff erzielte Verminderung der ungefederten Achslast vorteilhaft.

Die elektrische Ausrüstung besteht für die kleinsten üblichen Fahrzeuge aus zwei Motoren, 1 Stromabnehmer, 1 Satz Vorschaltwiderstände, 1 Fahrschalter.

2. Zweimotorige Ausrüstung. Mindestens zwei Motoren nimmt man fast ausnahmslos, weil man auf die Reihenschaltung nicht gerne verzichtet und zur vollen Ausnützung 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 ausgenützt. 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 mit ganz kleinen Geschwindigkeiten ungefedert oder nur mit Spiralfedern auf den Achsen gelagert wird. Blattfedern sind jedoch entschieden vorzuziehen.

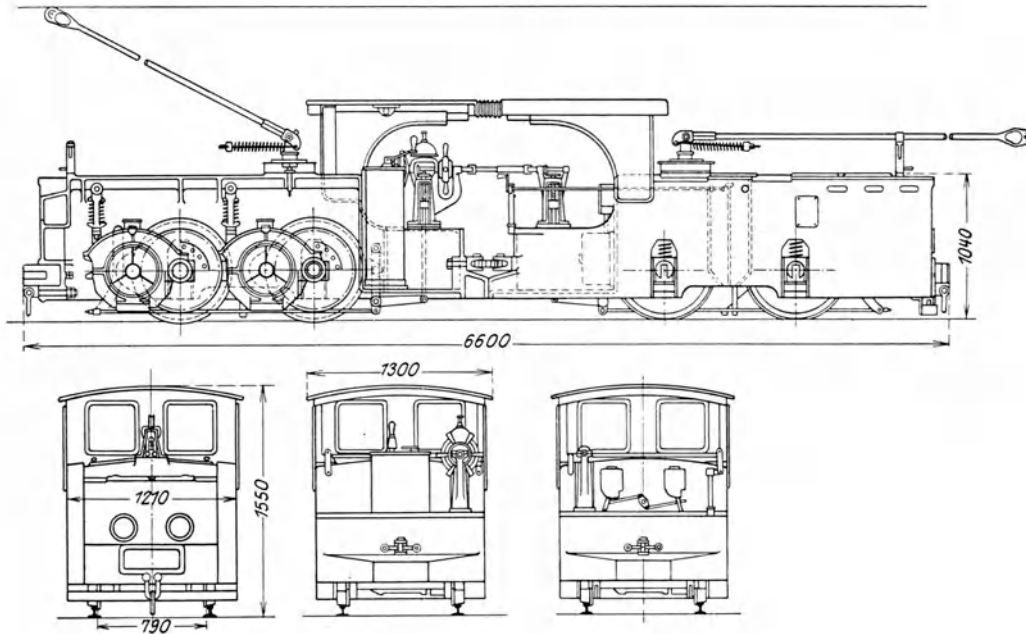


Abb. 439. Doppel-Lokomotive für Stollenbetrieb. Motore hintereinander, Steuerung und Bremsung von einem Führersitz (Ganz).

Diese Anordnung führt zu der für elektrische Lokomotiven verbreiteten Bügel-eisenform (Abb. 435, 436). Einen Nachteil bildet die geringe Stabilität, demzufolge der unruhige Gang dieser Bauart, weil die schweren Motormassen außerhalb der Achsen liegen und so das Trägheitsmoment um die lotrechte und die wagerechte Querachse unnötig vergrößern.

4. Hintereinander-(Tandem-)Anordnung. Dieser Übelstand wird bei einer Hintereinander-(Tandem-)Anordnung der Motoren (Abb. 437, 438, 439) 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. 440 bis 443).

Der Rahmen wird bei gangbaren Typen aus Stahlguß hergestellt, sonst aus Formeisen und Blechen zusammengenietet.

6. Drehgestellokomotiven. Genügen zwei Achsen nicht, so 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 Drehgestell-



Abb. 440. Obertag-Lokomotive für eine Industriebahn. Achsfolge 2 A. 2 Motoren innenliegend (AEGU).

Gewicht 5,5 t. Leistung 2×17 PS/h. Geschw. 12 km/h. Spurweite 700 mm.

bauart ausgeführt. Da kleine Motoren unwirtschaftlich sind und ihre Instandhaltung auch schwieriger ist, als die der halben Anzahl doppelt so starker Einheiten, so ist eine gute Lösung, die beiden Achsen jedes Drehgestelles durch Stangen 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. Sie ermöglicht ferner die Drehgestelle bei kleinen Radständen mit guter Lauffähigkeit zu bauen, wobei auch der Rahmen mit geraden Trägern ausführbar bleibt (Abb. 444).

7. Verschublokomotiven. Bei Gleichstromlokomotiven für Verschub- und Schleppdienst, welche die Geleiseanlagen öffentlicher Bahnen mitbenützen oder für welche die gleichen Verhältnisse bestehen, behält die Bügeleisenform mit einer Kabine in der Mitte ihre volle Berechtigung; es kommen eben nur Untergestellmotoren in Betracht,

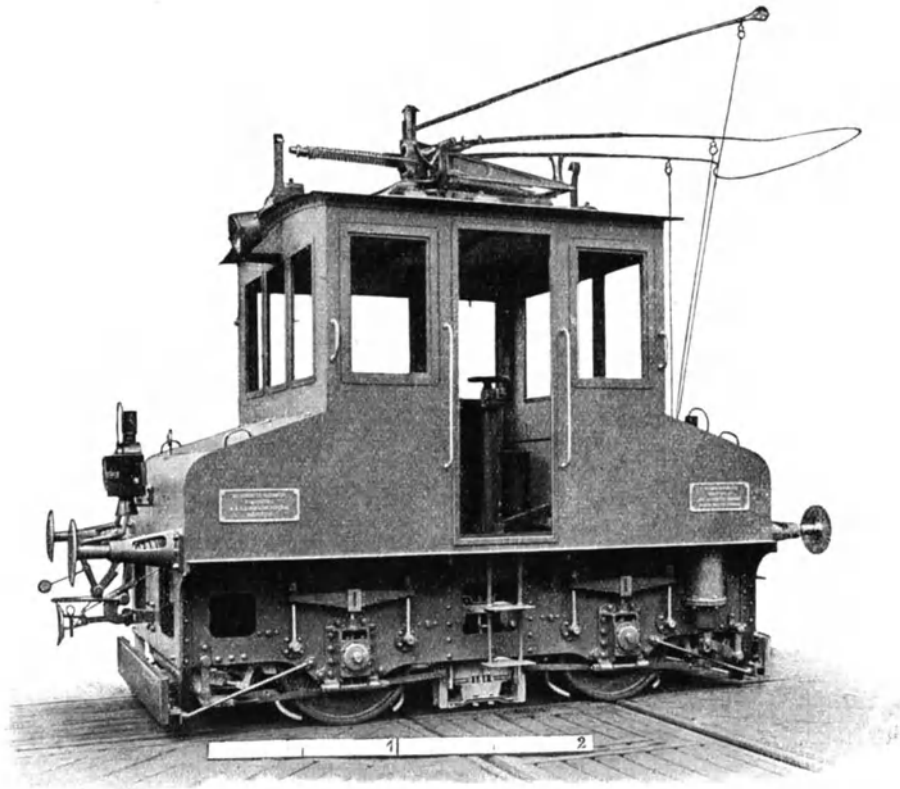


Abb. 441. Regelspurige Verschublokomotive mit zweierlei Zug- und Stoßvorrichtung und dreierlei Stromabnehmer. Leistung 80 PS, Gewicht 10 t (AEGU).

so daß auf der Plattform nur noch die Widerstände, Bremseinrichtungen, eventuell der erforderliche Ballast unterzubringen sind, wozu die niedrigen Vorbauten, die den freien Ausblick des Führers nicht behindern, vollständig ausreichen (Abb. 441 bis 445).

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, wenigstens auf der einen Seite, möglich sein. Für Maschinen dieser Art, die in beiden Richtungen gleichen Dienst tun, ist eine doppelte Steuereinrichtung vorzusehen.

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 die gleichen Grundsätze auch für Vollbahnlokomotiven (Abb. 446).

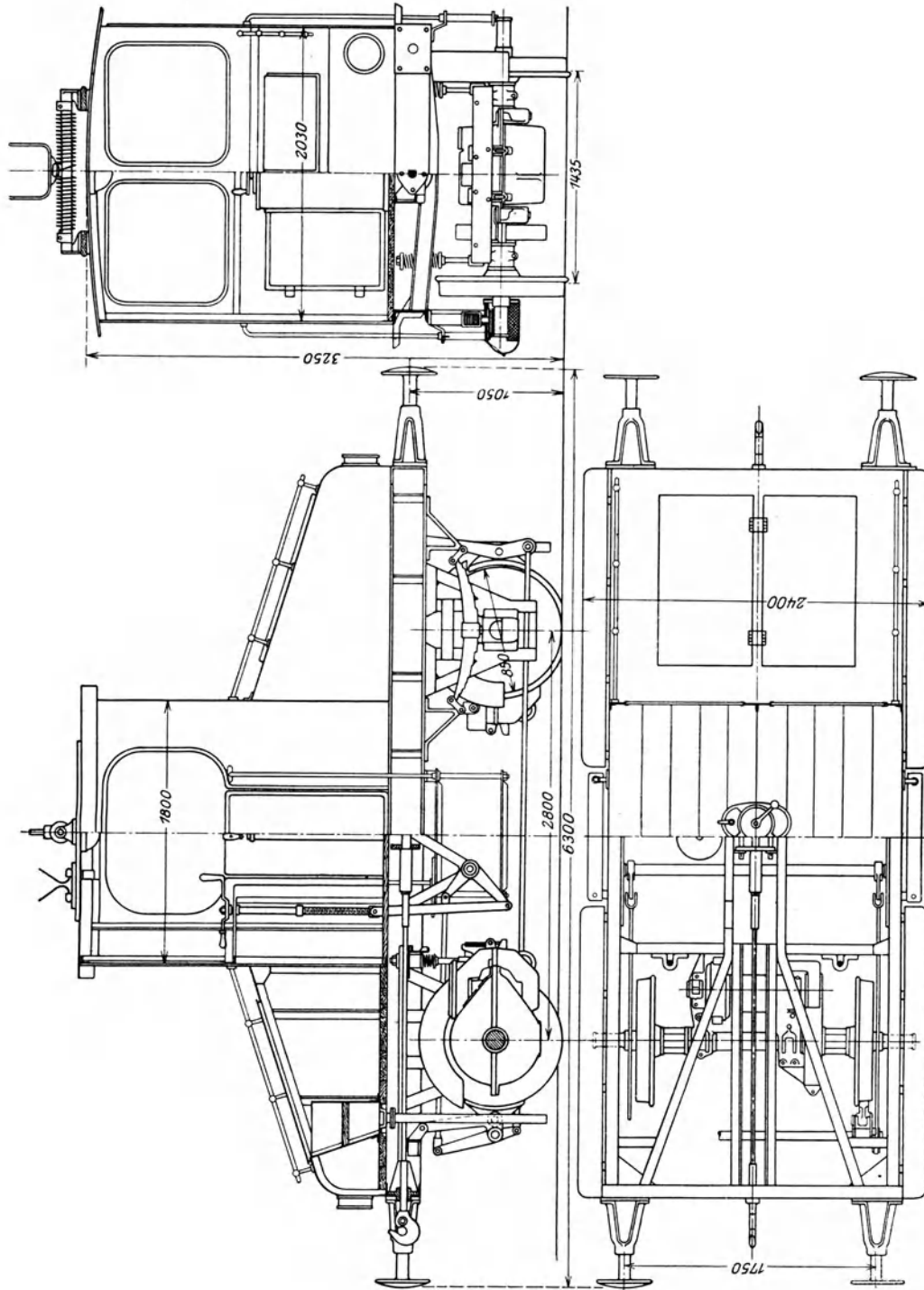


Abb. 442. Regelspurige Verschlusslokomotive mit seitlich offenem Führerstand (SSW).

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, so ist die Vorrichtung zu ihrer Be-

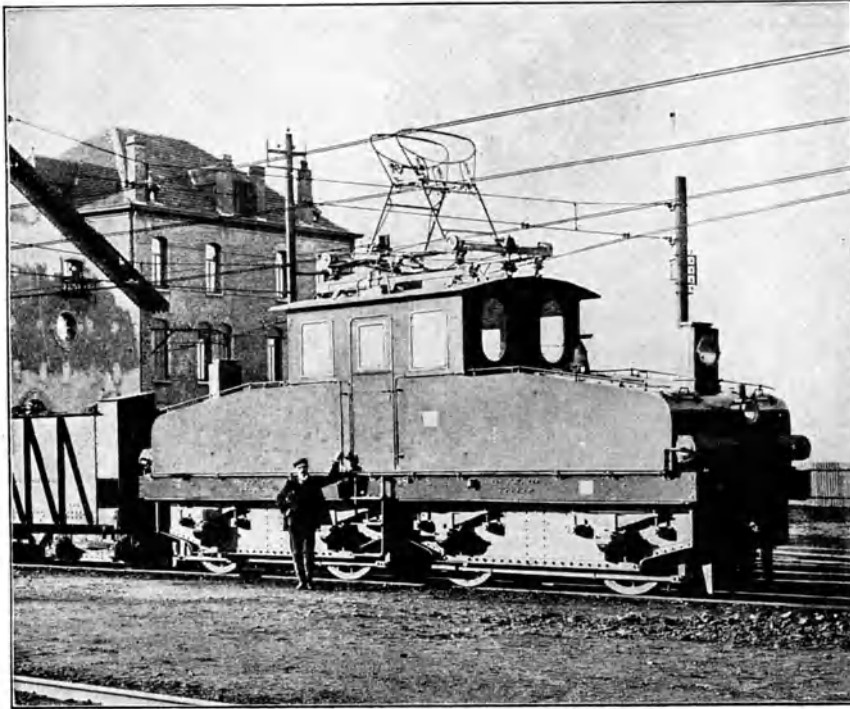


Abb. 443. Industriebahn-Lokomotive mit Drehstellen (SSW).

Anlage: Moselhütte—Maizieres (1908) Spurweite 1 m. Gewicht 5,5 t. Raddurchmesser 1250 mm. Achsfolge A A + A A.
Leistung $4 \times 160 = 640$ PS. Stromart GS; 2000 V. Zugkraft 8000 kg. Geschwindigkeit 22 km/h.

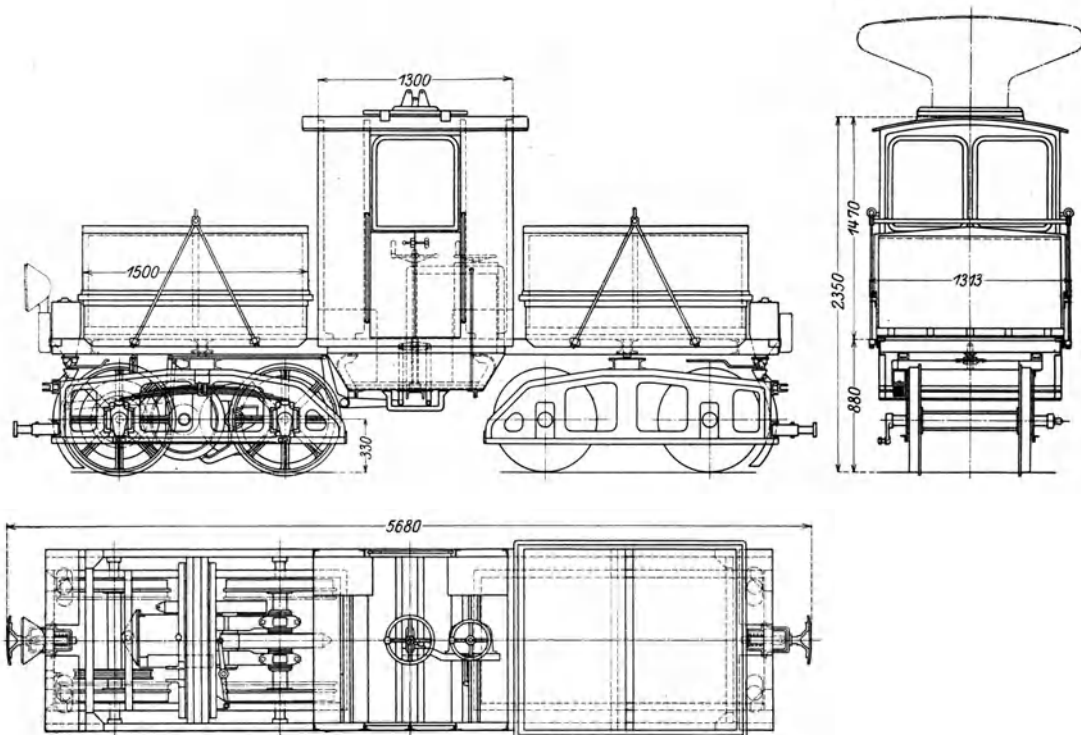


Abb. 444. B + B-Lokomotive für geringe Achsdrücke, Spurweite 600—800 mm ohne Änderung des Bremsgestänges, besondere Bremscheibe, Oberleitungs- und Speicherbetrieb, Speicher abhebbar, zwei Motoren je 15 PS, doppelte Zahnradübersetzung (AEGU).

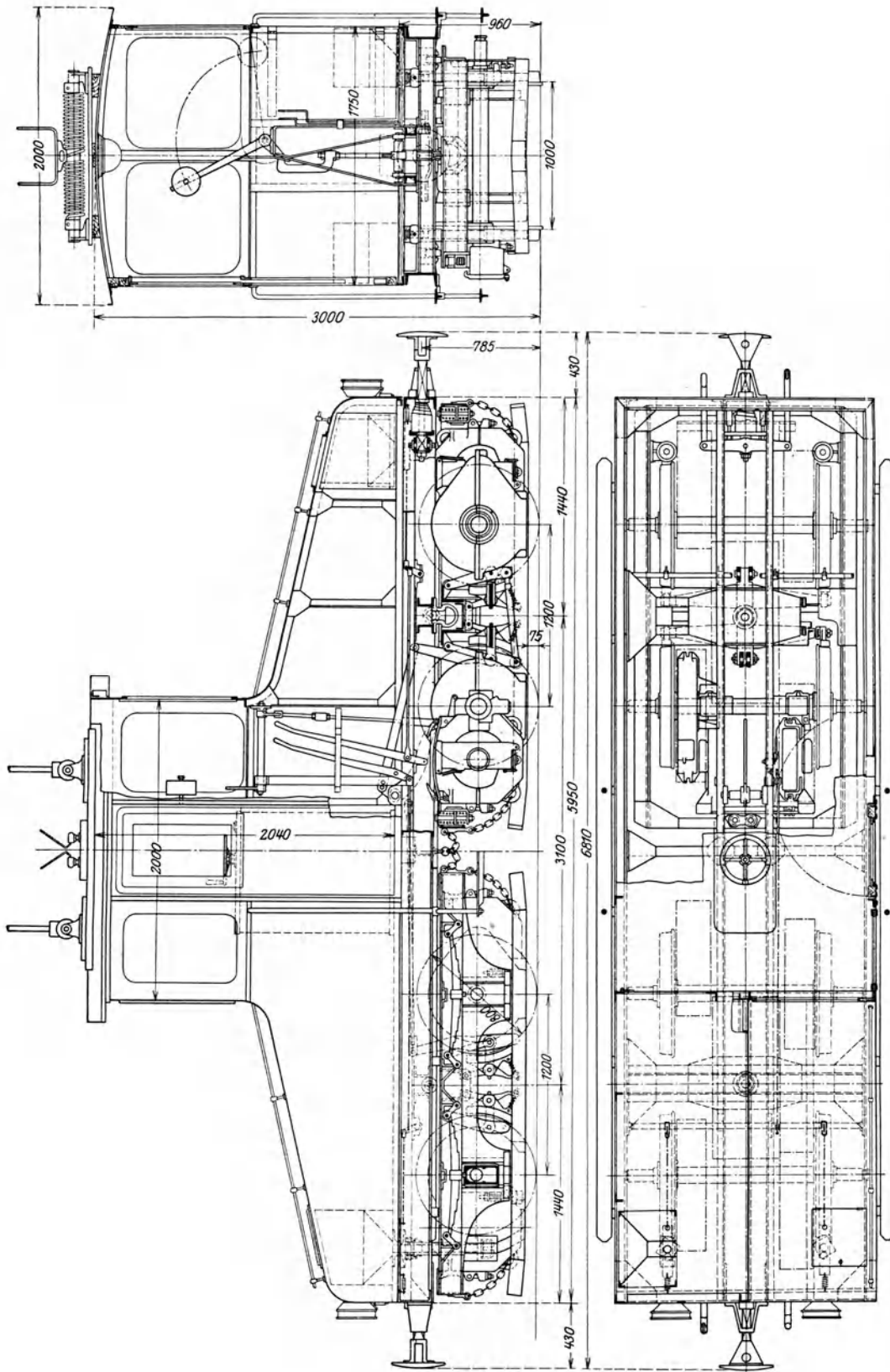


Abb. 445. Meterspurige-Drehgestell-Lokomotive für Verschubdienst. Motoren außerhalb der Achsen, kurze Achsstände (SSW).

tätigung ebenso wie der Fahrschalter in bequemem Handbereich des Führers anzuordnen, und zwar tunlichst so, daß sich der Führer aus der Kabine hinausbeugen kann, ohne den Steuerhebel loslassen zu müssen.

Das Gleiche gilt bezüglich der Betätigung der Signaleinrichtungen.

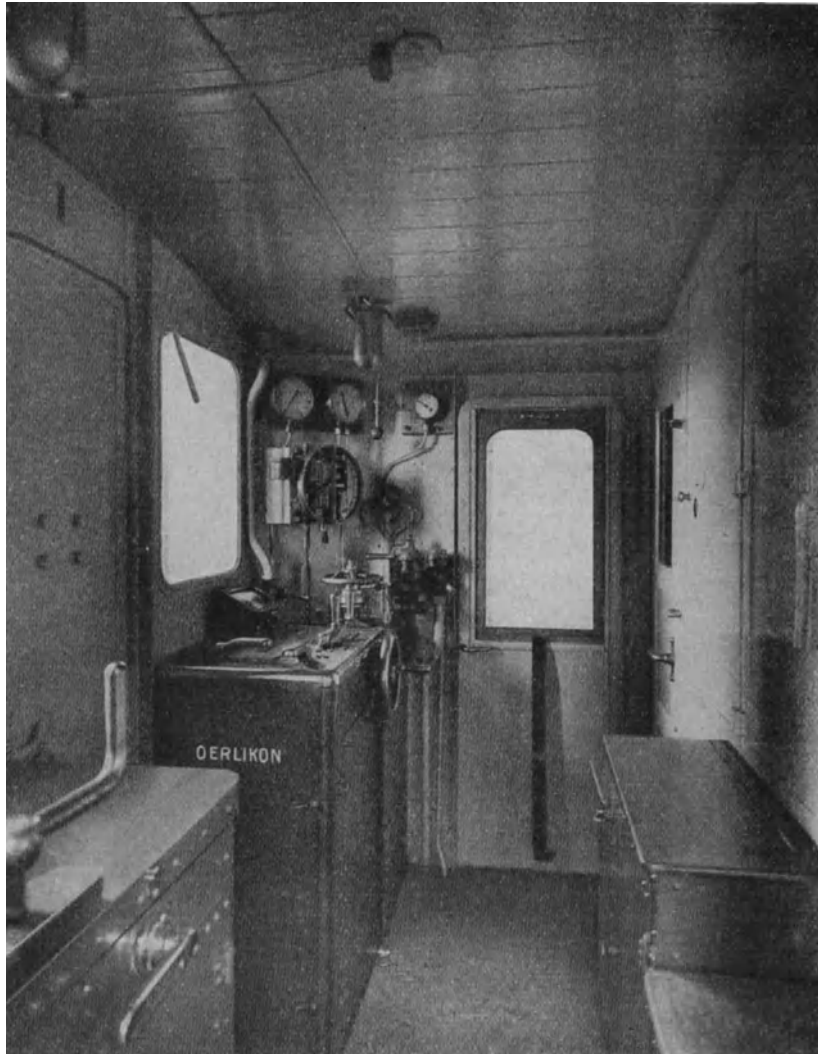


Abb. 446. Einrichtung des Führerstandes einer Lokomotive der SBB (MFO).

Daß 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.

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 und die Signale bei Dunkelheit wahrzunehmen.

Von Maschinen für höhere Geschwindigkeiten wird verlangt, daß die Führerkabine allseitig geschlossen und gut heizbar ist. Bezüglich 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.

XIII. Vollbahnlokomotiven.

Allgemeines:

- Afee: Mechanische Aufgaben beim Entwurf elektrischer Lokomotiven. EJ 1918, Bd. 1, S. 16. — Ref. EKB 1919, H. 20.
- Batchelder: Mechanical design of electric locomotives. ERJ Nov. 1916.
- Bauer-Stürzer: Berechnung und Konstruktion von Dampflokomotiven. 2. Aufl. Berlin: Kreidel 1923.
- Clellan: Locomotives for the Virginian Electrification. RA 1923. Juni.
- Fontanellaz: Einheitliche Kennzeichnung sämtlicher Lokomotivbauarten der Welt. GA 1921, Nr. 1066.
- Gibbs: Selecting designs for electric locomotives. Railway Age 1921, Nr. 21.
- Gibbs: Vergleichende Untersuchungen über die Lauffähigkeit von Dampf- und elektrischen Lokomotiven. JFI 1921, H. 4. — Ref. Eu.M 1922, H. 5.
- Gibbs: Electric traction on heavy traffic lines. ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 4.
- Gysel: DBC, MPO. Die Lokomotiven für die Elektrifikation der Schweizerbahnen SBZ 1922, Nr. 48 bis 51.
- Heldé: Perfectionnements récents dans les locomotives électriques à voie étroite. RGE 1923, Bd. 13, Nr. 7.
- Hruschka: Einteilung und Bezeichnung der elektrischen Triebfahrzeuge. EKB 1912, H. 26.
- Kleinow: Betrachtungen über Einzelheiten amerikanischer elektrischer Vollbahnlokomotiven. EKB 1913, H. 27.
- Laternser: Wirtschaftliche und konstruktive Gesichtspunkte im Bau neuer Groß-Elektrolokomotiven. SBZ 1920, Bd. 77, Nr. 5.
- Leboucher: Les progrès de la traction électrique sur les chemins de fer du Midi. TM 1923, Bd. XV, Nr. 13.
- Leitzmann und Borries: Lehrbuch des Lokomotivbaues. Berlin: Springer 1911.
- Liechty: Lokomotiven mit Hilfsmotoren. GA 1908, Nr. 746.
- Liechty: Lokomotiven und Wagen mit Triebdrehgestellen. GA 1916, Nr. 926.
- Lübon: Höhenlage des Lokomotivkessels. Hanomag 1922, Nr. 5.
- O'Brien: The application of electric locomotives to maine line railway traction. ER 1921, Bd. 88, Nr. 2261. — Ref. Eu.M 1921, H. 24.
- Raven: Electric locomotives. El. 1922, Bd. 89, Nr. 2304. — Eng. 1922, Bd. 133, Nr. 3468. — ER 1922, Bd. 91, Nr. 2335.
- Raven: Railway electrification (North-Eastern-Locom.) ER 1922, Bd. 90, Nr. 2302.
- Seefehlner: Elektrische Vollbahnlokomotiven in Europa und Amerika. EKB 1915, H. 31.
- Seefehlner: Das Gewicht der elektrischen Vollbahnlokomotiven. Eu.M 1915, H. 1.
- Seefehlner: Entwicklungsmöglichkeiten der elektrischen Vollbahnlokomotive. SBZ 1921, Bd. 78, Nr. 2. — Ref. EKB 1921, H. 10. — Eu.M 1921, H. 38. — Ref. EW 1921, Bd. 78, Nr. 70.
- Smiths: Recent improvements in railway electric traction. El 1922, Bd. 89, Nr. 2296.
- Stockert: Handbuch des Eisenbahnmaschinenwesens. Bd. I. Berlin: Springer 1908.
- Storer: Electric locomotive characteristics. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 19.
- Weber: Fünfzig Jahre Lokomotivbau der SLFW Winterthur 1921.
- Wichert: Über Reihenbildung elektrischer Lokomotiven als Voraussetzung für ihre Vereinheitlichung. GA 1921, Nr. 1055. — Winkler: Eu.M 1921, H. 26.
- Zehme: Fahrzeuge für elektrische Bahnen. Eisenbahntechnik der Gegenwart. Bd. IV, Abschn. E. Berlin: Kreidel 1914.
- Zipp: Elektrische Vollbahnlokomotiven für einphasigen Wechselstrom. Leipzig: O. Leiner 1915.
- La locomotive électrique et la traction de grande vitesse. RGE Mai 1917, S. 740.
- Sul peso dei locomotivi elettr. Ela. 1918.
- Recent progress in electric locomotive design. El. 6. I. 22.
- A review of recent locomotives. El. 1921, Nr. 2252.
- Elektrische Güterzuglokomotive der Linke-Hofmann-Werke. Fu.F 1921, Nr. 14.
- Electric locomotives for New Zealand. En. 1922, Bd. 89, Nr. 2318.

1. Benennung der Bauarten auf Grund der Achsfolge. Schematische Bezeichnung für die Achsfolge:

$$\begin{array}{l}
 A = 1 \\
 B = 2 \\
 C = 3 \\
 D = 4 \\
 E = 5 \\
 F = 6
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} A = 1 \\ B = 2 \\ C = 3 \\ D = 4 \\ E = 5 \\ F = 6 \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Triebachsen} \\ \text{miteinander} \\ \text{gekuppelt.} \end{array}
 \quad \begin{array}{l} \text{Die Anzahl der Lauf-} \\ \text{achsen wird durch Zahlen} \\ \text{angegeben.} \end{array}$$

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 Gestellen, davon das vorderste ein Laufgestell, die übrigen Triebgestelle.

$$1 - b - 1$$

Zahnradlokomotive mit zwei Laufachsen und zwei gekuppelten Triebzahnradern.

$$A/b - 1$$

Zahnradlokomotive für gemischten Betrieb mit einer Reibungsachse, zwei gekuppelten Triebzahnradern und einer Laufachse.

2. Maßbestimmungen. Die räumlichen Einschränkungen, die bei nichtöffentlichen Bahnbetrieben durch die örtlichen Verhältnissen gegeben sind, werden bei Vollbahnen in der Hauptsache durch internationale Vereinbarungen geregelt. Diese Regeln sind in den Technischen Vereinbarungen (TV) und den EMV (Eisenbahn-Ministerial-Verordnung) bezüglich der Technischen Einheit der Eisenbahnen niedergelegt. Diese enthalten insbesondere alle Maßangaben betreffend die Umgrenzungslinie der Fahrzeuge und des Lichtraumprofils.

Da 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 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, 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 TV und der TE ergeben, kennt und sie in seinen Entwürfen berücksichtigt.

Die hauptsächlichsten Bedingungen sind:

Größte Breite	3000 mm
„ Höhe	4570 mm
Lichte Höhe über SO	(100) 60 mm
Größter fester Achsstand	5500 mm
Größte Drehzahl der Achsen	400/min
Radreifenbreite	130—150 mm.

3. Anordnung der elektrischen Ausrüstung. Betreffend die 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, Drosselspule und Erdungsschalter wird stets knapp unter dem Dach nächst dem Transformator in einer Kammer angeordnet, die nur bei geöffnetem Schalter, also in spannungslosem Zustande, geöffnet werden kann.

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 Ablaßhahn der Druckluftleitung für die 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, anzuordnen sind.

Vorstehendes gilt für Wechselstrombetrieb und sinngemäß auch für andere Stromarten.

Die Nebenapparate, wie: Pumpen, Kompressoren, werden dann zum Zwecke des Gewichtsausgleiches an 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. Da sich das Gewicht der Mechanik ziemlich gleichmäßig auf die Achsen verteilt, bzw. nach Maßgabe des Achsdruckes eine derartige Belastung unschwer zu erreichen ist, wird durch die oben beschriebene Anordnung der elektrischen Ausführung eine gleichmäßige Gewichtsverteilung erzielt.

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 bei der Dampflokomotive.

Die Entwicklung der elektrischen Lokomotive hat damit einen verfehlten Weg eingeschlagen, der erst verlassen worden ist, seitdem man der Getriebedynamik der Elektrolokomotive und dem organischen Zusammenbau der elektrischen Ausrüstung mit der Mechanik ernste Beachtung schenkt und sich auch der Fesseln der Technik der Straßenbahntriebswagen entledigt hat.

„Ideal wäre jene Lösung, bei welcher die vom Standpunkt der elektrischen Ausrüstung vorteilhafteste Ausrüstung aus Rücksichten der Mechanik keinerlei Änderung erfahren müßte, und auch umgekehrt das lokomotivtechnisch beste Laufwerk ohne irgendwelche, durch die elektrische Ausrüstung verursachte Umänderung ausgeführt werden könnte.“

Der Zusammenbau der elektrischen Einrichtung mit der Mechanik könnte in der Weise durchgeführt werden, daß die Schwerachsen in Übereinstimmung gebracht werden.

Wegen der geometrischen Zusammenhänge zwischen Triebmaschinen und Laufwerk und zufolge den namentlich in der Breite bestehenden räumlichen Einschränkungen läßt sich dieser ideale Weg des Entwurfes nicht oder wenigstens nicht voll einhalten. Jeder Entwurf stellt daher ein Kompromiß auf die mittlere Linie dar. Da in diesem Belange die Kraftübertragung von den Triebmaschinen zu den Treibrädern von entscheidendem Einfluß ist, wird letzten Endes dasjenige Getriebe allen anderen vorzuziehen sein, bei dessen Anwendung die oben angedeutete ideale Anordnung unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Dynamik des Getriebes möglichst verwirklicht wird. Die Unabhängigkeit der elektrischen Einrichtung vom Laufwerk hat auch große wirtschaftliche Bedeutung, indem auf diese Weise erreicht wird, daß man bei gegebener Lokomotiveleistung, d. h. bei bestimmtem Gesamtgewicht der Lokomotive, für alle bei diesem

Gewicht möglichen Achsfolgen einheitlich die gleichen Triebmaschinen anwenden kann. Die Verschiedenheit der elektrischen Triebmaschinen beschränkt sich hiebei auf die der geänderten Zugkraft entsprechende Änderung der Übersetzung.

Viele Erstaussführungen trugen diesen Erwägungen nicht Rechnung und beachteten vor allem auch die für Dampflokomotiven als richtig erkannten Bauregeln nicht. Unfälle und schwere Beschädigungen des Oberbaues waren die Folge.

Die Anordnung der elektrischen Ausrüstung sowie die Bauart des Getriebes und des Laufwerks muß derartig entworfen werden, daß störende Nebenbewegungen nicht entstehen können. Entsprechend der dreigerichteten Bewegungsmöglichkeit des Lokomotivschwerpunkte ist mit Nebenbewegungen in drei räumlichen aufeinander senkrechten Richtungen zu rechnen, deren Charakter außerdem verschieden sein wird, je nachdem die störende Kraft im Schwerpunkt angreift oder Drehmomente wirken.

Das Zucken ist die Folge von periodischen, in Richtung der Fahrbewegung im Schwerpunkt angreifenden Kräften.

Durch den Schwerpunkt gehende, lotrecht gerichtete Kräfte erzeugen das Wogen, wagrecht gerichtete Kräfte das Schwanken.

Ein in der senkrechten Längsebene des Fahrzeuges liegendes Kräftepaar erzeugt das Nicken, ein in der Querebene wirkendes das Wanken; schließlich Drehmomente in der wagrechten Ebene das Schlingern.

Diese „störenden Nebenbewegungen“ und Wirkungen sind teils auf innere, teils auf äußere Ursachen zurückzuführen.

Als äußere Ursachen sind die Unregelmäßigkeiten der Fahrbahn anzusehen, die durch eine gewisse Periodizität Häufungserscheinungen herbeiführen können.

Zur Bekämpfung der auf diese Art entstandenen „Nebenbewegungen“ sind die gleichen Mittel anzuwenden, welche die Theorie und Praxis bei Dampflokomotiven als wirksam erkannt hat.

Die inneren Ursachen von störenden Nebenbewegungen sind bei der elektrischen Lokomotive insofern ganz anderer Art, als diese zur elektromechanischen Energieumformung, also bei der Umwandlung der Drehbewegung in die fortschreitende Bewegung des Fahrzeuges, die bei der Dampflokomotive vorhandenen hin- und hergehenden Massen entbehren kann.

Die Nebenbewegungen der Elektrolokomotive unterscheiden sich auch in bezug auf die Art, wie sie in Erscheinung treten, von denjenigen der Dampflokomotive. Bei der letzteren handelt es sich lediglich um die Bewegung des gesamten, von der Federung getragenen schwingungsfähigen Massensystems gegenüber den Achsen bzw. gegenüber der Fahrbahn, in der Hauptsache hervorgerufen durch den periodischen Wechsel der Schwerpunktslage des Schubkurbelgetriebes.

Die Schwerpunktslage der Elektrolokomotive erfährt im allgemeinen zufolge der rein umlaufenden Kraftübertragung keine Veränderung; trotzdem kann das durch die Federung getragene Gestell gegenüber den Achsen in Schwingung geraten. Es kommen diesbezüglich äußere, sich regelmäßig wiederholende Impulse, verursacht durch Mängel der Fahrbahn, in Betracht; außerdem Kraftwirkungen des Getriebes, die eine periodische Be- und Entlastung der Federn bewirken.

Die gleiche Wirkung können auch die Schwingungen der umlaufenden Massen der Triebmaschinen, d. s. die inneren Störungsquellen, herbeiführen. Die letzteren entstehen aus periodisch wiederkehrenden Stetigkeitsstörungen der Kraftübertragung und äußern sich in Schwingungen der umlaufenden Ankermassen gegeneinander oder in bezug auf den Umlauf der Treibachsen.

Aus den angedeuteten Ursachen tritt bei elektrischen Lokomotiven das Zucken und Wogen im allgemeinen nicht auf.

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.

Diese Regeln sind vom Standpunkt der Lauffähigkeit des Fahrzeuges auch für die Anordnung der elektrischen Ausrüstung maßgebend. Lokomotiven mit nahe an den Enden eingebauten und tiefliegenden, gegebenenfalls ungefederten Motoren sind demnach verfehlt.

Zur Vermeidung der Übereinstimmung der Periodizität dieser äußeren Störquellen mit derjenigen der Übertragungsmöglichkeiten durch die Stützpunkte des Fahrzeuges erscheint es geboten, symmetrische Achsanordnungen überhaupt, insbesondere aber mit gleichmäßigen, zu den üblichen Schienenlängen in rationalem Verhältnis stehenden Abständen zu vermeiden.

Eine gute Lauffähigkeit verlangt ruhigen Gang ohne Nicken und Wanken 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 wagrechte Längsachse unter dem Einfluß der störenden Schienenkräfte, die hochliegenden Massen der gegen die Achsen abgedeckten Teile des Fahrzeuges erhöhen dessen Trägheitsmoment um diese Achse. Die hochliegende Masse leistet diesen Kräften weniger Folge, so daß die Bewegungen um die 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

Angaben über das ungefederte Gewicht und die Schwerpunktslage von ausgeführten Lokomotiven.

	Abb.	Bezeichnung der Lokomotive	Achsfolge	Rad-durch-messer mm	Ungefederte Achslast t		Höhe des Schwerpunktes m
					je Triebachse	in ‰	
Elektrolokomotiven	235	Chicago, Milw. & St. Paul	2-3A+2+3A-2	1725	3,3	13,2	—
	463	Chicago, Milw. & St. Paul	1-2A+4A+4A+2A-1	1118	4,3	25,0	—
	470	New York Central & HRR	2-4A-2	1118	5,0	31,2	1140
	471	New York Central & HRR	4+2A	915	2,9	19,5	—
	478	New York, New Haven Hartford	1-2A+2A-1	1575	Radsatz allein	—	1300
	476	New York, New Haven Hartford	1-2A+2A	1600	„	—	1600
	482	Pennsylvania	1-C+C-1	1830	3,7	11,1	—
	483	Pennsylvania	2-B+B-2	1730	3,9	16,7	1620
	518	Italien. Staatsb. Gr. 33	2-C-2	1630	3,3	18,3	—
	543	SBB	1-C+C-1	1350	3,0	16,6	—
	511	North Eastern	2A+2A	1220	4,5	33,0	1370
	510	North Eastern	2-3A-2	1845	4,8	—	1475
532	OBB	1-C-1	1740	—	—	1584	
Dampflokom.	—	SBB, Reihe 10201	1-3A-1	1610	—	—	1610
	—	Amerika	„Atlantic“ (2-B-1)	—	—	—	1850
	—	Amerika	„American“ (2B)	—	—	—	1600
	—	England	Güterzüge	1850	4,1	—	1850
	—	England	Personen- u. Güterzüge	2030	6,1	—	1700
	—	OBB	Reihe 380 (1-E)	1450	—	—	1800
	—	OBB	E	1350	—	—	1300

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 Unzukömmlichkeiten auf. Es zeigte sich, daß die tiefe Schwerpunktslage zu sehr hohen seitlichen Schienendrücken führte. Auf der NYC-Bahn kam es aus dieser Ursache zu Zerstörungen des Gleises und folgenreicheren Entgleisungen. Die ursprünglich mit der Achsfolge 1—4 A—1 ausgeführten Lokomotiven mußten umgebaut werden und erhielten führende Drehgestelle (Abb. 465 und 466).

Die hohe Schwerpunktslage verringert auch die Raddrücke in Krümmungen, so daß dieser Grundsatz besonders für hohe Geschwindigkeiten beachtet werden sollte.

Besondere Sorgfalt verdient die gute Federung des Fahrzeuges. Würde das Lokomotivgewicht in Gänze oder zum großen Teil ungefedert auf den Achsen lasten, so würde jede durch Unregelmäßigkeiten der Fahrbahn herbeigeführte Stoßwirkung in Formänderungsarbeit in Erscheinung treten. Zerstörung von Fahrzeug und Fahrbahn wären in Kürze die Folge. Durch Einschaltung von Federn werden diesen Masseneffekten einerseits meßbare Wege gewiesen und dadurch die Kraftwirkung verringert, andererseits wirkt die Feder als Arbeitsspeicher und verhindert, daß sich die Stoßwirkung auf die Masse des Fahrzeuges überträgt und als Formänderungsarbeit von der Triebmaschine aufgebracht werden muß.

Die umlaufenden Motormassen stellen Körper mit vergleichsweise großen Trägheitsmomenten dar, die eine Kreiselwirkung erzeugen. Hierdurch können beim Einfahren in Bögen einseitig höhere Achsdrücke entstehen.

Brecht hat nachgewiesen, daß die Größenanordnung dieser Kräfte innerhalb unbedenklicher Grenzen bleibt.

Je nachdem ob auch innere Störungswirkungen 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 stetiger Kraftübertragung vermeiden im allgemeinen störende Nebenbewegungen vollständig.

Die zweite Gruppe bilden Getriebeanordnungen mit Kuppelstangen, Blindwellen, Kuppelrahmen und dergleichen.

Infolge der Zerlegung des Drehmomentes, den ungleichen elastischen Verformungen der beiden Getriebeseiten, des unvermeidlichen Lagerspieles der Kurbelgetriebe, Stichmaßfehlern in den Stangen und Kurbellängen und Ungenauigkeiten in der Winkelstellung der Kurbeln findet während einer Triebbradumdrehung eine un stetige Drehmomentübertragung statt. Bedeutung gewinnen diese Störungsquellen durch die Masseneffekte der umlaufenden Anker und dadurch, daß diese Getriebe meist statisch unbestimmt sind, in welchen die wirklich auftretenden Beanspruchungen nicht dem Willen des Konstrukteurs unterliegen. Wenn der Puls dieser zwar un stetigen, aber periodischen Drehmomentübertragung mit den Eigenschwingungszahlen des umlaufenden Systems übereinstimmt, mit welchen die Motormassen oder die Radsätze gegenüber dem Rahmen oszillieren, so treten kritische Drehzahlen bzw. kritische Fahrgeschwindigkeiten der Lokomotive auf, die durch ausgeprägte Schüttelerscheinungen, unter Umständen bedenklichen Erschütterungen gekennzeichnet sind. Diese Schwingungen können bei geeigneter Pulszahl mit allen Arten von außen verursachten, störenden Nebenbewegungen in Resonanz treten.

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
AEG	schiefe Stangen	x	x	25—32	x	55
Schneider & Co.	"	x	x	25—32	x	55
BBC	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.

Es sei auch im Rahmen dieser Betrachtungen hervorgehoben, daß die Auflösung des starren Schlusses im Kurbelantrieb durch Einschaltung entsprechend bemessener Federungen, als sicheres Mittel erkannt und von der Erfahrung als solches bestätigt wurde, um die aus den Bau- und Betriebsfehlern des Kurbelantriebes entstehenden Störungen gänzlich unschädlich zu machen.

Außer diesen, durch unvermeidliche Erzeugungsfehler primär verursachten Störungen können solche auch unmittelbar durch das Kräftespiel im Getriebe herbeigeführt werden.

Schiefe Treibstangen, welche die im gefederten Gestell festgelagerte Motor- oder Vorgelegekurbeln mit den Kurbeln 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. Verläuft diese Teilkraft außerhalb des Schwerpunktes, so tritt Nicken ein.

Bei zweckmäßiger Anordnung wird die Anker- bzw. Vorgelegewelle wenig oder gar nicht über den Tragachsen überhöht, so daß die Treibstange eine geringe Neigung gegen die Wagrechte aufweist. Die die Störung verursachende, senkrechte Teilkraft wird dann keine nennenswerte Entlastung bewirken; durch Resonanz können sich jedoch 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**.

Im gleichen 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 jedoch und unter ungünstigen Reibungsverhältnissen wird die Sicherheit gegen Gleiten durch diese Einflüsse tatsächlich vermindert.

Zu bereinigen ist die Frage, welchen Einfluß übersetzte Untergestellmotoren in der Trambahnanordnung durch ihre Drehmomentwirkung bewirken können, d. h. 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, so 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 ent-

sprach, am Kasten, also durch Vermittlung der Tragfeder auf der Achse. Lediglich die Tragfeder hat eine Entlastung erfahren und sich dementsprechend gehoben. Das gleiche 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 und konstruktiven sowie stofflichen Schwierigkeiten 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.

Bei einer Bauart, die den mit Recht theoretisch und praktisch zu stellenden Anforderungen entspricht, wird das gesamte Lokomotivgewicht mit der Leistung und das Reibungsgewicht mit der verlangten Zugkraft in Einklang stehen. Nur bei ungewöhnlich langsam laufenden Maschinen mit vergleichsweise kleiner Leistung und großer Zugkraft wird das Reibungsgewicht größer sein als das Konstruktionsgewicht, so daß Ballast mitzuschleppen ist.

Von diesen Ausnahmefällen abgesehen, wird die Erfüllung dieser vom Standpunkt der Baustoffwirtschaft und der Sicherheit der Triebmaschinen zu stellenden Bedingung bei Lokomotiven mit Gestellmotoren eher zu erfüllen sein als beim Einzelantrieb. In diesem Sinne ist es nicht einwandfrei, z. B. eine mit Einzelantrieb, daher vorweg bestimmter Treibachszahl versehene Lokomotive etwa dadurch für den Personenzugdienst, also für höhere Geschwindigkeit, verwendbar zu machen, daß man die Übersetzung ändert. Im letzteren Fall sind die Triebmaschinen bei Ausnutzung des Triebgewichtes gefährdet.

Analytisch kommt diese Tatsache dadurch zum Ausdruck, daß mit der Zugkraft auch die Treibachszahl gegeben ist, da

$$Z = n \cdot 1000 \mu \cdot R.$$

Andererseits ist das Gesamtgewicht durch die Leistung bestimmt, weil

$$1000 Q = Aq \text{ und } A = \frac{Zv}{270} \text{ ist.}$$

Um beide Gleichungen zu erfüllen, muß die Treibachszahl geändert werden, wenn eine andere Zugkraft verlangt wird. Da weiters

$$Q = \frac{qv}{270} \cdot \mu(nR)$$

folgt, daß das Lokomotivgewicht

$$Q = nR$$

nur dann gleich dem Treibgewicht wird, wenn

$$\mu q v = 270.$$

Für eine Lokomotivgröße ist q ein konstruktiv festliegender Wert, ebenso ist μ ein durch die physikalischen Eigenschaften bestimmter, für den Entwurf anzunehmender Festwert. Hieraus folgt, daß auch

$$v_r = \text{konst.}$$

ist.

Es ist somit nur eine Lokomotivgeschwindigkeit vorhanden, bei welcher das Gesamtgewicht mit dem Treibgewicht übereinstimmt; oder, anders ausgedrückt, besagt diese Gleichung, daß jeder Lokomotivgeschwindigkeit bei gegebener Leistung eine andere Treibachszahl entspricht.

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 anzuordnen, für welchen eine Grundfläche von etwa 1,5 bis 2 m Länge mehr als ausreichend ist; die übrigen Bestandteile der elektrischen Ausrüstung finden in beiderseits bis etwa in Fensterhöhe reichende 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 man wählte daher die meist bei 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 werden müssen, nicht vermeiden lassen. Sinngemäßer ist eine Anordnung mit nur einer Führerkabine, die nicht ganz am Maschinenende angeordnet ist.

Das Personal sieht die Führerstände am Stirnende nicht gern, weil bei Zusammenstößen in erster Linie das Fahrzeugende die Gewalt des Anpralles aufzunehmen hat.

Wird die Führerkabine in der Fahrzeugmitte angeordnet, so müssen die Vorbauten zur Unterbringung der elektrischen Einrichtung entsprechend schmaler gehalten werden, damit dem Führer 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.

Es sei z. B. die Aufgabe gestellt, eine Güterzugmaschine für Gebirgsstrecken zu bauen. Bekannt ist:

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. Einzel- oder Vielachsentrrieb zu treffen.

Bei Einzelachsenantrieb wird man mit einer etwas geringeren Zugkraft je Tonne Reibungsgewicht und einer schlechteren Baustoffwirtschaft zu rechnen haben. Der Einfluß der 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 wie folgt ausdrücken:

$$\frac{Aq}{1000} = nR + mL = R \left(n + \frac{m}{p} \right) \quad \text{und} \quad a = \frac{A}{n} = \frac{1000 R}{q} \left(\frac{n + \frac{m}{p}}{n} \right),$$

wobei $R = pL$ den Achsdruck einer Treibachse in t ,
 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.

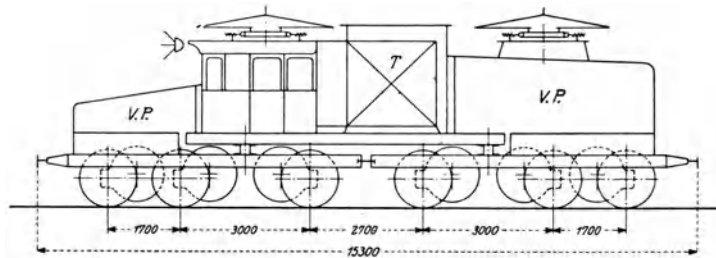


Abb. 447. Genereller Entwurf für eine Güterzuglokomotive mit Untergestellmotoren der Achsfolge $3A + 3A$.

Bei voll ausgenutztem Reibungsschluß 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

$$v = v_r = \frac{270}{\mu q},$$

d. i. diejenige Geschwindigkeit, welche bei Ausnützung der Reibung aller Achsen dem spezifischen Baugewicht der Lokomotive entspricht.

Wird eine höhere Leistung bzw. eine höhere Geschwindigkeit verlangt, so müssen Laufachsen vorgesehen werden. In diesem Fall ist $m > 1$ und

$$v_n = v_r \frac{n + \frac{m}{p}}{n}.$$

Für $m = 0$ und $z = 180 \text{ kg/t}$

wird z. B.

$$v_r = \frac{1500}{q}$$

und für

$$z = 160 \text{ kg/t}$$

$$v_r = \frac{1690}{q}.$$

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 ersteren Fall

$$v_r = 27,3 \text{ km/h}$$

und im zweiten 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 spezifischen Lokomotivgewicht anzuwenden, die Leistung herabzusetzen oder auf ein Schema mit Laufachsen zu übergehen. Es sei ersteres der Fall.

Der Achsdruck mit $14,5 \text{ t}$ 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

$$180 \times 14,5 = 2610 \text{ kg} \quad \text{bzw.}$$

$$160 \times 14,5 = 1320 \text{ „}.$$

Um die Kraft am Zughaken 12000 kg auszunützen, sind 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 .

mit sechs Achsen mit 1352 „

ausgelegt werden.

Da die Achsfolge $5A$ zu großen Achsständen führen würde, kommt für den Einzelantrieb nur eine Anordnung mit zwei kurzgekuppelten Drehgestellen in Betracht, so daß die Maschine sechsachsrig nach der Achsfolge

$$3A + 3A$$

auszulegen ist, dies zwar um so mehr, als die Leistung von fünf Achsen für die Erfüllung der Aufgabe etwas zu knapp wäre.

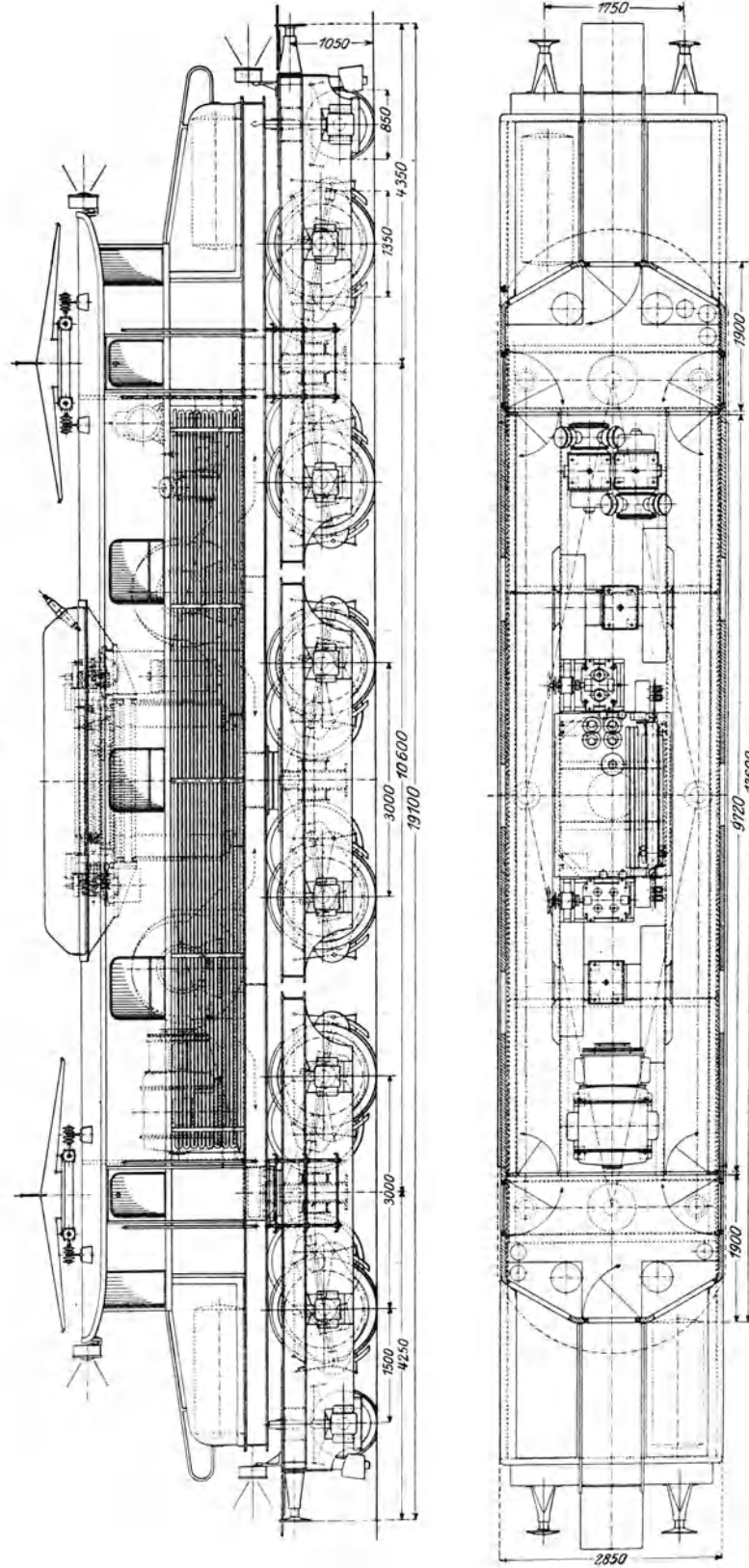


Abb. 448. Entwurf einer 1 - 2 A + 2 A + 2 A - 1 Güterzuglokomotive (BBC).

Soll die über der Reibungsgeschwindigkeit v_r liegende Geschwindigkeit v beibehalten werden, so errechnet sich die Zahl der Laufachsen aus der Beziehung

$$v = \frac{n + \frac{m}{p}}{n} v_r,$$

wobei

$$v_r = \frac{270}{q \mu}$$

durch die Reibungszahl μ und das spezifische 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 ausgenützt ist, indem sich in der Spur Motoren mit 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.

Die Lokomotive mit der Achsfolge $3A + 3A$ und Untergestellmotoren erhält Außenrahmen; zwei Motoren sind hintereinander, der dritte in Gegenüberstellung im Untergestell angeordnet (Abb. 447).

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 höchstzulässigen festen Radstand von etwa 5000 mm.

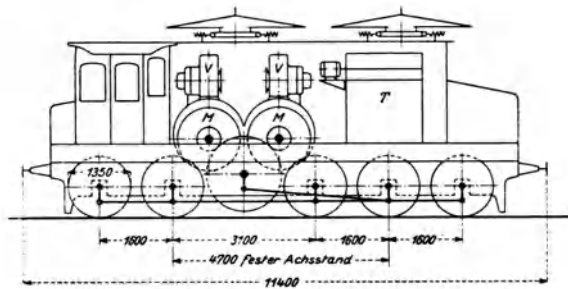


Abb. 449. Genereller Entwurf für eine Güterzuglokomotive mit zwei übersetzten Gestellmotoren, Schrägstangenantrieb, Achsfolge *E*.

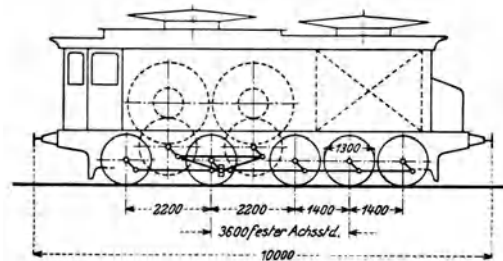


Abb. 450. Genereller Entwurf für eine Güterzuglokomotive mit zwei übersetzten Gestellmotoren, Schlitzkuppelrahmen, Achsfolge *E*.

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 hierfür bei Dampftrieb spricht, nämlich daß im allgemeinen nur eine Dampfmaschine vorhanden und eine Unterteilung des Gestelles sehr umständlich ist, bei der elektrischen Lokomotive entfällt; außerdem 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, so werden den Treibachsen der beiden äußeren Gestelle zweckmäßigerweise Laufachsen vorgesetzt (Abb. 448).

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 die Drehzapfen so nahe als möglich gegen die Maschinenmitte legen und als schwerstes Stück den Transformator hier anordnen, damit jeder Stützpunkt gleich belastet wird.

Gelingt es auf diese Weise nicht, die gleichmäßige Gewichtsverteilung auf alle Achsen zu erzielen, so 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, so wird man in 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 Schwerpunktslage.

Vergleichsweise großes ungefedertes Gewicht.

Große Radstände.

Schlechte Ausnützung der Reibung wegen Reihenschaltung oder Kupplung der Achsen erforderlich.

Querverbindung des Rahmens schwierig.

Der Entwurf mit Achsfolge *E* und drei Untergestellmotoren unterliegt der gleichen 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 eingehendere Behandlung, weil bei diesem zufolge der günstigen Richtungsverhältnisse der große Zugwiderstand in Krümmungen nicht in Betracht kommt.

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 gegenseitig so, daß das Umgrenzungsprofil nicht überschritten wird und daß die Vorgelegewelle eine möglichst geringe Überhöhung bekommt (Abb. 449).

Gegen dieses Getriebe ist (abgesehen vom starren Schluß im statisch unbestimmten System zwischen Treibwelle und Treibachse) nichts einzuwenden, weil nur solche Achsen gekuppelt sind, die beinahe in derselben Ebene liegen und Stöße in der Triebstange sich zu den Motoren nicht fortpflanzen können, da die beiden großen Zahnräder gefedert sind.

Die Motoren sind gut oder wenigstens besser zugänglich als die Untergestellmotoren, das gesamte Gewicht ist abgefedert, die Lauffähigkeit für mäßige Geschwindigkeiten gut, weil die erste und fünfte Achse verschiebbar ist; die zweite und vierte ist fest, die dritte wird 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 deren gleichmäßige Kühlung gefährdet. Steht daher noch etwas Gewicht zur Verfügung, so wird man auf zwei Einzelmotoren übergehen, die dann mittels Kandórahmen oder einer schiefen Stange mit der Triebachse verbunden werden (Abb. 450).

7. Der Rahmen. Für alle Entwürfe mit Gestellmotoren wurde stillschweigend vorausgesetzt, daß ein Innenrahmen verwendet wird, 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 und bei der Anordnung von Untergestell-Achsmotoren ist diese Bauart auch für Vollbahnlokomotiven die meist gebräuchliche.

8. Die Kühlung. Die modernen Motoren sind meistens für künstliche Kühlung eingerichtet; hierbei ist vorausgesetzt, daß ständig kalte Luft zugeführt wird. Es ist von größter Wichtigkeit, die Verschaltungen so einzurichten, daß sich die Luft erneuern und die Warmluft ungehindert entweichen kann.

Weiters 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. Die Abfuhr der Warmluft wird am besten dadurch gesichert, daß man die Maschinen usw. überhaupt nicht mit einem geschlossenen Kasten überdeckt, sondern im Wesen in der freien Luft nur geschützt anordnet.

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. Saugluftherzeugung 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 Bremsprozentente entsprechend höher anzusetzen.

Bei Lokomotiven mit Gestellmotoren und Vielachsenantrieb ist die im Dampflokomotivenbau übliche einseitige Bremsklotzanordnung unbedingt zu vermeiden, weil der einseitige Bremsdruck einseitige Abnutzungen in den Lagern und Scherbacken bewirkt und dadurch die erwünschte Übereinstimmung der Kuppelstangenlängen mit

den Achsständen stört. Aus diesen Gründen sollen alle Triebachsen in gleicher Weise und durch je 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 Volumen.

Der Sammlung der Angaben über ausgeführte 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 über ausgeführte Lokomotiven.

Bedeutung der in den Tabellen benutzten Kürzungen.

AEG	= Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.	MAG	= Maschinenfabrik der Ungarischen Staats- bahnen, Budapest.
AEGU	= AEG Union El.-Ges., Wien.	MFE	= Maschinenfabrik Eßlingen.
ALW	= American Locomotive Works, Pittsburgh.	MFO	= Maschinenfabrik Oerlikon.
ASEA	= Allmänna Svenska Elektriska Aktie- bolaget, Västerås.	Motala	= Lokomotivfabrik Motala, Schweden.
BBC	= Brown, Boveri & Co., Baden, Schweiz.	MSW	= Maffei-Schwarzkopf-Werke, Berlin.
BBCM	= Brown, Boveri & Co., Mannheim.	MVE	= Metropolitan Vickers El. Co., Manchester.
BEW	= Bergmann El.-Werke, Berlin.	OSSW	= Oest. Siemens-Schuckert-Werke, Wien.
BLW	= Baldwin Locomotive Works, Schenectady.	OBBW	= Oest. Brown, Boveri-Werke, Wien.
CEM	= Soc. des Constructions Electro-Méca- nique.	Sar.	= Lokomotivfabrik Ing. Nic. Romeo u. Co., Saronno Mailand.
Ganz	= Ganz & Co., Maschinenfabrik A. G., Budapest.	SB	= Siemens Brothers.
GEC	= General Electric Co., Schenectady.	SCB	= Société des Constructions, Batignolles.
GWF	= Grazer Waggon- und Maschinenfabriks- A. G., Graz.	Sécheron	= S. A. des Ateliers de Sécheron, Genève.
Hanomag.	= Hannoveranische Maschinenfabrik A. G., Hannover.	SOP	= Société Oerlikon, Paris.
KMF	= Karlsruher Maschinenfabrik, Karlsruhe.	SLFW	= Schweizerische Lokomotivfabrik, Winterthur.
LFK	= Lokomotivfabrik Kraus & Co., München, Linz.	SSW	= Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.
LHW	= Linke-Hofmann-Lauchhammer-Werke A. G., Breslau.	Steg	= Lokomotivfabrik der Staatseisenbahn- gesellschaft, Wien.
LWD	= Locomotive Works, Darlington.	TH	= Thomson-Houston, Comp. d'Electricité, Paris.
Am	= Achsmotor.	West.	= Westinghouse Electric & Manufacturing Co., Pittsburgh, Havre, Vado.
Ar	= Außenrahmen.	WLF	= Wiener Lokomotivfabrik Floridsdorf, Wien.
Bw	= Blindwelle.	I	= Induktionsmotor.
D	= Drehstrom.	Kk	= Künstliche Kühlung.
Déri	= Repulsionsmotor mit Bürsten- verschiebung.	Pk	= Parallel-Kurbelgetriebe.
Ds	= Doppeltgespeister Reihenschlußmotor.	R	= Reihenschlußmotor.
G	= Gleichstrom.	Rep	= Repulsionsmotor.
Gm	= Gestellmotor.	Ugdm	= Untergestell-Doppelmotor.
Gdm	= Gestelldoppelmotor.	Ugm	= Untergestellmotor.
H	= Überhöhung der Blindwelle über den Kuppelachsen.	Ü	= Übersetzung.
Hw	= Hohlwelle.	W	= Wechselstrom.
		WE	= Winter-Eichberg-Motor.
		Wp	= Wendepole.
		2Z	= zweiseitiges Vorgelege.

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10		11		12		13			14			15			16			17			18			19				
	Abbildung	Bahnanlage								Jahr der Lieferung	Stückzahl	Reihe, Bezeichnung	Achsfolge	Dienstgewicht t	Reibungsgewicht t	Achsdruk t	Gewicht t		Leistung PS		Zugkraft am Radumfang kg			Geschwindigkeit km/h														
		Erbauer															des mech. Teiles		der elektr. Ausrüstung		Regel-	Dauer-	Regel-	Dauer-	Höchst-	Regel-	Dauer-	Höchst-										
451		Baltimore & Ohio Rrd. GEC BLW	1895	3	LE 1	2 A + 2 A	86,5	86,5	21,4	52,8	33,7	1080	—	10200	—	—	28,2	—	—																			
452		Baltimore & Ohio Rrd. GEC BLW	1903 bis 1906	5	LE 2	4 A	72,5	72,5	18,1	40,0	32,5	800	—	16350	—	—	13,0	—	—																			
453		Baltimore & Ohio Rrd. GEC BLW	1910	2	DE 1	2 A + 2 A	84,0	84,0	21,0	54,0	30,0	1120	660	11800	5900	—	26,7	30,2	82																			
			1912	2	DE 2		91,0	91,0	22,3	61,0	30,0																											
		Bethlehem Chile Iron Mines GEC BLW	1920	3	GZ	2 A + 2 A	108,5	108,5	27,1	54,8	53,7	1370	1190	19000	16100	—	19,6	20,0	51																			
454		Boston & Maine Ry., Hoosac-Tunnel West. ALW	1911	5	S-5000	1 - 2 A + 2 A - 1	118,0	91,0	22,8	64,4	53,6	1500	1405	10450	9320	31000	32,2	40,8	48																			
			1917	2																																		
455		Butte, Anaconda & Pac. Ry. GEC ALW	1913	20	S40-59	2 A + 2 A	72,6	72,6	18,2	45,4	27,2	1280	1090	13600	11340	21800	24,8	26,0	80																			
			1917.	6	S60-65 S66-67																																	
455		Canadian-Northern GEC ALW	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																			
456		Great-Northern Cascade-Tunnel GEC ALW	1909	4	$\frac{5000}{3}$	2 A + 2 A	104,5	104,5	26,1	57,5	47,0	1500	1400	16900	15800	31700	24,5	24,0	48																			
457		Chicago, Milw. & St. Paul Ry. GEC ALW	1914	30 12	$\frac{10200}{229}$ $\frac{10100}{111}$	$\frac{2-4 \times}{\times} 2 A - 2$	260,5	204,0	25,5	151,3	109,2	3616	3168	38600	32200	60200	24,5	25,2	56																			
458		Chicago, Milw. & St. Paul Ry. GEC ALW	1916	4	10050 54	2 A + 2 A	63,6	63,6	15,9	38,5	25,1	600	484	8330	6150	19100	19,3	21,2	56																			
459		Chicago, Milw. & St. Paul Ry. GEC ALW	1918	5	10250 54	1 - 2 A + 4 A + 4 A + 2 A - 1	240,0	208,0	17,3	134,0	106,0	3240	2760	21000	19000	41500	42,2	39,8	101																			
235		Chicago, Milw. & St. Paul Ry. West. BLW	1918	10	10300 9	2 - 3 A + 2 + 3 A - 2	241,0	150,0	25,0	107,0	110,0	4000	3200	30000	22000	51000	36,0	33,8	96																			
460		Chilenische St.B. West. BLW	1922	15	GZ	3 A + 3 A	103,0	103,0	17,1	63,7	39,3	1680	1375	12700 *)	9300 **)	25600	36,4	40,0	65																			
461		Chilenische St.B. West. BLW	1922	7	VL	2 A + 2 A	61,8	61,8	15,4	39,0	22,8	560	390	8900 *)	5170 **)	15400	17,0	20,4	57																			
462		Chilenische St.B. West. BLW	1922	6	SZ	1 - 3 A + 3 A - 1	115,0	95,5	16,0	72,8	42,2	2250	1950	12750 *)	9400 **)	23800	48,5	57,5	100																			
463		Chilenische St.B. West. BLW	1922	11	PZ	2 A + 2 A	72,8	72,8	18,2	43,5	29,3	1500	1300	8500 *)	6250 **)	18100	48,6	54,5	90																			
		Grand-Trunk St. Clair-Tunnel West. BLW	1908	6	2655	3 A + 3 A	122,5	122,5	20,4	69,5	53,0	1500	1335	23800	16800	39000	17,4	21,5	49																			
464		Michigan C. Ry. Detroit-Tunnel GEC ALW	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	65																			
			1914	4			109,0	109,0	27,3	79,5																												
465		New York-Central Hudson River Rrd. GEC ALW	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																			
466			1909	12	S-3	2 - 4 A - 2	111,0	67,4	16,9	83,7																												

*) Ohne Kk, Temperaturerhöhung 75° C.

**) Mit Kk, Temperaturerhöhung 65° C.

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Durchmesser mm		Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je m Lokomotivlänge	Literatur
Trieb- rad-	Lauf- rad-		Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung		
1575	—	10334	2084	6966	G	650	—	4	R	Unmittelbar, gefederte Hw, Ar	80,0	—	105	Davis: GER 1914, Nr. 11. — Batchelder: GER 1914, Nr. 11. — Dietl: AEG-Mitteil. f. Bahnbetriebe 1911, H. 1. — Rathenau: ETZ 1896, H. 9.
1070	—	9038	2300	4443	G	650	—	4	R	Ugm, $\dot{U} = 1:4,26$, Ar	90,6	—	85	Davis: GER 1914, Nr. 11. — GEB 1903, Nr. 3287 u. 1905, Nr. 4188 — Batchelder: GER 1914, Nr. 11.
1260	—	12050	2897	8550	G	650	—	4	WpR	Ugm, Kk, $\dot{U} = 1:3,25$, Ar	76,4 82,0	127,0 138,0	91	Report of the Comm. on heavy electric traction. Eng. Assoc. 1916. — Davis: GER 1914, Nr. 11. — Batchelder: GER 1914, Nr. 11. — ERJ 1910, Bd. 36, Nr. 22. — ETZ 1909. — SBZ 1916, Bd. 56, Nr. 25. — Dodd: GER 1910.
1320	—	15120	3360	10875	G	2400	—	4	—	Ugm, $\dot{U} = 1:4,55$, Kk	79,5	91,5	79	
1600	1067	14650	2135	11752	W	11000	25	4	R 300	Gm, gefederte Hw, $\dot{U} = 1:4,14$, Ar	78,6	84,0	100	ERJ 1911, Bd. 38, Nr. 16. — EKB 1913, H. 26.
1168	—	11380	2640	7850	G	2400	—	4	WpR 1200	Ugm, Kk, Ar, $\dot{U} = 1:4,83$ u. $1:3,2$	57,7	66,6	112	Eng 1914. — ERJ März 1914. — GER 1914, Nr. 11. — BLEKV 1914. — EN 1914, Nr. 26. — Organ 1915.
1168	—	11400	2643	7900	G	2400	—	4	WpR 1200	Ugm, Kk, Ar, $\dot{U} = 1:3,2$	61,0	79,3	112	GER 1914, Nr. 11.
1830	—	12750	3200	5540	D	6600	25	4	I 300	Ugm, Kk, Ar, $\dot{U} = 1:4,28$	69,7	74,6	118	Hutchinson: ERJ 1909, Bd. 34, Nr. 20. — ZVDI 1909, Nr. 3. — GEB 4755.
1590	1100	33800	3200	30200			—	8	WpR 1500	Ugm, Kk, Ar, 2 Z., $\dot{U} = 1:4,56$ u. $1:2,45$	72,1	82,2	109	GER 1916, Nr. 11. — Seefehlner EKB 1919, H. 3 u. Eu.M 1918, H. 10. — ERJ 1915, Nr. 12. — ERJ Okt. u. Juni 1915 u. Okt. 1916.
1016	—	12200	2440	8950			—	4	WpR 1500	Ugm, Kk, Ar	106,0	131,5	49	ERJ 1916. — Seefehlner: EKB 1919 H. 4.
1118	914	23165	4242	20500			—	12	R 1000	Am, Kk, Ar	73,0	86,0	140	Pahin: IE Mai 1918. — Sachs: Eu.M 1918, H. 49. — ERJ 1919, Bd. 54, Nr. 18. — El. Mai 1918. — JAIEE 1920, Nr. 4. — Armstrong: GER 1918, Nr. 5.
1725	914	21945	5080	24354	G	3000	—	2x6	WpR 750	Gdm, Kk, Ar, 2 Z., $\dot{U} = 1:3,7$, Hohlwelle gefedert	60,2	75,4	182	Pahin: IE Mai 1918. — Sachs: Eu.M 1919, H. 20.
1065	—	15200	4200	11250			—	6		Ugm, Kk, Ar, $\dot{U} = 1:3,94$	61,3	75,0	110	Wynne: ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 4. — Muschwitz: ETZ 1922, H. 40.
1065	—	12200	2592	8330			—	4		Ugm, Kk, Ar, $\dot{U} = 1:3,94$	110,0	158,5	46	
1065	762	17450	4400	14700			—	6	R 1500	Ugm, Kk, Ar, \dot{U}	51,2	59,0	129	
1065	—	12240	2740	8550			—	4		Ugm, Kk, Ar, \dot{U}	48,5	56,0	122	ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 8. — Muschwitz: ETZ 1922, H. 40.
1575	—	16900	4880	—	W	3300	25	6	WR	Ugm, Kk, Ar, $\dot{U} = 1:5,22$	81,6	96,0	89	Railw. Gaz. 1908, S. 612. — ERJ 1910, Bd. 35, Nr. 14.
1220	—	12050	2900	8400	G	600	—	4	WpR 600	Ugm, Kk, Ar, 2 Z., $\dot{U} = 1:4,37$	82,6 99,0	136,0 165,0	91	EN 1909, Bd. 61, Nr. 25. — GEB 1911, Nr. 4834. — GER 1914, Nr. 11.
1120	840	13119	3963	9144	G	650	—	4	R 600	Am, Ar	47,1 50,4	129,5 139,0	167	SRJ 1904, Bd. 24, Nr. 21. — EB 1905, H. 31. — GA 1909, Nr. 770. — GEB 1907, Nr. 4537 u. 1904, Nr. 4390. — ETZ 1905, H. 1. — Niethammer

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10		11		12		13			14			15			16			17			18			19		
	Abbildung	Bahnanlage								Jahr der Lieferung	Stückzahl	Reihe, Bezeichnung	Achsfolge	Dienstgewicht t	Reibungsgewicht t	Achsdruk t	Gewicht t		Leistung PS		Zugkraft am Radumfang kg			Geschwindigkeit km/h												
		d. elektr. Ausrüstung															d. mech. Teiles	des mech. Teiles	der elektr. Ausrüstung	Regel-	Dauer-	Regel-	Dauer-	Höchst-	Regel-	Dauer-	Höchst-									
467		New York-Central Hudson River Rrd. GEC ALW	1914 1917	6 10	T 2— 1157—72	4 × 2 A	120,5	120,5	15,0	80,5	40,0	2600	2000	9080	6360	—	79,0	85,0	137																	
468		New York-Central Hudson River Rrd. GEC ALW	1913	10	T 1— 1147—56	4 × 2 A	107,5	107,5	13,4	74,0	33,5	2320	1760	7810	5180	—	81,3	91,7	137																	
469		New York, New Haven & Hartford Ry. West. BLW	1918 1923	5 12	6300—4 5—16	1—3A—1+ +1—3A—1	164,0	111,0	18,5	85,0	75,0	2583 2116 2424	2055 1650	9500 11000 9000	6500 7200	21500	72,4 52,5 73,0	85,4 63,5	113																	
470		New York, New Haven & Hartford Ry. West. BLW	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																	
471		New York, New Haven & Hartford Ry. West. BLW	1911 bis 1912	16	S 0215— 0201	2 A + 2 A	72,0	72,0	18,0	36,2	35,8	752	572	10550	6720	—	19,7	23,0	40																	
472		New York, New Haven & Hartford Ry. West. BLW	1910 bis 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																	
473		New York, New Haven & Hartford Ry. West. BLW	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																	
474		New York, New Haven & Hartford Ry. West. BLW	1910 bis 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																	
475 221		New York, New Haven & Hartford Ry. West. BLW	1907	41	01—41	1—2A+2A—1	99,0	76,0	19,0	47,6	51,4	1420	1125	4400	2920	—	87,6	104,0	140																	
476		Norfolk & Western West. ALW	1915	12	2500—11	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 bis 20000	30800 bis 18200	—	22,5 45,0	22,5 45,5	57																	
—		Norfolk & Western West. ALW	1923	4	—	1—B—B—1+ 1—B—B—1	362,0	257,6	32,2	—	—	4000	3300	40800	40800	76000	45,0	22,5																		
—		Paulista West. ALW	1921	2	R 214	1—2A+2A—1	128,5	93,5	23,4	76,0	52,5	2240	1800	8800	6486	23135	70,8	76,0	105																	
—		Paulista West. ALW	1921	2	R 215	3 A + 3 A	105,8	105,8	17,6	66,2	39,6	1680	1350	13335	9800	26535	35,5	37,6	65																	
—		Paulista GEC BLW	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)																	
477		Paulista GEC BLW	1920	8	R 204	2 A + 2 A	91,0	91,0	22,8	52,5	38,0	1680	1600	14000	13300	27200	33,5	34,0	56 (48)																	
478 263		Pennsylvania West. Pennsylv.	1917	1	—	1—C+C—1	234,0	199,0	33,2	117,0	117,0	4800	4000	39950	33200	64500	33,0	33,0	35																	

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Trieb- rad-	Durch- messer mm Lauf- rad.	Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebs- spannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je m Lokomotivlänge	Literatur
			Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung		
915	—	17350	2000	14375	G	650	—	8	R 600	Am, Kk, Ar	46,4	60,2	150	BIEKV 1915.
915	—	16800	2000	13900	G	600	—	8	R 600	Am, Kk, Ar	46,3	61,0	138	Brecht: EKB 1913, H. 17. — Dodd: GEB 1913, Nr. 5. — BIEKV 1913.
1600	915	21031	4343	18136	W W-G	11000 11000 650	25	2×6	R —	Gdm, Kk, Ar, Ü = 1:3,55	63,5	80,0	123	IE 1918, Mai. — Raven: Eng. 1922 Nr. 3468. — ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 10.
1600	915	15250	2440	12350	W	11000	25	4×2	R 300	Gdm, Kk, Ar, Ü = 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, Ü = 1:5,95	95,7	135,5	64	Hellmund: EKB 1913, H. 26. — ERJ 1912, Bd. 39, Nr. 7 u. 1914, Bd. 43, Nr. 21. — ERJ 1922, Bd. 59, Nr. 12. — EuM 1922, H. 28.
1600	915	14250 15250	3360	11900 12950	W G	11000 650	25 —	4×2	R 300	Gdm, Kk, Ar Ü = 1:4,18	62,1	94,5	119 111	ERJ 1912, Bd. 39, Nr. 25 u. Nr. 7. — EN 1912, Bd. 76, Nr. 11. — BIEKV 1913.
1450	915	15900	2440	13250	W G	11600 650	25 —	2	R	Gm, Bw, Kk, schiefe Treib- stange	100,0	117,0	78	ERJ 1910, Bd. 35, Nr. 19. — EKB 1910, H. 20. — EKB 1913, H. 26.
1600	1075	14600	2135	11750	W G	11000 650	25 —	4	R 300	Gm, Kk, Ar, 2 Z, gefederte Hw, Ü = 1:2,33	100,0 89,0	110,0 97,0	86	ERJ 1909, Bd. 34, Nr. 13 u. 1910, Bd. 35, Nr. 19. — EKB 1910, H. 20. — Murray: Proc. 1911. — ZVDI 1910, Bd. 54, Nr. 18. — ERJ 1909, Bd. 35, Nr. 19 u. Bd. 34, Nr. 13.
1575	840	11500	2032	9390	W G	11000 650	25 —	4	R 450	Am, gefederte Hw, Kk, Ar	70,0	88,0	123	ERJ 1907, Bd. 30, Nr. 7. — 1908, Dez. — SETZ 1907, H. 13. — ZVDI 1908, S. 821. — ETZ 1907, H. 16. — EKB 1908, Nr. 5. — GA 1909, Nr. 770.
1575	762	32300	3360	28900	W D	11000 —	25 —	8	I	Gdm, Kk, 2 Z, Ü = 1:4,73, Kuppelst.	74,7	94,2	111	ERJ 1915, Bd. 45, Nr. 23. — EuM 1913, H. 47. — Wynne: Proc. 1916, Nr. 2. — Seefehlner: EKB 1915, H. 31 u. 1916, H. 13. — Hershey: ERJ 1916, Bd. 47, Nr. 10.
1568	—	27780	5030	10426 je Hälfte	W D	11000	25	4	I —	Gm, Kk, 2 Z, Ü = 1:4,76, Bw.	90,5	109,5	144	ERJ 1923, Bd. 60, Nr. 27.
1600	915	16130	2540	12550	G	3000	—	4	R 1500	Gdm, Kk	57,0	71,0	123	ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 24 u. 1920, Bd. 55, Nr. 24 u. Nr. 17. — ERJ 1919, Bd. 53, Nr. 24. — Ref. ETZ 1921, H. 36. — Cooper: ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 24.
1040	—	15300	4270	11300	G	3000	—	6	R 1500	Ugm, Z	63,0	78,5	110	ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 24 u. 1920, Bd. 55, Nr. 24. — Ref. ETZ 1921, H. 36. — Cooper: ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 24.
1070	915	16800	2370	14000	G	3000	—	4	R 1500	Wp, Ugm, 2 Z, Ü = 1:2,33	65,5	69,0	100	ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 24. — GER 1921, Nr. 1 u. Nr. 7. — Ref. ETZ 1921, H. 36. — Bearce: ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 24.
1070	—	11950	2645	8160	G	3000	—	4	R 1500	Wp, Ugm, 2 Z, Ü = 1:4,56	54,0	57,0	142	GER 1921, Nr. 1 u. 7. — ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 24 u. 1920, Bd. 55, Nr. 17. — Bearce: ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 24.
1830	915	23320	4060	19480	W D	11000 —	25	4	I	Gdm, Kk, 2 Z, Ü = 1:5, Kuppelst.	48,8	58,5	205	ETZ 1918, Nr. 48. — EuM 1918, H. 10. — GC 1917, Nr. 11. — ERJ Juni 1917. — Sc.A Aug. 1917. — GA 1919, Nr. 998. — E März 1918. — Eng. Sept. 1917. — E Febr. 1918. — ERJ Dez. 1917. — SBZ 1918, Bd. 71, Nr. 12.

1 Abbildung	2 Bahnanlage		3 Jahr der Lieferung	4 Stückzahl	5 Reihe, Bezeichnung	6 Achsfolge	7 Dienstgewicht t	8 Reibungsgewicht t	9 Achsdruk t	10 Gewicht t		12 Leistung PS		14 Zugkraft am Radumfang kg			17 Geschwindigkeit km/h		
	d. elektr. Ausrüstung	d. mech. Teiles								11 des mech. Teiles	11 der elektr. Ausrüstung	12 Regel	13 Dauer	14 Regel	15 Dauer	16 Höchst	17 Regel	18 Dauer	19 Höchst
479 248	Pennsylvania West. Pennsylv.		1910	33	3977	2-B+B-2	142,0 150,0	93,0 94,5	23,3 23,6	87,7	64,3	2500 4000 ¹ / ₃ h	1860	9720	5900	36000	48,0	69,5	128
—	Piedmont & Northern GEC BLW		1914	—	5102	2 A + 2 A	57,5	57,5	14,4	40,5	17,0	1000	700	7950	5100	13600	33,8	—	—
—	Southern Pac. West. ALW		1911	15	GZ	2 A + 2 A	54,5	54,5	13,6	34,5	20,0	900	—	8550	—	—	28,3	—	—
—	Spokane & Inland Ry. West. ALW		1906 1910	5 5	A 1	2 A + 2 A	45,4 64,0	45,4 64,0	11,3 16,0	23,4 34,2	22,0 29,8	600 700	— 552	6000 11600	7900 6680	—	25,0 —	— 21,7	48
480	Albtalbahn AEG — 1 m Spur		1915	4	—	2 A + 2 A	31,5	31,5	8,0	—	—	320	180	3900	—	6000	22,0	—	—
481 482	Badische Staatsbahn (Wiesenthal) SSW MSW		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
483	Badische Staatsbahn (Wiesenthal) BBCM KMF		1913	2	A ³ -1	1-C-1	70,0	43,4	14,0	34,0	31,0	800	—	4300	—	9500	50,0	—	70
484	Bayerische Staatsbahn (Garmisch) MSW		1913	5	EP 29-002	1-C-1	69,0	42,0	14,0	—	—	1000	—	9000	—	—	30,0	—	50
485	Bayerische Staatsbahn (Garmisch) BBC LFK		1920	2	EG 20 221	B+B	61,0	61,0	15,3	34,8	26,2	900	700	7700	6000	8000	30,0	30,0	50
486	Bayerische Staatsbahnen BEW LFK		1916	5	EG 4 20201 bis 5	2 A + 2 A	56,0	56,0	14,0	32,0	24,0	880 800	580 400	7800 6800	4100 3400	9300	28,6 30,0	36,0 30,0	50
—	Bayerische Staatsbahnen SSW LFK		1914	5	EP ³ / ₆ 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
487	Bayerische Staatsbahnen MSW LFK		1916	5	EP ³ / ₆	1-C-2	94,0	48,0	16,0	53,6	36,8	1300	1000	7000	3300	10000	50,0	80,0	80
—	Murnau-Oberammergau SSW LFK		1905 1909	1 1	—	2 A	20,0 24,0	20,0 24,0	10,0 12,0	10,0 12,4	10,0 11,6	200 350	— —	3000 4200	— —	— —	18,0 22,0	— —	— —
488 277	Preuß. Staatsbahnen SSW Hano-mag.		1911	1	ES 1	2-B-1	73,6	32,8	16,6	46,5	27,1	1030	840	3630	1875	8000	75,0	120	—
—	Preuß. Staatsbahnen AEG Hano-mag.		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
—	Preuß. Staatsbahnen BEW Hano-mag.		1912	1	ES 3	2-B-1	72,0	32,0	16,0	45,5	26,5	1500	1100	4450	3500	16500	80,0	85,0	—
489	Preuß. Staatsbahnen SSW Borsig		1912	1	ES 6	2-B-1	81,3	50,0	16,7	40,3	41,0	2000	1200	6500	3800	11500	79,0	—	—
—	Preuß. Staatsbahnen SSW MSW		1912	1	ES 5	1-C-1	84,9	51,6	17,2	43,9	41,0	1800	1500	5400	—	10000	85,0	—	110
490	Preuß. Staatsbahnen MSW		1912	11	ES ⁹ / ₁₉	1-C-1	84,0	51,0	17,0	46,0	38,0	1800	1250	10000	—	12500	45,0	—	—

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Trieb- rad-	Durch- messer mm Lauf- rad.	Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebs- spannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je m Lokomotivlänge	Literatur
			Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung		
1730 1830	1300	19780	2230	17060	G	600	—	2	WpR 600	Gm, Kk, Bw, schräge Treib- stange	57,0	76,4	127	ERJ 1909, Bd. 34, Nr. 18 und 1911, Bd. 37, Nr. 9. — ETZ 1913, H. 42. — ERJ 1913, H. 15. 1911, Bd. 37, Nr. 9. — ETZ 1909, H. 52.
—	—	11400	2186	8140	G	1500	—	4	WpR 750	Ugm, Kk	57,5	80,5	114	ERJ 1914, Bd. 43, Nr. 11.
965	—	10650	2230	7620	G	1500	—	4	R 750	Ugm, $\dot{U} = 1:3,56$	60,6	—	85	Carter: Ry. El. Traction 1922.
968 1270	—	7050 12820	2230 2892	6435 7584	W G	6600 700	25 —	4	R	Ugm, $\dot{U} = 1:4,93$ $\dot{U} = 1:4,65$	76,0 91,5	— 115	85 55	ERJ 1909, Bd. 34, Nr. 14.
950	—	10600	1600	6600	W	8000	25	4	WE 650	Ugm, $\dot{U} = 1:6,1$	100,0	175,0	30	EKB 1915, H. 16.
1050	850	12360	4000	9000	W	15000	15	2	R 300	Gm, zwei Stangen eine Blindwelle	72,5	88,0	85	Reichel, EKB 1913, H. 11.
1480	990	11960	3600	8100	W	15000	$16\frac{2}{3}$	2	Rep. 1200	Gm, zwei Stangen ohne Blindwelle	81,0	—	75	SBZ 1910, Nr. 10. — BBC Mannheim 1919, Nr. 1.
1050	850	12250	4000	9000				1	R/500 zwei Kollek- toren	Gm, Schräg- stange, Bw	64,0	—	82	
1250	—	12450	2740	9200				2	R 415	Gm, $\dot{U} = 1:3,5$, Schlitz, Kuppel- stange, H 110	68,0	87,3	73	RBCM 1920, H. 2. — RGE 1922, Bd. 11 Nr. 20.
1100	—	10990	2500	7000				4	R	Kk, Ugm, Z	63,7	103,0	80	
1100	850	12300	—	9400				1	R	Gm, Bw, Kk	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, $\dot{U} = 1:5,3$	100,0 68,5
1600	1000	12500	3000	9000	W	15000	$16\frac{2}{3}$	1	R 460	Gm, senkrechte Stange, Bw	71,5	88,0	83	Heyden: EKB 1910, H. 15. — Klei- now: EKB 1912, H. 22. — Wachs- muth: GA 1916, Nr. 947.
								1	Ds 570		60,2	120,0	96	GA 1916, Nr. 948.
								1	R 270		48,0	65,5	120	EKB 1912, H. 13. — GA 1916, Nr. 948.
1250	1000	12950	3900	8700	1	R 525	Gm, Schräg- stange, Bw, Kk	40,7	70,0	154	Organ. 1916. — ZVDI 1915, Bd. 59, Nr. 28.			
1600	1000	13100	—	—	1	R 525		47,2	56,6	137	GA 1916, Nr. 947.			
1350	1000	12450	3900	8130	1	R, 2 K 640		46,7	67,0	145	Organ. 1916. — ZVDI 1915. — Klei- now: EKB 1919, H. 26. — Wachs- muth: GA 1917, Nr. 950.			

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10		11		12		13			14			15			16			17			18			19		
	Abbildung	Bahnanlage								Jahr der Lieferung	Stückzahl	Reihe, Bezeichnung	Achsfolge	Dienstgewicht t	Reibungsgewicht t	Achsdruk t	Gewicht t		Leistung PS		Zugkraft am Radumfang kg			Geschwindigkeit km/h			Regel-			Dauer-			Höchst-			
		d. elektr. Ausrüstung															d. mech. Teiles	des mech. Teiles	der elektr. Ausrüstung	Regel-	Dauer-	Regel-	Dauer-	Höchst-	Regel-	Dauer-	Höchst-	Regel-	Dauer-	Höchst-	Regel-	Dauer-	Höchst-			
—	Preuß. Staatsbahnen AEG LFK	—	1	ES 4	1—D—1	96,0	68,0	17,0	—	—	1200	800	4000	—	10500	75,0	—	110																		
—	Preuß. Staatsbahnen MSW	—	7	EP 202—208	1—C—1	83,0	51,0	17,0	46,3	36,7	1765	1200	10600	—	16000	45,0	—																			
491 283	Preuß. Staatsbahnen SSW MSW	—	1	EP 201	1—D—1	90,0	68,0	17,0	—	—	2600	1550	8200	5250	18000	70,0	83,0																			
282 492	Preuß. Staatsbahnen BEW LHW	1918 1923	1 11	EP 235 EP 236—46	2—D—1	108,0 104,0	66,0 70,0	16,5 17,5	55,0 58,0 *)	44,8 38,0	3000	2250	14750	9375	20000	56,5	65,0	90																		
493	Preuß. Staatsbahnen BEW LHW	—	12	EP 209—12 u. 233—34	2—B+B—1	115,0	70,0	17,5	65,0	50,0	2400	—	11000	—	18000	55,0	—																			
—	Preuß. Staatsbahnen BEW LHW	—	11	EP 213—234	1—D—1	101,0	70,0	16,2	54,2 8,2 **)	38,6	3000	—	14000	—	20000	55,0	—																			
494	Preuß. Staatsbahnen AEG Hano-mag.	1912	2	EG 502—503	D	66,0	66,0	16,5	36,0 35,2	30,0 29,5	800 600	600 600	6500 5400	—	10000	37,5	—	70																		
	Preuß. Staatsbahnen BBC Hano-mag.	—	1	EG 504		62,0	62,0	15,5	35,5	26,5	600	500	5400	—	12000	30,0	—	60																		
	Preuß. Staatsbahnen SSW Hano-mag.	—	1	EG 505		65,6	65,6	16,4	34,1	26,5	800	475	5000	3000	—	40,0	60,0	60																		
	Preuß. Staatsbahnen MSW	—	3	EG 506—8		63,2 64,0	63,2 64,0	15,8 16,0	35,2 32,0	28,0 32,0	800 1050	500 750	6500 8500	—	12000 13000	30,0	—	60 80																		
495	Preuß. Staatsbahnen AEG LFK	1910	1	EG 509—10	1—B+B—1	94,4	71,9	17,9	44,6	49,8	1600	1200	8000	—	13500	40,0	—	75																		
496	Preuß. Staatsbahnen AEG	1914 bis 1921	27	EG 511—37	B+B	65,0	65,0	14,3	30,5	34,5	1200	1000	8800	7300	16000	34,0	34,0	50																		
497	Preuß. Staatsbahnen SSW LHW	1915 bis 1921	13	EG 538—50	B+B+B	103,0	103,0	17,1	58,2	44,8	—	1170	—	10500	20000	—	30,0	50																		
498	Preuß. Staatsbahnen BBC	1920 bis 1921	10	EG 551—52	C+C	96,0	96,0	16,0	54,0	42,0	1400	1240	—	10500	16500	—	32,3	50																		
499	Oranienburg AEG	1908	1	—	2A+1—A	59,5	45,0	15,9	32,5	27,0	1050	900	9000	—	13000	31,5	—	60																		
500	Deutsche Reichsbahn AEG SSW LFK	1924 bis 1925	30	GZ	C+C	110,4	110,4	18,4	51,0	59,4	2550	1960	—	—	—	—	—	55																		
501	Deutsche Reichsbahn AEG SSW LFM	1924 bis 1925	35	Gebirgs-PZ	2—B+B—2	129,0	72,0	18,0	64,5	64,5	2550	1960	—	—	—	—	—	90																		
502	Deutsche Reichsbahn BEW —	1923	5	Flachland SZ	2—C—2	99,0	54,0	18,0	—	—	2400	1650	—	—	—	—	—	110																		

*) Heizkessel 8 t.

**) Heizkessel.

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Durchmesser mm		Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je Lokomotivlänge	Literatur
Trieb- rad-	Lauf- rad-		Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung		
1500	1000	13820	—	—				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: ETZ 1919, H. 31. — Döry Vieweg, 1919.
1050	850	14400	2600	10600				2	R 315	Gm, zwei Schrägstangen, Bw, Kk	36,0	59,4	180	Kleinow: EKB 1912, H. 23. — GA 1916, Nr. 947. — Reichel: EKB 1913, H. 6.
1250	1000	14400	2250	11250				1	R 350	Gm, Dreieckrahmen, zwei Blindwellen, Kk	33,3	44,5	204	Müller: EKB 1918, H. 16. — Ref Eu.M 1913, H. 47. — Organ. 1916. — GA 1916, Nr. 948. — Anger: ZVDI 1915, Bd. 59, Nr. 28. — Stengel: EKB 1920, H. 27. — GA 1921, Nr. 1050. — EKB 1921, H. 21. — Loewentraut: EKB 1921, H. 17.
		14800		11400	32,0	42,7	202							
1700	1000 1150	16500	2700	15193				2	R 350	Gm, Ü, Kuppelstange, Kk	48,0	—	145	GA 1916, Nr. 948.
1250	1000	13160	3950	10000				1	R 350	Gm, Dreieckstange, zwei Bw, Kk	33,0	—	225	Loewentraut: EKB 1921, H. 17.
1050	—	10500	3500	4800				1	R WE		82,5	100,0	76	Eng. 1912.
1050	—	10500	3500	4800				1	Déri 1248		103,3	134,0	57	Wachsmuth: GA 1916, Nr. 948.
1050	—	10500	3500	4800	W	15000	16 ² / ₃	1	R 315	Gm, Schrägstange, Bw	82,0	138,0	76	Kleinow: EKB 1912, H. 23. — EKB 1910, H. 15.
1050	—	10500 10000	3650	4950				1	R 500		79,0 61,0	126,0 85,5	76 105	ETZ 1911. — Richter: ETZ 1913, H. 32. — GA 1916, Nr. 947. — EKB 1912, H. 6.
1270	850	15750	—	12450				2	WE 1235		58,8	78,5	101	EKB 1910, H. 15. — GC 1911, Bd. 58, Nr. 17. — ETZ 1910, H. 21. — GA 1916, Nr. 949.
1350	—	11200	2900	7900				2	R 510	Gm, Ü = 1:4,45, Kk, Schlitzkuppelstange	54,1	81,2	107	AEGM 1918, H. 1 u. 1920, H. 3. — Wachsmuth: GA 1916, Nr. 949.
1350	—	17210	2900	13600				3	R	Gm, 2 Z, Ü = 1:5,19, Kuppelstange, Ar	—	88,0	—	ZVDEV 1913. — Wachsmuth: GA 1916, Nr. 949. — Winkler: EKB 1919, H. 20. — Stengel: 1920, H. 27. — GA 1921, Nr. 1050.
1250	—	15934	4300	11430				4	R 405	Gdm, 2 Z, Ü = 1:4,89, Kuppelstange, Ar	68,5	77,5	88	ZVDEV 1913. — Wachsmuth: GA 1917, Nr. 950. — BBCM 1920, H. 1 u. 1921, H. 6. — RGE 1922, Bd. 11, Nr. 20.
1450	1450	14140	3300	9600		6000	25	3	WE	Ü, Kk, Ugm	56,5	66,2	75	Wechmann: ETZ 1908, H. 17.
1250	—	16500	4500	11760				4	R 315	Gm, Kk, Ü = 1:4,17	43,5	56,5	155	
1400	850	16900	4600	13600		15000	16 ² / ₃	4	R 315	Gm, Kk, Ü = 1:2,87, Bw	50,7	66,0	150	Wechmann: ETZ 1922, H. 24. — ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 46/7. — Gleichmann: ETZ 1922, Festschrift.
1600	1000	12400	—	12400				1	R	Gm, Kk, 2 Bw Dreieck	41,3	66,0	153	

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	Achsfolge	Dienstgewicht	Reibungsgewicht	Achsdruk	Gewicht t		Leistung PS		Zugkraft am Radumfang kg			Geschwindigkeit km/h		
	d. elektr. Aus-rüstung	d. mech. Teiles															des mech. Teiles	der elektr. Aus-rüstung	Regel-	Dauer-	Regel-	Dauer-	Höchst-	Regel-	Dauer-	Höchst-
503	Deutsche Reichsbahn BEW —	—	1923	10	Flachland GZ	1—B+B— —1	100,0	73,6	18,4	—	—	2400	1600	—	—	—	—	—	65							
504	Deutsche Reichsbahn — —	—	1923	19	PZ	1—C—1	—	55,2	18,4	—	—	—	980	—	—	—	—	—	70							
505	Deutsche Reichsbahn — —	—	1923	10	Gebirgs SZ	1—4A—1	—	72,0	18,0	—	—	—	1960	—	—	—	—	—	100							
—	Metro London GEC —	—	1907 1922	10 10	—	2A+2A	47,7	47,7	12,0	31,4	16,3	800	—	7100	—	—	31,4	—	—							
—	North Eastern — —	—	1904	2	VL	2A+2A	56,8	56,8	14,2	41,4	15,4	540	—	7050	—	—	13,8	—	—							
506	North Eastern MVE LWD	—	1921	1	SZ	2—3A—2	102,0	56,1	18,7	72,0	30,0	1800	1200	7300	4350	—	66,5	74,5	144							
507	North Eastern SB LWD	—	1914	10	GZ	2A+2A	75,7	75,7	13,9	51,0	24,7	1100	635	8900	4730	12700	33,0	36,8	72							
—	Süd-Afrikan. StB. VEC —	—	1922	78	—	2A+2A	67,0	67,0	16,5	39,0	28,0	1200	970	10560	7450	19500	33,3	46,7	72							
508	Französische Südbahn BBC CEM	—	1911	1	E 3301	1—C—1	84,0	53,0	13,3	—	—	1500	—	5950	—	8500	50,0	—	—							
519	Französische Südbahn At. Jeumont	—	1912	1	E 3401	1—3A—1	86,0	54,0	18,0	—	—	1500	1200	9270	—	—	43,7	—	—							
—	Französische Südbahn TH SLFW	—	1911	8	E 3001	1—C—1	88,0	54,0	18,0	—	—	1500	1200	8140	5840	15000	50,0	56,0	78							
510	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							
511	Französische Südbahn SCF —	—	1922	5	E 4002	2A+2A	72,0	72,0	18,0	—	—	1400	1000	12600	—	—	30,0	50,0	65							
—	Französische Südbahn — —	—	1921	2	SZ	2—3A—2	—	—	—	—	—	2250	—	—	—	—	90,0 1200	—	130							
512	Paris-Orléans TH	—	1900	13	E 1—13	2A+2A	50,0	50,0	12,5	31,5	18,5	900	—	11350	—	—	21,2	—	—							
513	Paris-Orléans BBC SLFW	—	1918 bis 1919	5	E 21— 25	1—D—1	87,2	68,5	17,1	47,5	39,7	1800	1200	7250	4050	17000	67,0	80,0	100							
514	Paris-Orléans SOP — SCB	—	1923	80	E 101— 180	2A+2A	64,0	64,0	16,0	35,0	29,0	1730	1310	10400	7240	21600	45,0	49,0	100							
—	Paris-Orléans BBC SLFW	—	1924	2	—	2—4A—2	118,0	72,0	18,0	74,0	44,0	3600	3000	14700	11100	22000	66,0	72,7	130							
515	Paris-Orléans Ganz	—	1924	2	—	2—B—B—2	128,0	64,0	16,0	52,0	76,0	3400	3000	10500	—	—	88,0	—	130							
—	Paris-Orléans Soc. d'Etudes.	—	1924/5	80	GZ	2A+2A	64,0	64,0	16,0	—	—	1400	1320	8850	—	—	43,0	—	65							
—	Paris-Orléans Soc. Alsacienne	—	1924/5	40	GZ	2A+2A	64,0	64,0	16,0	—	—	1500	1200	—	—	—	—	—	65							

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
Trieb- rad-	Durch- messer mm	Lauf- rad-	Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebs- spannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je m Lokomotivlänge	Literatur
				Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung		
1400	1000	15200	4500	12000				2	R	Gm, Kk, Ü, Treibstange, H=270	—	62,5	—		
1400	1000	11500	4600	8600	W	15000	16 ² / ₃	2	R	Gm, Kk, Ü, Bw	—	—	—	Wechmann: ETZ 1922, H. 24. — ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 46/47. — Gleichmann: ETZ 1922, Fest- schrift.	
1640	1000	15550	3500	12600				4	R	Gm, Kk, Ü Buchli. Getr.	—	—	—		
965	—	10200	2350	7532		550	—	4	R 550	Ugm, Ü=1:3,37	59,8	—	78	Carter: El. Ry. Traction 1922. — Eng. 1922, Bd. 113. — EKB 1922, H. 24.	
915	—	11530	2050	8250		600	—	4	R 550	Ugm, Ü=1:3,17	105,0	—	47	Carter: El. Ry. Traction 1922. — Raven: Eng. 1922, Bd. 133, Nr. 3468.	
1845	1100	16250	4877	11305	G	1500	—	3	R 750	Ugdm, Ü=1:3,54, Kk	57,8	85,0	111	ER 1922, Nr. 2340. — Ref. Eu.M 1922, H. 48. — Raven: Eng. 1922, Bd. 133, Nr. 3468.	
1220	—	12000	2670	8100		1500	—	4	R 750	Ugdm, Ü=1:4,5	68,7	119,0	92	Raven: Eng. 1922, Bd. 133, Nr. 34, 68. — En. 1922, Bd. 89, Nr. 2317. — RGCF 1920, Nr. 10.	
1221	—	13310	2830	9424		1500	—	4	R 750	Ugm, Ü	55,0	68,0	98	ER 1922, Nr. 2347. — SBZ 1924, Bd. 83, Nr. 10.	
1600	850	13140	—	9200				2	Déri 1250	Gm, Zwei- stangenantr. ohne Bw	56,6	—	114	Jullian: RGCF 1911, März.	
1400	1000	14270	3800	—		12000	16 ² / ₃	3	R 760	Gm, gefederte Hw Ü=1:2,72	57,4	71,6	105	Cauwenberghe: ETZ 1912, H. 42. — EKB 1912, H. 27.	
1310	850	13740	3900	7600				2	Ds 360	Gm, zwei Schräg- stangen, zwei Bw	58,6	73,3	109	GC 1912, Bd. 72, Nr. 9. — TH 1912, Nov. Nr. 7.	
1200	850	11370	4000	—				2	R 420	Gm, 2 Z, Ü=1:1,62, Kandórahmen, Kk	54,0	67,5	132	Simey: LE 1912, Nr. 43. — GC 1912, Bd. 72, Nr. 9. — GC Dez. 1912. — Eu.M 1913, Nr. 29. — BIEKV 1912. — Bd. 7.	
1400	—	11850	2800	8350		1500	—	4	R 750	Ü, Kk, Ugm	51,5	72,0	118	TM 1920, Nr. 12. — Raven: Eng. 1922, Bd. 133, Nr. 3468. — L'Ind. Tramw. 1923, Nr. 193.	
1750	—	—	—	—		1500	—	6	R 500	Ugdm, Ü	—	—	—	Raven: Eng. 1922, Bd. 133, Nr. 3468.	
1245	—	10600	2390	7050	G	600	—	4	R 600	Ugm	55,6	—	85	Pforr: GA 1901, Nr. 586. — GEB Nr. 9125. — Zf.E 1901, Nr. 24.	
1500	860	12200	5150	8700		600	—	2	R 600	Gm, Zweistangen, Schlitzstange ohne Bw, Kk, Federkupplung	48,5	72,5	147	Parodi: RGCF 1922, Nr. 3.	
1350	—	11850	2800	8150		1350	—	4	R 1350	Ugm, Kk Ü=1:3,47	37,0	48,8	146	MFOM 1923, Nr. 2 u. Nr. 20. — ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 10. — Parodi: Bull. Soc. Franç. Electr. 1923, Bd. 3, Nr. 23. — Eu.M 1923, H. 30.	
1750	970	17750	5750	11800	G	1500	—	4	R 1500	Buchli Ü=1:2,55	31,1	39,3	214		
1750	960	15700	—	13100	G	1500	—	4	R 1350	Gm, Kandó- rahmen	38,0	—	216		
1250	—	12630	2700	8800	G	1500	—	4	R 1350	Ugm, Ü=1:3,1	45,7	48,5	111	Parodi: Bull. Soc. Franç. Electr. 1923, Bd. 3, Nr. 23.	
1350	—	13030	2800	8800	G	1500	—	4	R 1350	Ugm	42,6	53,5	115		

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
Trieb- rad-	Durch- messer mm Lauf- rad-	Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebs- spannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je m Lokomotivlänge	Literatur		
			Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung				
1200	915	19020	2850	16320	G	1500	—	6	$\frac{R}{675}$	Am	38,4	52,0	148	Bearce: GER 1924, Nr. 3. — ZVDI 1924, Bd. 68.		
1500	1000	20650	2400	16900	$\frac{W}{G}$	12000	25	4	$\frac{R}{150}$	Ugm, $\dot{U} = 1:3$	75,3	—	87	SBZ 1910, Nov.		
1600	1010	20000	2800	17000	G	1500	—	8	$\frac{R}{750}$	Gdm, Getr. MFO	46,0	60,6	120	MFO 1923, Nr. 3 u. 21.		
1630	960	13370	3600	10600	D	3000	15	2	$\frac{J}{3000}$	Gm, zwei Schräg- stangen, zwei Bw	35,0	—	198	Gubler: BBCM 1918, Nr. 5.		
1630	960	13370	3600	10600			15	2	$\frac{J}{3000}$	Gm, zwei Schräg- stangen, zwei Bw	35,0	—	198	ETZ 1920, H. 7. — Periodische Mitt, Oerlikon, 1919, Nr. 7.		
1630	900	11000	2400	8400			15	2	$\frac{I}{3000}$	Gm, Kandó- rahmen	27,2	—	253	Verebely: Eu.M 1919, H. 21. — Pontecorvo: ERJ 1915, Bd. 45, Nr. 6. — ZOJAV 1915, Nr. 19. — Huldschiner: ETZ 1921, H. 21. — Bianchi: RGCF 1923, Nr. 2.		
1070	—	9500	3840	6120			15	2	$\frac{I}{3000}$		30,0	—	210	Verole: RT 1914, Nr. 6. — RGCF 1912, Nr. 2. — Kummer: SBZ 1911, Bd. 58, Nr. 22. — Kandó: ZVDI 1909, S. 1249. — Heyden: ETZ 1910, H. 28. — Eu.M 1909, H. 38. — Eng. Aug. 1913. — ERJ 1915, Bd. 45, Nr. 10.		
1630	—	14520	2350	11610			10000	45	2	$\frac{I}{1000}$	Gm, Z, Kr 2 Bw, $\dot{U} = 1:2,7$	—	—	—	BBCM 1923, Nr. 2.	
1070	—	11500	4700	6380			10000	45	2	$\frac{I}{1000}$	Gm, Z, $\dot{U} = 1:3,625$ 2 Bw, Kr	—	—	—	BBCM 1923, Nr. 2.	
1070	—	9700	3600	6000			3000	15	2	I	Gm, Kandó- rahmen aufgelöst	25,7	—	290		
—	—	—	—	—			3000	15	2	I	—	—	—	—	—	The Locomotive, 15. Okt. 1923
—	—	—	—	—			$\frac{W}{D}$	$\frac{10000}{10000}$ $\frac{3600}{3600}$	$\frac{50}{50}$ $\frac{50}{16\frac{2}{3}}$	2	I	—	—	—	—	—
1070	—	11010	4100	6380			D	3700	$16\frac{2}{3}$	2	I	Gm, Kandó- rahmen	26,6	—	246	
1500	850	11540	2400	9500	3000	15		2	$\frac{I}{3000}$	Gm, Kandó- rahmen	41,5 73,0	—	130 74	Koromzay: RGCF 1905, Nr. 3. — EKB 1907, H. 6.		
1500	850	11540	2400	9500					$\frac{I}{3000}$		51,7 62,0	—	104 86	Cserháti: Zf.E 1905, H. 15. — SETZ 1905, H. 48. — Zehme: EBTZ 1905, Nr. 2 u. 18.		
1396	—	10306	2000	6630	2	$\frac{I}{3000}$		Am, Hw	51,0	77,0	87	Cserháti: ETZ 1903, H. 8. — Zf.E 1903. — Verebely: Eu.M 1919, H. 20.				
1500	950	12770	—	10000	G	650	—	2	$\frac{R}{610}$	Gm, zwei Schräg- stangen, zwei Bw	52,5	—	107	Buchli: EKB 1913, H. 12. — MT 1913.		
1500	960	12770	—	10000		650	—	2	$\frac{R}{650}$	Kandórahmen KK	50,7	69,0	107	BBCM 1922, H. 12.		
965	—	12800	2400	—		4000	—	4	$\frac{R}{2000}$	Mgm, $\dot{U} = 1:3,95$	75,0	—	—	ER 1922, Nr. 2342. — Eu.M 1922, H. 48. — ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 10.		
1000	—	8910	2000	6500		2000	—	4	$\frac{R}{1000}$	Mgm, $\dot{U} = 1:5,1$	69,2	—	38	BBCM 1921, H. 10		

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10 11		12 13		14 15 16			17 18 19										
	Abbildung	Bahnanlage								Jahr der Lieferung	Stückzahl	Reihe, Bezeichnung	Achsfolge	Dienstgewicht t	Reibungsgewicht t	Achsdruk t	Gewicht t		Leistung PS		Zugkraft am Radumfang kg			Geschwindigkeit km/h			
		d. elektr. Ausrüstung															d. mech. Teiles	Erbauer	Erbauer	des mech. Teiles	der elektr. Ausrüstung	Regel-	Dauer-	Regel-	Dauer-	Höchst-	Regel-
—	Valle Brembana	BBC —	1921	2	—	B + B	42,8	42,8	11,0	25,8	17,0	400	230	5400	3400	—	20,0	20,0	—								
529	Usui-Toge	AEG MFE (1000 mm Spurw.)	1913	12	Gemischt Zu.Reib.	C/b	42,0	42,0	14,0	—	—	700	—	—	—	—	20,0	—	—								
—	Japan. Staatsb.	GEC BLW	1922	2	—	2A + 2A	59,8	59,8	15,0	—	—	1100	1040	8020	7880	15000	35,2	35,2	65								
—	Javanische Staatsb.	AEG	1924	1	—	1-B + B-1	68,9	50,3	12,6	39,5	29,4	1570	1170	8200	5600	—	52,0	56,5	92								
—	Javanische Staatsb.	AEG	1924	1	—	2A + 2A	50,5	50,5	12,6	28,5	22,0	900	600	7500	4500	—	32,5	36,5	60								
530	Nordmark	AEG (1076 mm Spurw.)	1920	15	—	1-C-1	40,6	25,4	8,5	22,2	18,4	435	320	4500	3300	5600	25,0	25,0	60								
—	Rjukanbahn	AEG	1912	3 2	R. B. 1	2A + 2A 2A	46,0 23,0	46,0 23,0	11,5	20,0 10,0	26,0 13,0	500 250	260 130	9300 4650	—	—	14,5	—	45								
—	Rjukanbahn	ASEA WMF	1918	—	—	B + B	43,0	43,0	10,8	24,5	18,5	560	440	6400	3700	10500	22,0	30,0	—								
—	Norwegische Staatsbahnen	BBC Nord. Ind.	1922	2	—	1-B + B-1	77,5	28,0	14,0	47,5	30,0	—	1000	—	7350	—	—	33,0	50								
—	Norwegische Staatsbahn	ASEA —	1922	14	—	B + B	62,0	62,0	15,5	38,5	23,5	940	800	7000	5300	16000	33,0	37,0	60								
273 274	Mariazell	ÖSSW LFK 760 mm Spurw.	1910 1914	11 3	Nr. 1- 14	C + C	47,0	47,0	7,8	24,0	23,0	600	—	5000	—	8400	35,0	—	50								
531	Mittenwald Wien-Preßburg	AEGU WLF	1912 1914	9 3	R. 1060 EG 1-3	1-C	53,0	42,0	14,0	29,0	24,0	800	500	7500	—	11000	30,0	—	45								
532	Wien-Preßburg	AEGU GWF	1914	8	EP 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								
533	Öst. Bundesbahnen	BBC WLF	1923	7	R. 1100	1-C + C-1	114,7	87,0	14,5	70,0	44,7	2500	1850	12500	10000	16500	54,0	50,0	65								
534	Öst. Bundesbahnen	AEGU Steg	1923	20	R. 1029	1-C-1	71,0	43,5	14,5	34,6	36,4	1360	1000	8200	6000	9000	42,0	42,0	70								
535	Öst. Bundesbahnen	ÖSSW LFK	1923	20	R. 1080	E	72,1	72,1	14,5	36,6	35,5	1170	840	10600	7000	17500	34,2	42,0	50								
—	Öst. Bundesbahnen	Ganz WLF	1924	1	GZ	E	73,3	73,3	14,7	30,0	41,0	950 2000	—	15000 8000	—	—	16,8 67,2	—	50								
—	Öst. Bundesbahnen	Ganz WLF	1924	1	GZ	1-D-1	81,5	59,0	14,8	37,5	41,0	750 2000	—	8000 5400	—	—	25,4 101,5	—	—								
536	Riksgränsen	AEG u. SSW 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								
537	Schwed. Staatsbahnen	AEG	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								

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
Trieb- rad-	Durch- messer mm Lauf- rad-	Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebs- spannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je m Lokomotivlänge	Literatur	
			Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung			
1100	—	12400	2600	9400	W	6000	25	2	W	Gm, $\dot{U} = 1:5,69$ Schlitzkuppel- stange	107,0	186,0	32	BBCM 1922, H. 8.	
Reib. 900 Zahnr. 802	—	9660	2740	4300	G	650	—	2	R $\frac{650}{500}$	Gm, \dot{U} , Schräg- stange	60,0	—	72	AEGZ 1914, Nr. 9.	
1067	—	11210	2580	8580	G	1500	—	4	R $\frac{750}{750}$	Ugm	57,5	—	100	ERJ 1922, Bd. 60, Nr. 26. — Eu.M 1923, H. 14. — GER 1923, Nr. 5. — En. 1923, Bd. 90, Nr. 2343.	
1350	825	14100	3100	11700	G	1500	—	4	R $\frac{750}{750}$	Gdm, 2 Z, $\dot{U} = 1,366$	43,8	58,9	111		
1106	—	11800	2600	8100	G	1500	—	4	R $\frac{750}{750}$	Ugm, Kk, $\dot{U} = 1:4,28$	56,1	82,8	76		
1000	700	9320	3500	6600	W	12000 bis 16000	25	1	R $\frac{500}{500}$	Gm, $\dot{U} = 1:2,86$ Schrägstange, Bw	93,0	126,0	47	Wist: AEGZ 1922, Nr. 4. — VT 1922, H. 44.	
1000	—	10400	1600	6600		6600	25	4 2	Ds $\frac{220}{220}$	Ugm, $\dot{U} = 1:4,22$	92,0	177,0	48	Marguerre: EKB 1912, H. 39. — AEGZ 1913, Nr. 2.	
1000	—	9050	2300	6400		6600	25	4	R	Gm, \dot{U} , Schlitz, kuppelstange, H = 120	77,0	98,0	62		
1445	988	14500	3050	11500		15000	15	2	R	Gm, $\dot{U} = 1:5,24$ Schlitzkuppel- stange H	—	77,5	—	BBCM 1921, Nr. 5. — ETZ 1923, H. 31.	
1445	—	1276	3000	8000		15000	15	2	R	Gm, Z, $\dot{U} = 1:4,27$, Bw, H = 0	66,0	77,5	74	ASEAs Egen Tidning 1922, Nr. 1 u. 1923, Nr. 1.	
800	—	11020	2400	7900		6000	25	2	R $\frac{220}{220}$	Gm, $\dot{U} = 1:3$, Kk, Schlitz- kuppelstange	78,0	—	53	DSKBZ 1912, H. 1. — EKB 1913, H. 17. — EKB 1910, H. 15. — EKB 1912, H. 15.	
1034	870	10300	4000	5900		15000	$16\frac{3}{3}$	15	1	WE $\frac{810}{810}$	Gm, Schräg- stange, Bw, Schlitzkuppel- stange H = 0	66,5	106,0	78	Seefehlner-Popp, Eu.M 1913, H. 18. — EKB 1913, H. 6. — ETZ 1912, H. 17.
1034	870	10526	4000	5900					1	Ds $\frac{490}{490}$	Gm, Schräg- stange, Bw	71,0	71,0	71	Seefehlner: EKB 1914, H. 32. — Eu.M 1914, H. 45.
1350	870	20350	3850	17100					4	R $\frac{575}{575}$	Gm, $\dot{U} = 1:3,218$, 2 Z, Kk, Kuppel- stangen, H = 30	46,5	62,7	127	Eu.M 1920, H. 18. — Dittes: ZOIAV 1921, H. 15. — Eu.M 1921, H. 16. — EKB 1921, H. 12. — Baecker: GA 1921, Nr. 1067. — van Nes. Eu.M 1923, H. 25. — Eisenbahnblatt 1923, Nr. 3.
1740	1034	12819	5670	9890					2	R $\frac{460}{460}$	Gm, $\dot{U} = 1:4,21$, 2 Z, Kk, Kuppel- stangen, H = 0	52,2	71,0	106	Eu.M 1920, H. 44. — Dittes: ZOIAV 1921, H. 15. — Eu.M 1921, H. 16. — EKB 1921, H. 12. — Baecker: GA 1921, Nr. 1067.
1350	—	12750	4750	7750	3				R $\frac{390}{390}$	Ugm, $\dot{U} = 1:6,143$ 2 Z, Kk	55,7	75,5	104	Eu.M 1921, H. 7. — Dittes: ZOIAV 1921, H. 15. — Eu.M 1921, H. 16. — EKB 1921, H. 12. — Baecker, GA 1921, Nr. 1067.	
1070	—	10800	3600	6500	W D				2	I	Gm, Kandó- rahmen	77,1 36,7	—	185 88	
1614	—	13000	5070	10130	W D	2	I	Gm, Kandó- rahmen	108,0 40,8	—	58 154				
1530	850	20890	4900	16600	W	15	15	4	R $\frac{365}{365}$	Gdm, $\dot{U} = 1:4,9$, 2 Z, Kk, Kuppel- stangen, H = 0	45,5	56,5	138	Wist: AEGM 1923, Nr. 6. — Reichel: SZ 1923, H. 3.	
1350	—	12900	2900	8300				2	R $\frac{510}{510}$	Gm, \dot{U} , 2 Z, Kk, Schlitzkuppel- stange, H = 75	68,0	85,0	77,3	Wist: Eu.M 1921, H. 19 u. AEGM 1921, Nr. 4.	

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34			
Durchmesser mm		Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je Lokomotivlänge	Literatur			
Trieb- rad-	Lauf- rad-		Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung					
1100	750	18620	4300	14600	W	15000	15	2	R	Gm, Schrägstange, Bw	82,5	133,0	92	EKB 1915, H. 20 u. H. 25. — EKB 1912, H. 23. — GA 1920, Nr. 1041. — Zolland: EKB 1914, H. 9. — Zf.KB 1915, Nr. 4. — RTW 1916, Nr. 16. — ZVDI 1920, Bd. 64, Nr. 9. — ETZ 1915, H. 32. — Hoepner, VT 1921, Nr. 17.			
1575	970	14050	2900	10100				2	R		89,0	—	71				
1350	—	11250	3450	6350				2	R 295	Gm, Ü = 1:3,82, Kuppelrahmen	60,6	78,0	100		Friebel: Eu.M 1923, H. 16. — ASEAs Egen Tidning 1922, H. 11 u. 1923, H. 1.		
1350	960	21400	3450	16200				4	R 295	Gm, Ü = 1:1,76, Kuppelstangen,	54,7	70,0	105		Friebel: Eu.M 1923, H. 16. — ASEAs Egen Tidning 1922, H. 11 u. 1923, H. 1.		
850	—	13900	2100	9800	G	750	—	4	R 750	Gm, Ü = 1:4,67, Kk, Dreieckstange	53,3	68,6	57	BBCM 1917, H. 8. — ETZ 1917, H. 52. — Eu.M 1918, H. 12. — BBCM 1918, H. 1.			
1230	850	14390	2900	10550	W	15000	16 ² / ₃	2	R	Gm, Ü = 1:3,86, Kk, Schlitzkuppelstange	52,7	64,8	90	SBZ 1920, Bd. 76, Nr. 8. — BBCM 1920, H. 7. — Eu.M 1920, H. 43.			
1230	—	13800	2600	10600	D	750	40	2	I 750	Gm, Ü = 1:6, Schlitzkuppelstange	87,6	—	36	BBCM 1919, Nr. 4. — Sachs: Eu.M 1919, H. 23.			
1230	—	12600	2600	9400				2	I 750	Gm, Ü = 1:4	84,0	—	54	Wyßling-Kummer: BIEKV 1910. — SBZ 1910.			
1230	—	7800	3140	3140				2	I 750	Gm, Ü = 1:1,88 u. 1:3,72, Kuppelstange, schiefe Achsgabeln	100,0	—	38	Herzog: Die elektrischen Anlagen der Schweiz. 1905.			
1350	930	19240	4700	15840	W	15000	16 ² / ₃	4	R	Gdm, Ü = 1:3,16, Kk, 2 Z, Schrägstange ohne Bw	60,0	70,5	114	Studer: Eu.M 1918, H. 27 und SBZ Bd. 71, Nr. 20. — Sachs: Eu.M 1919, H. 24. — BBCM 1919, H. 4. — ERJ 1919, Bd. 53, Nr. 24. — SBZ 1909, Bd. 44, Nr. 21. — ZVDI 1921, Bd. 55, Nr. 14.			
1350	930	19400	4700	16500				4	R 400	Gdm, Ü = 1:4,03, Kk, 2 Z, schiefer Kuppelrahmen Bw	58,3	76,0	113	SBZ 1920, Bd. 75, Nr. 7 u. Nr. 21. — Eu.M 1920, H. 32. — Period. Mitt. Oerlikon 1920, Nr. 102. — Heyden: EKB 1921, H. 5. — ZVDI 1921, Bd. 65, Nr. 14.			
1350	930	16500	2900	13200				4	R 440	Gdm, Ü = 1:3,47, Kk, 2 Z, Schlitzkuppelstange, H	49,0	60,0	136	SBZ 1918, Bd. 71, Nr. 20 u. 1919, Bd. 74, Nr. 7. — Period. Mitt. Oerlikon. 1919, Nr. 97. — Sachs: Eu.M 1919, H. 24. — Behn-Eschenburg: SBZ 1920, Bd. 74, Nr. 7. — ZVDI 1921, Bd. 65, Nr. 14.			
1350	930	16500	3300	13500				4	R 480	Gdm, Ü = 1:3,47, Kk, 2 Z, Kuppelstangen	49,8	62,6	131	BBCM 1919, Nr. 4 u. 1921, Nr. 9. — SBZ 1919, Bd. 74, Nr. 15. — Heyden: EKB 1921, H. 7. — ZVDI 1921, Bd. 65, Nr. 14. — TE 1922, Nr. 712.			
1350	930	13500	4700	10000				2	R 440	Gdm, Ü = 1:2,81, Kk, 2 Z, Kandórahmen	54,6	66,7	122	Studer: SBZ 1918, Bd. 71, Nr. 20 u. 1919, Bd. 74, Nr. 10. — Period. Mitt. Oerlikon. 1919, Nr. 97. — Eu.M 1918, H. 27. — ZVDI 1921, Bd. 65, Nr. 14.			
1610	930	14090	4700	10800				2	R 435	Gm, Ü, Kk, 2 Z, Kandórahmen	44,5	52,5	156	SBZ 1921, Bd. 78, Nr. 11.			
1610	930	14700	4000	10700				3	R 550	Gm, Ü = 1:2,57, BBC-Einzelantrieb	43,7	52,8	143	Buchli-Couwenhoven: BBCM 1922, Nr. 5.			
1610	900	21000	2200	17000				4	R		50,5	61,0	125	Sachs: ETZ 1922, H. 4. — Eu.M 1922, H. 27. — STZ 1922, Nr. 48.			
1040	850	9820	4050	5880							1	R 560	Gm, Ü = 1:3,7	—	—	71	

1 Abbildung	2 Bahnanlage		3 Jahr der Lieferung	4 Stückzahl	5 Reihe, Bezeichnung	6 Achsfolge	7 Dienstgewicht t	8 Reibungsgewicht t	9 Achsdruk t	10 Gewicht t		12 Leistung PS		14 Zugkraft am Radumfang kg			17 Geschwindigkeit l	
	Erbauer									des mech. Teiles	der elektr. Ausrüstung	Regel-	Dauer-	Regel-	Dauer-	Höchst-	Regel-	Dauer-
	d. elektr. Ausrüstung	d. mech. Teiles																
555 287	Lötschberg MFO SLFW	BBC	1914	12	R 153	1 — E — 1	107,0	80,0	16,0	48,0	59,0	2500 1 ¹ / ₂ ^h	—	13500	—	18000	50,0	—
556 275	Lötschberg MFO SLFW		1910	1	Nr. 121	C + C	90,0	90,0	15,0	46,0	44,0	2000	—	13000	—	17000	42,0	—
557	SBB Sécheron SLFW		1921	14	SZ	1 — 3 A — 1	82,6	57,0	19,0	39,0	43,0	1800	1440	7800	6300	—	62,0	62,
558	SBB Sécheron SLFW		1921	6	SZ	1 — 2 A — 1 + + 2 A — 1	113,0	74,0	19,0	55,5	57,5	2400	1920	11920	9680	19680	54,0	—
559	Valle Maggia MFO SLFW (Meterspur)		—	1	Ge 2/2	B	20,8	20,8	18,5	11,5	9,3	250	—	3100	—	—	22,0	—
—	Rhätische Bahn BBC SLFW (Meterspur)		1913	2	Nr.301/2	1 — D — 1	55,2	42,1	11,0	26,7	28,5	600	420	—	—	—	28,0	—
—	Rhätische Bahn BBC SLFW (Meterspur)		1913	7	Nr.201/7	1 — B — 1	36,7	21,8	11,0	18,9	17,8	300	210	—	—	—	28,0	—
560	Rhätische Bahn AEG SLFW (Meterspur)		1913	1	Nr. 391	1 — D — 1	55,4	41,4	10,7	30,2	25,2	600	—	—	—	—	28,0	—
561	Rhätische Bahn MFO SLFW (Meterspur)		1918	3	Nr.355/7	1 — D — 1	56,3	44,0	11,0	30,5	25,9	800	580	7400	—	10000	30,0	—
—	Rhätische Bahn MFO SLFW (Meterspur)		1913	2	Nr.351/2	1 — D — 1	49,6	39,2	9,9	27,6	21,7	600	400	5750	—	—	28,0	—
—	Rhätische Bahn BBC SLFW		1918	1	302	1 — D — 1	57,9	44,0	11,0	28,5	29,4	800	580	7400	—	10000	30,0	—
562	Rhätische Bahn BBC SLFW (Meterspur)	MFO	1921 1923	6 4	401—406 407—410	C + C	66,0	66,0	11,0	38,0	28,0	1200	1000	9700	8100	13000	30,0	30,
563	Seebach-Wetting. MFO SLFW		1905	1	Nr. 2	B + B	42,0	42,0	10,5	—	—	500	—	3400	—	—	40,0	—
564	Simplon BBC SLFW		1906	3	364	1 — C — 1	62,0	44,0	14,7	32,0	29,0	800 1100	—	6400 4400	9000	—	34,0 68,0	—
565	Simplon BBC SLFW		1907	2	367	D	68,0	68,0	17,0	33,0	35,0	1100 1700	—	11500 6700	—	13000	26,0 69,0	—
566	Simplon BBC SLFW		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 BBC —		1911	5	—	2 A	26,0	26,0	13,0	13,0	13,0	320	220	3450	2350	—	25,0	25,
567	Vác-Gödöllő SSW Ring- hoffer		1911	4	—	B + B	47,0	47,0	11,8	24,0	23,0	480	—	4320	—	—	30,0	—
—	Wiener Stadtb. Krizik Steg		1906	1	—	2 A	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		Länge über Puffer mm	Achsstand mm		Stromart	Betriebsspannung V	Periodenzahl	Motoren		Antrieb	Gewicht kg je PS		Regelleistung PS je Lokomotivlänge	Literatur	
Trieb- rad-	Lauf- rad-		Fester	Gesamter				Anzahl	Art Spannung		Regel- leistung	Dauer- leistung			
1350	950	16000	4500	11340				2	R 420	Gm, $\ddot{U} = 1:2,25$, Kk, Kandórahmen	42,8	—	156	Thormann: SBZ 1914, Bd. 53, Nr. 2. — ETZ 1913, H. 45. — Jacquin: GC Nov. 1913. — Behn-Eschen- burg: ETZ 1912, H. 10. — RT 1914. — BIEKV 1913, Nr. 4. — Kummer: SBZ 1916, Bd. 68, Nr. 14.	
1350	—	15020	4050	10700	W	15000	$16\frac{2}{3}$	2	R 420	Gm, $\ddot{U} = 1:3,25$, Schrägstange ohne Bw	45,0	—	133	Stix: SBZ 1911, Bd. 57, Nr. 6. — GC 1911, Bd. 58, Nr. 76. — BMFO Nr. 553. — ETZ 1920, H. 21.	
1610	930	12260	4200	9300				6	R	Gdm, gefederte Hw $\ddot{U} = 1:5$, 2 Z, Kk	46,0	57,0	117	Werz: SBZ 1923, Bd. 81, Nr. 22 u. 1921, Bd. 76, Nr. 18. — Meyfarth: SBZ 1922, Bd. 80, Nr. 7. — GC Aug. 1922. — ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 46/47.	
1610	930	16240	2400	13640				8	R	Gdm, gefederte Hw $\ddot{U} = 1:5,72$, 2 Z, Kk	47,1	59,0	147		
835	—	7450	3300	3300	W	$\frac{5000}{800}$	20	1	R 225	Gm, $\ddot{U} = 1:3,9$, Schlitzkuppel- stange	83,2	—	33	Zindel: SBZ 1911, Bd. 58, Nr. 3 u. EKB 1911, H. 21.	
1070	710	11500	1550	8000				2	Déri 950	Gm, Dreieck ohne Bw	92,0	—	52	Die Rhätische Bahn. Orell-Füssli, Zürich 1915. — Sachs: Eu.M 1919, H. 23.	
1070	710	8700	2600	6000				1	Déri 950	Gm, Schräg- stange, Bw	122,0	—	35	Eng 1913, Okt. — Zf.KB 1914, Nr. 1 — Die Rhätische Bahn. Orell-Füssli, Zürich 1915.	
1070	710	11000	2400	8200	W	11000	$16\frac{2}{3}$	2	Rd 300	Gm, $\ddot{U} = 1:2,65$, 2 Z, Schräg- stange, Bw	92,3	—	55	Engel: SETZ 1914, H. 9. — Königs- hagen: AEGM 1919, Nr. 7. — SBZ 1917, Bd. 70, Nr. 16. — Die Rhätische Bahn. Orell-Füssli, Zürich 1915.	
1070	710	11104	2400	8200				2	R 280	Gm, \ddot{U} , 2 Z, Kk, Schräg- stange, Bw	70,5	—	72		
1070	710	10800	2400	8200				2	R 390	Gm, $\ddot{U} = 1:4,15$, 2 Z, Kk, Schräg- stange, Bw	82,6	—	55	ERJ 1914, Bd. 43, Nr. 26. — SETZ 1916, H. 11. — Eu.M 1915, H. 36.	
1070	710	—	—	—				2	Déri	Dreieckstange	55,0	66,0	—	Dürler: SBZ 1922, Bd. 79, Nr. 20.	
1070	—	13300	3275	10350	W	11000	$16\frac{2}{3}$	2	R 510	Gm, $\ddot{U} = 1:4,34$ Schrägstange	55,0	66,0	90	Dürler: SBZ 1922, Bd. 79, Nr. 14. — Schröder: BBCM 1922, Nr. 5.	
1050	—	9400	2000	6300	W	15000	15	2	R	Gm, $\ddot{U} = 1:3,08$, Schlitzkuppel- stange	84,0	—	53	ETZ 1907, H. 4. — SETZ 1908, Nr. 15. — SBZ 1909, Bd. 54, Nr. 4. — Eu.M 1909, H. 23.	
1640	850	12320	2400	9700				15	2	I 3000	Gm, Kandó- rahmen	77,5 56,9	—	90 65	ETZ 1906, H. 8. — 1907, H. 10. — Verebely: Eu.M 1919, H. 10.
1250	—	11640	4600	8000	D	3000	15	2	IK 3000	Gm, Kuppel- rahmen	61,8 46,0	—	95 146	Thomann-Schnetzler: ZVDI 1909, S. 607. — EKB 1909, H. 29. — SETZ 1907, H. 37. — Kummer: SBZ 1909, Bd. 54, Nr. 17.	
1250	850	12500	1800	8800				15	2	I 3000	Gm, Zwei- stangen, Schlitz- kuppelstange	82,0 31,6	—	89 224	Verebely: Eu.M 1919, H. 20.
1200	—	7700	4000	4000		5200	25	2	I 450	Ugm, $\ddot{U} = 1:4,5$	81,4	118,0	42	TM Bd. VIII, Nr. 5.	
800	—	10340	2000	6640	W	15000	15	2	R	Gm, $\ddot{U} = 1:3,44$, Schlitzkuppel- stange	98,0	—	46	EKB 1912, H. 15 u. 1913, H. 17.	
—	—	—	—	—	G	$2 \times$ $\times 1500$	—	4	R 750	Ugdm, $\ddot{U} = 1:4,33$	55,8	—	—	Rosa-List: Eu.M 1906, H. 46. — ETZ 1906, H. 46.	

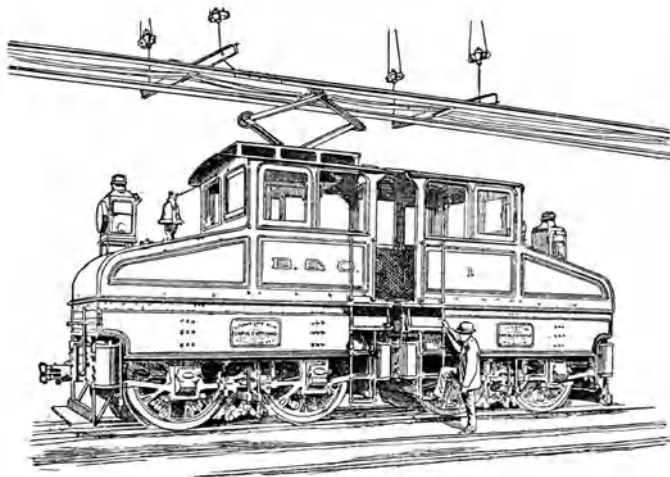


Abb. 451. Baltimore—Ohio, 1895, LE — 1.

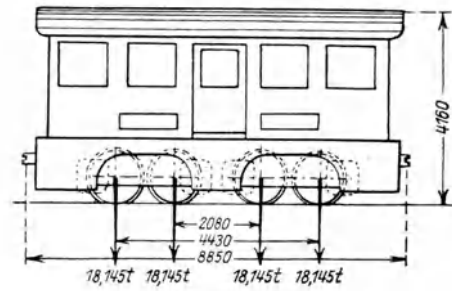


Abb. 452. Baltimore—Ohio, 1903/6, LE — 2.

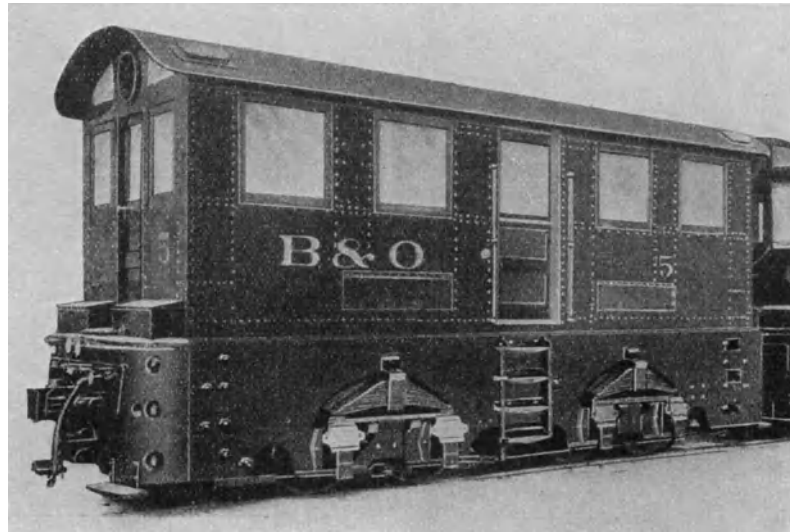


Abb. 452a. Baltimore—Ohio, 1903/6, LE — 2.

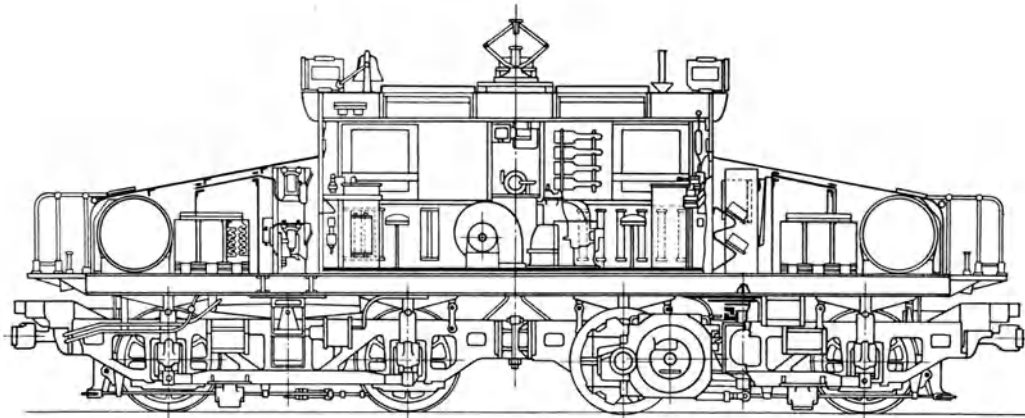


Abb. 453. Baltimore—Ohio, 1910/12, OE 1.

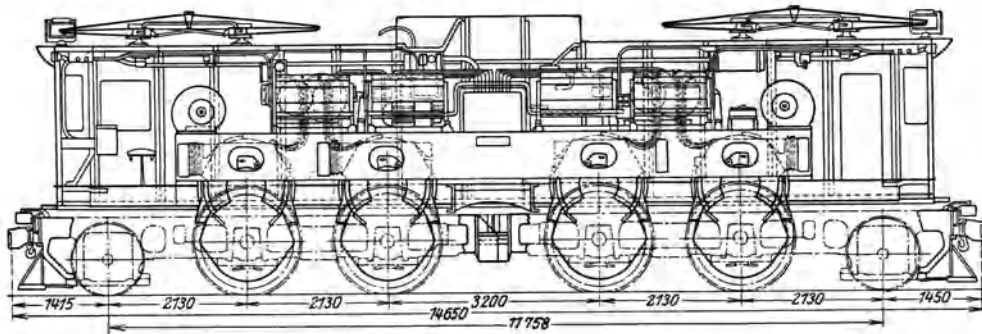


Abb. 454. Boston—Maine, Hoosac-Tunnel, 1911.

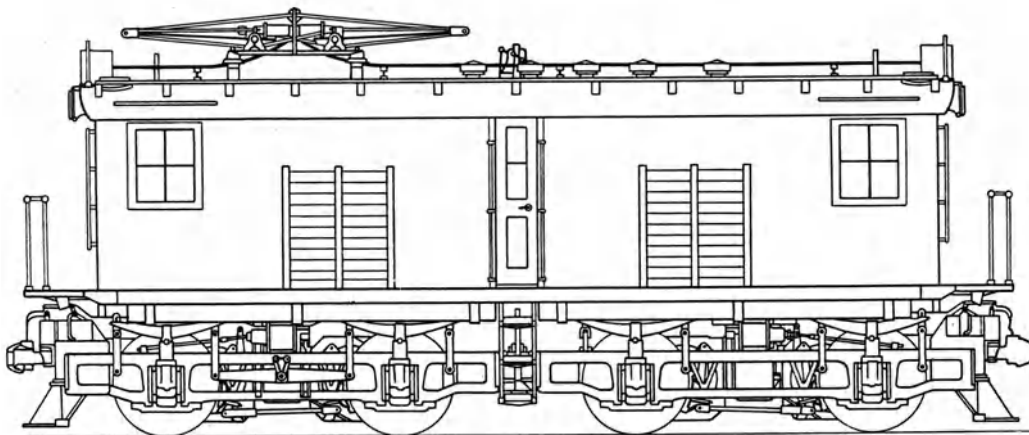


Abb. 455. Butte, Anaconda und Pacific, 1913, S. 46. — Canadian Northern.

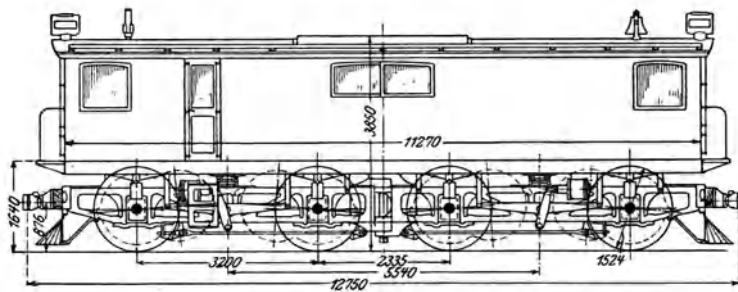


Abb. 456. Great Northern, Cascade-Tunnel, 1904.

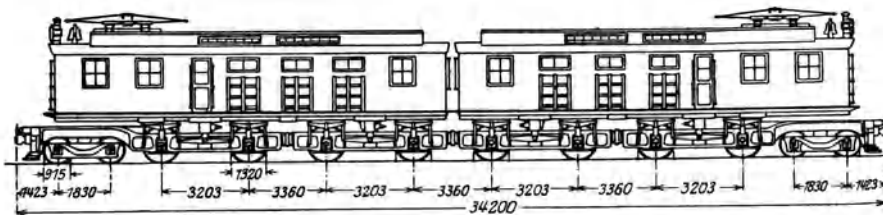


Abb. 457. Chicago, Milwaukee und St. Paul, 1914, GEC.

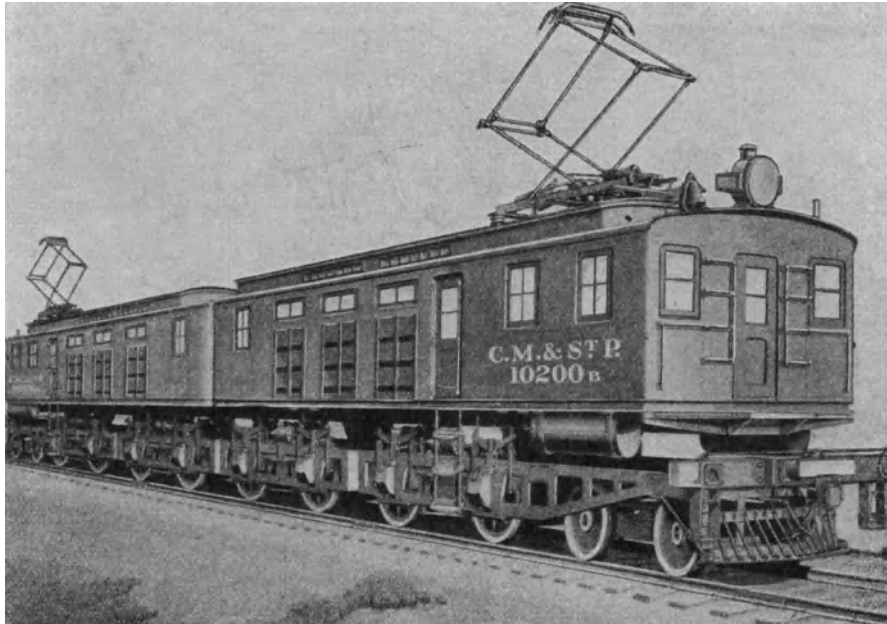


Abb. 457 a. Chicago, Milwaukee und St. Paul, 1914, GEC.

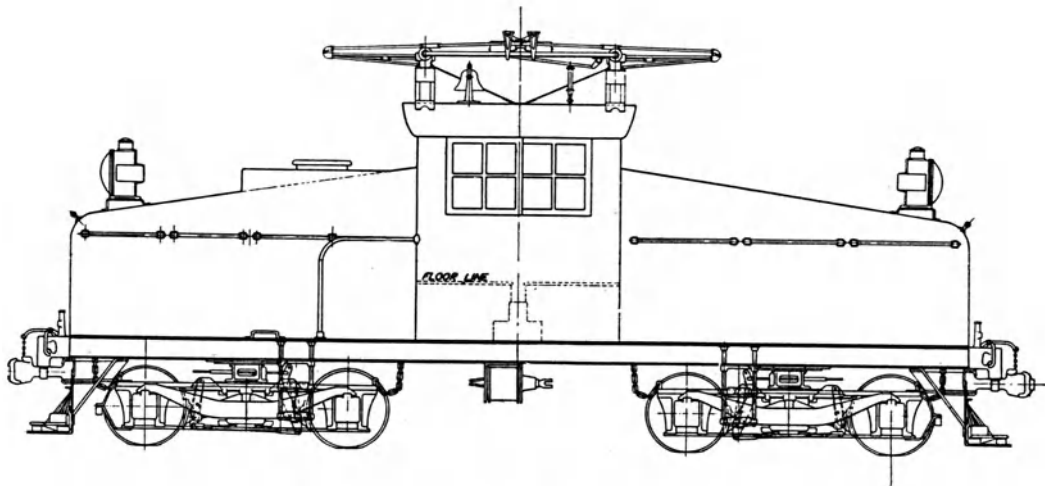


Abb. 458. Chicago, Milwaukee und St. Paul, Vershub, 1916.

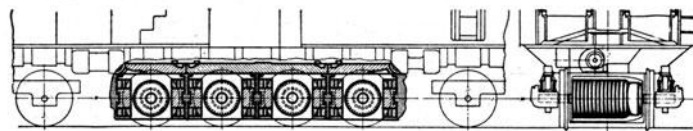


Abb. 459. Chicago, Milwaukee und St. Paul, 1918, Reihe 10251. GEC.

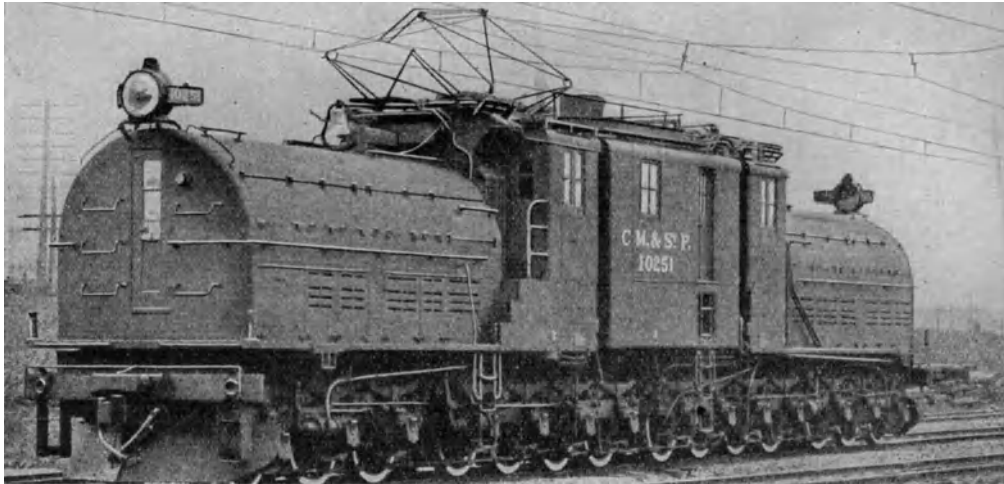


Abb. 459 a. Chicago, Milwaukee und St. Paul, 1918, Reihe 10251. GEC.

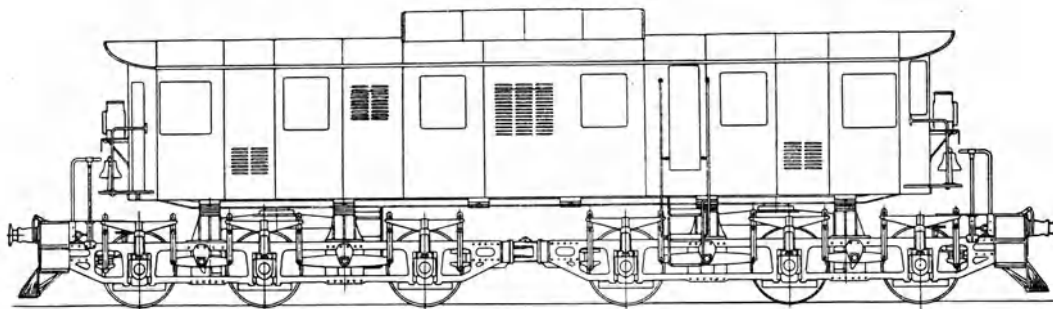


Abb. 460. Staatsbahn Chile, GZ.

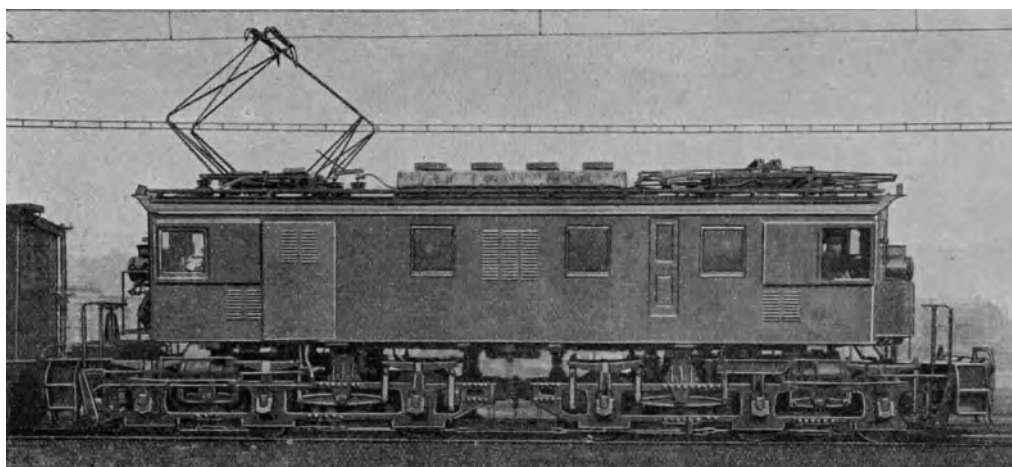


Abb. 460 a. Staatsbahn Chile, GZ.

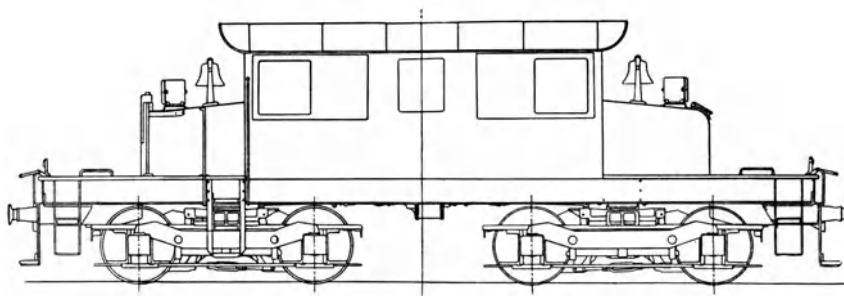


Abb. 461. Staatsbahn Chile, Verschublokomotive.

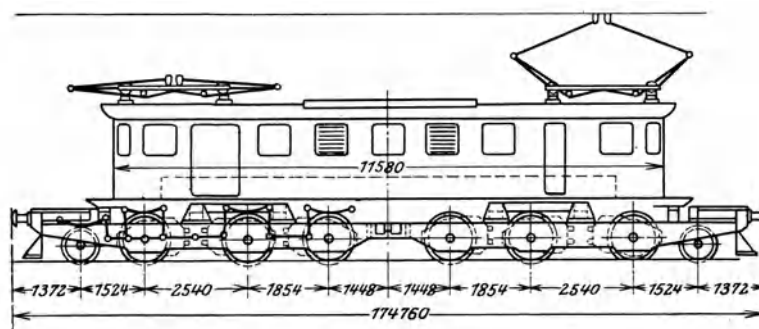


Abb. 462. Staatsbahn Chile, SZ.

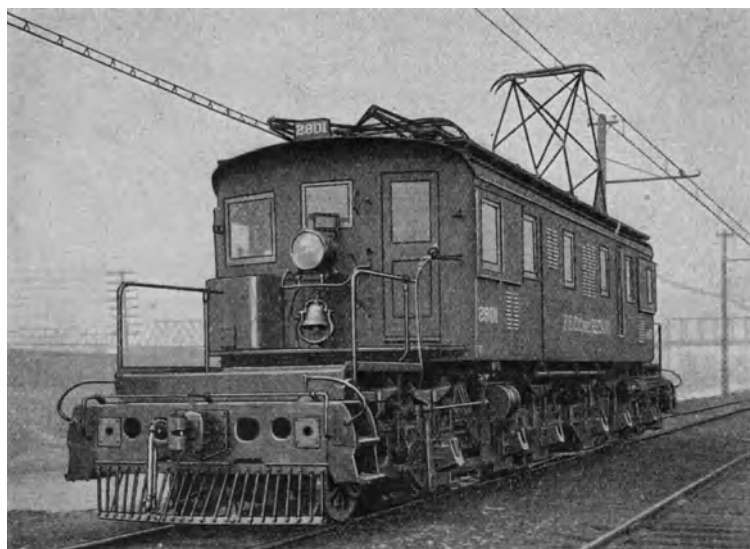


Abb. 462a. Staatsbahn Chile, SZ.

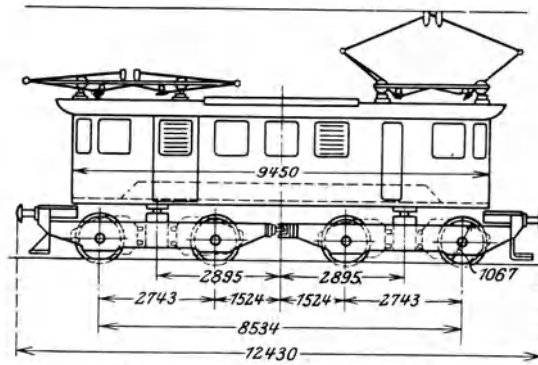


Abb. 463. Staatsbahn Chile, PZ.

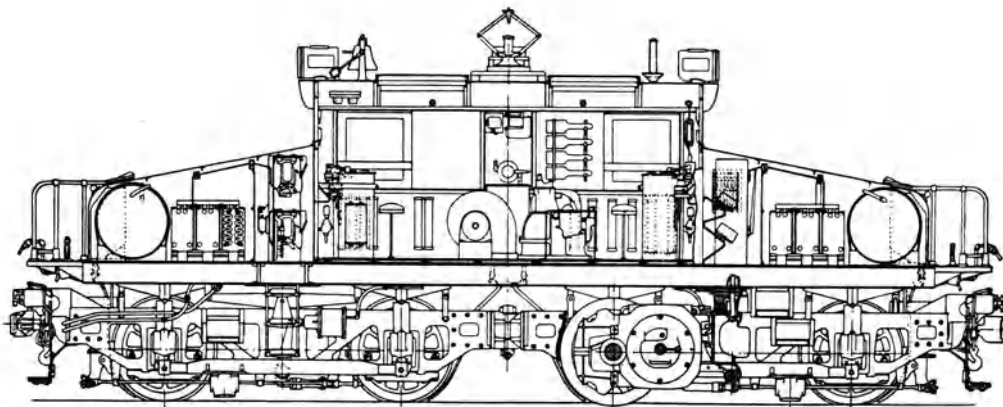


Abb. 464. Michigan-Central, Detroit-Tunnel, 1909/14.



Abb. 464a. Michigan Central, Detroit-Tunnel, 1909/14.

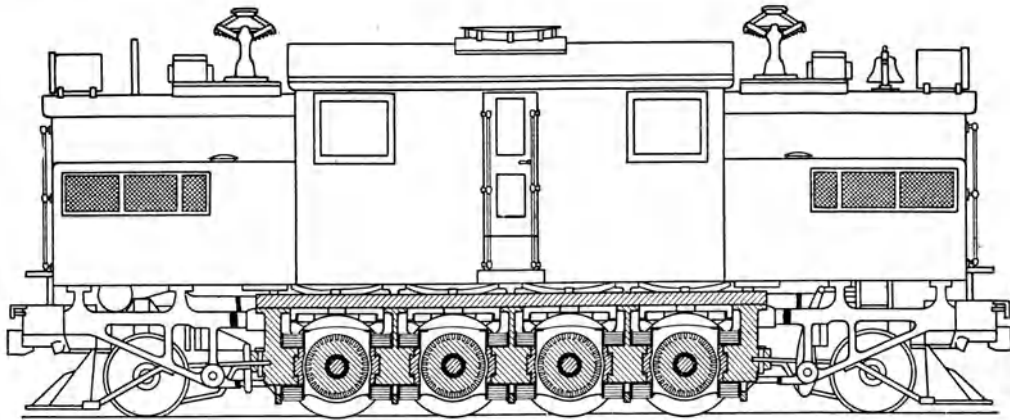


Abb. 465. New York-Central—Hudson River, 1906 (umgebaut).

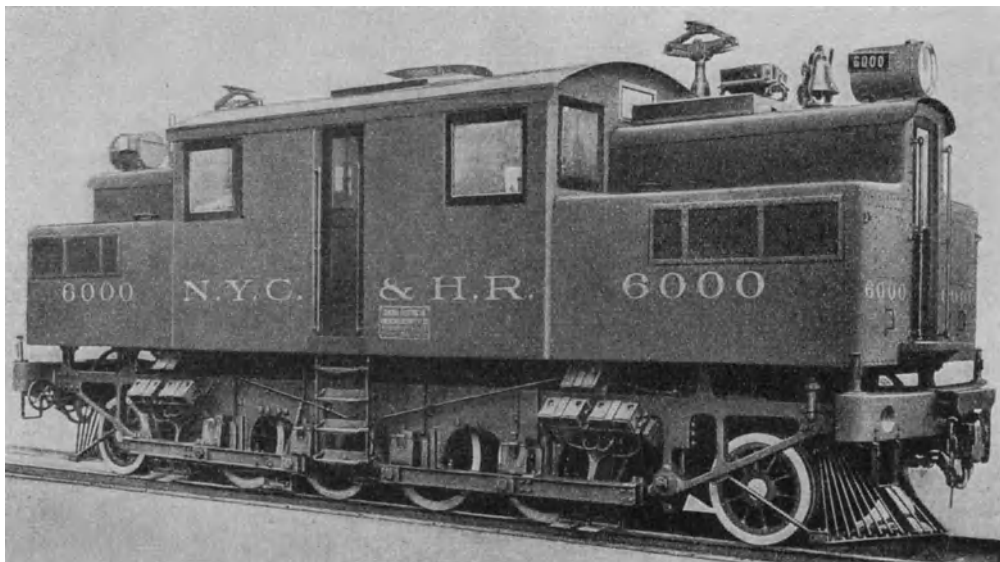


Abb. 465 a. New York-Central—Hudson River, 1906.

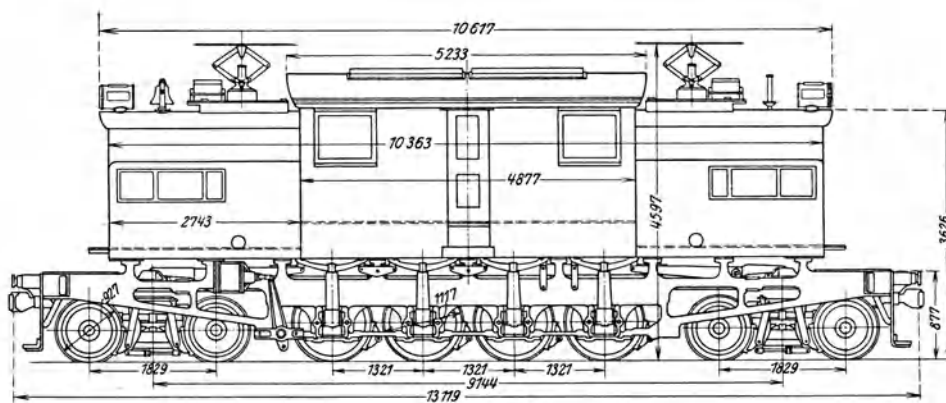


Abb. 466. New York-Central—Hudson River, 1906/9.



Abb. 466a. New York-Central—Hudson River, 1906/9.

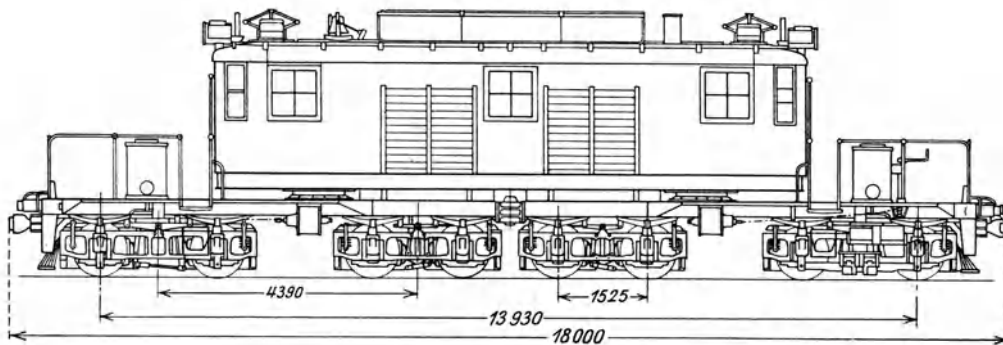


Abb. 467. New York-Central—Hudson River, 1914 — T₂.

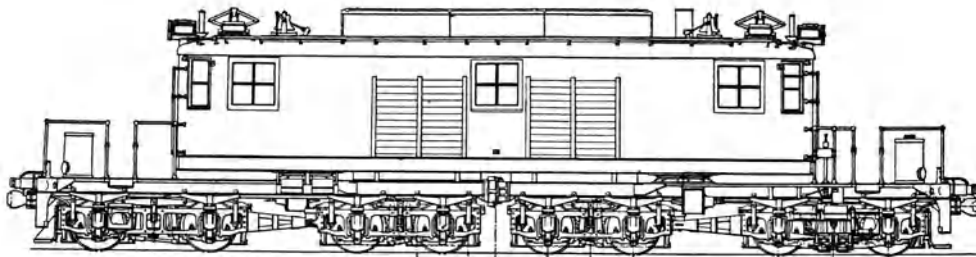


Abb. 468. New York-Central—Hudson River, 1913 — T₁.

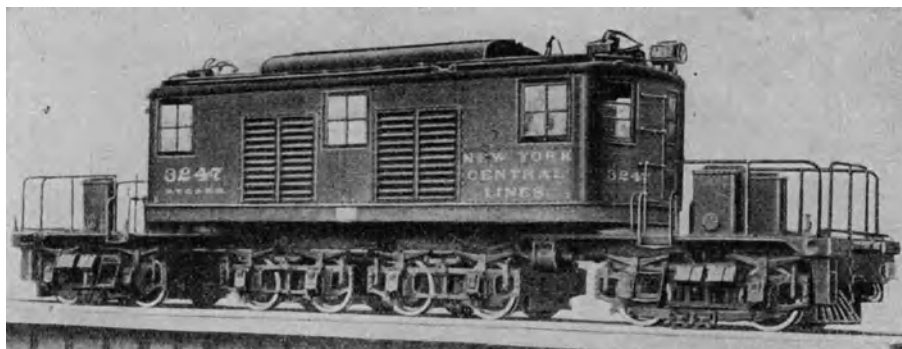


Abb. 468a. New York-Central—Hudson River, 1913 — T₁.

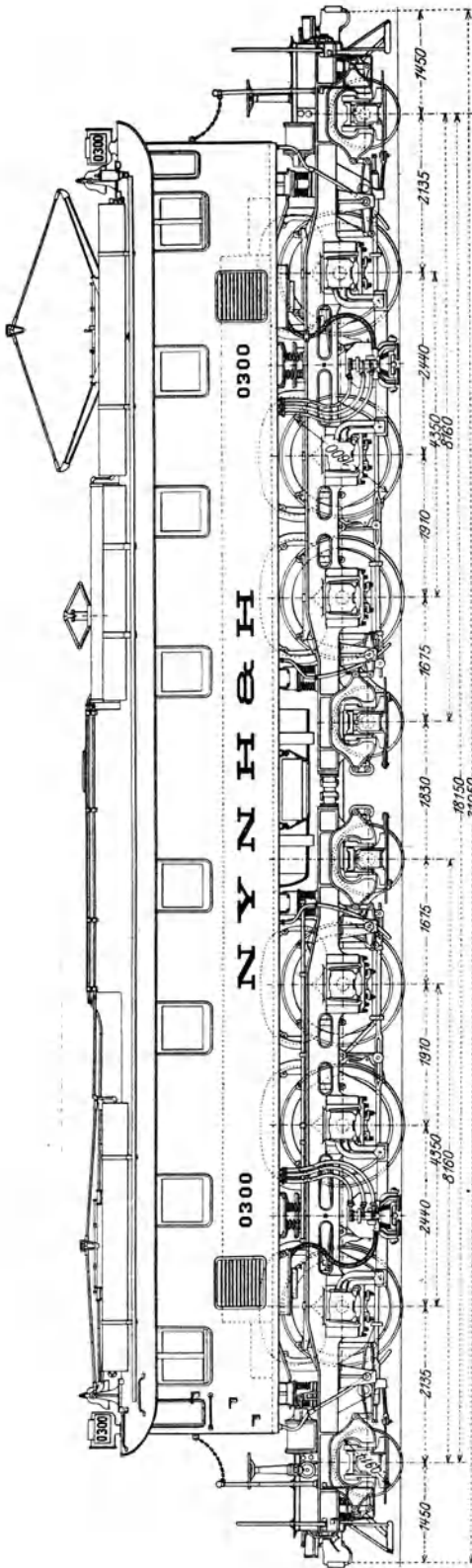


Abb. 469. New York, New-Haven und Hartford 1918/23.

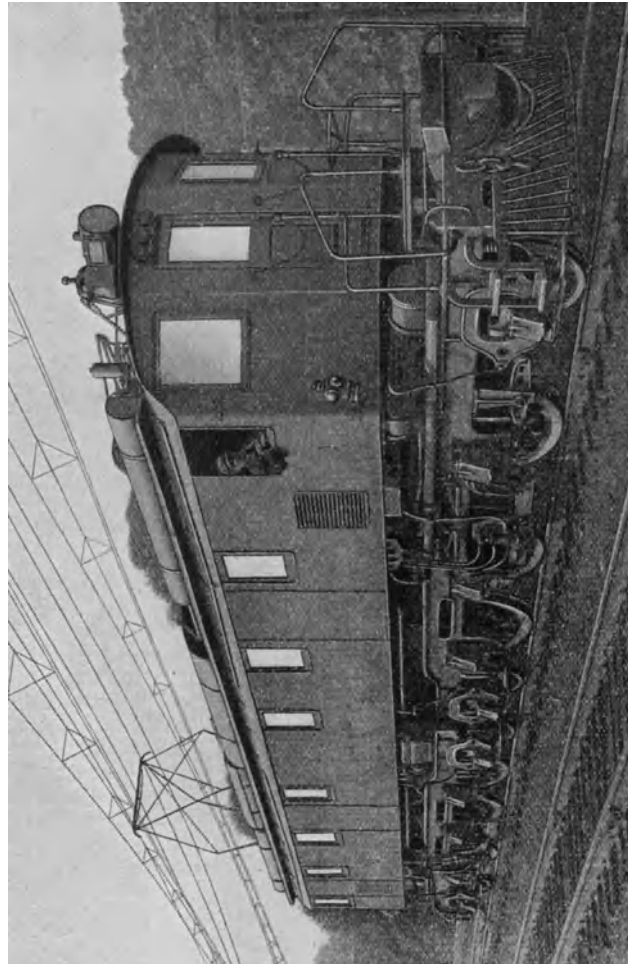


Abb. 469 a New York, New-Haven und Hartford 1918/23.

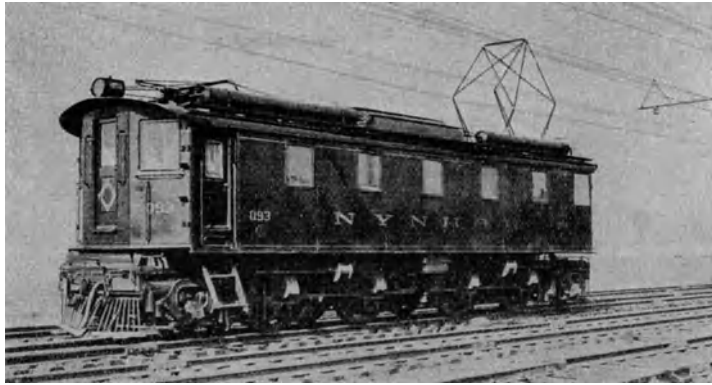


Abb. 470. New York, New-Haven und Hartford, 1916, Reihe 1897/98.

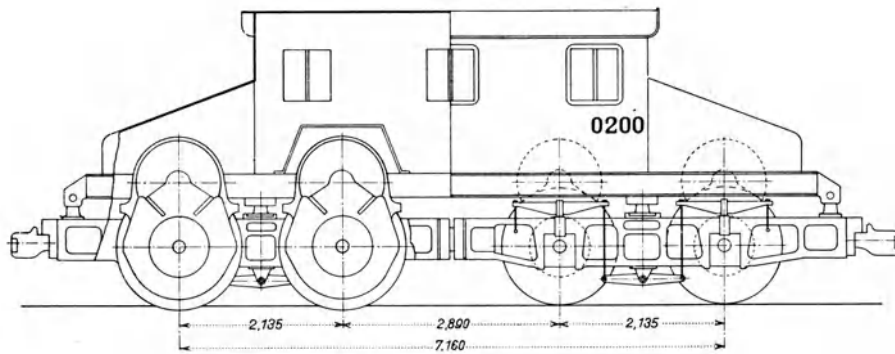


Abb. 471. New York, New-Haven und Hartford, 1911/12, Reihe 0215/0200.

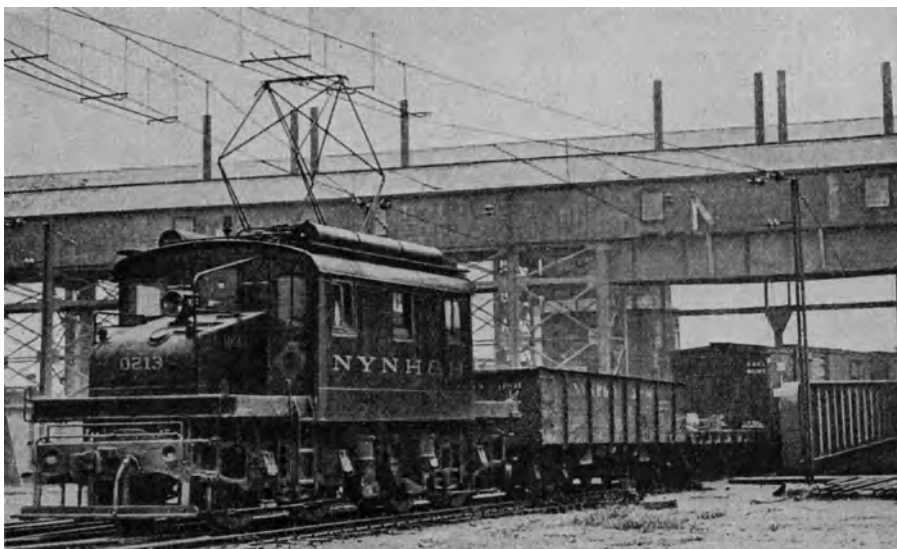


Abb. 471a. New York, New-Haven und Hartford, 1911/12, Reihe 0215/200.

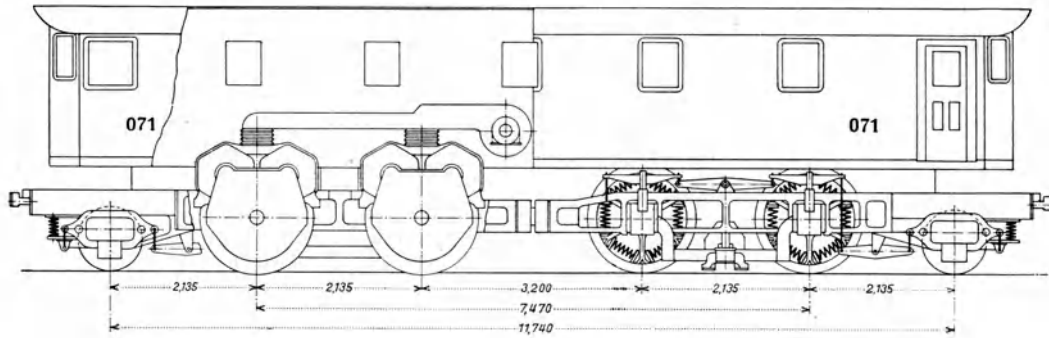


Abb. 472. New York, New-Haven und Hartford, 1910/13, Colonial — 073.

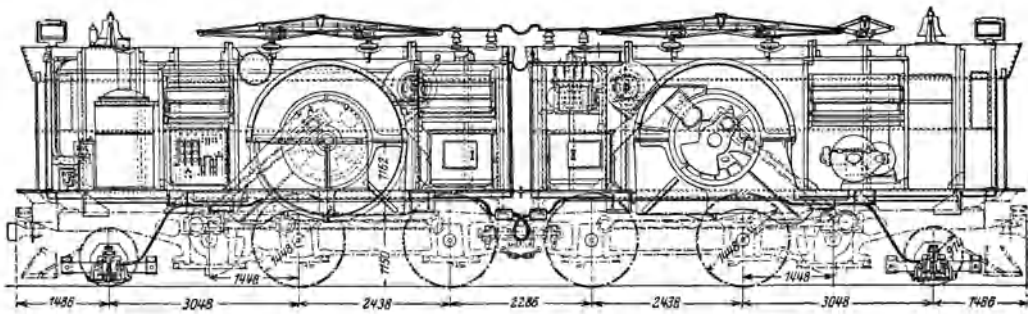


Abb. 473. New York, New-Haven und Hartford, 1910, Reihe 070.

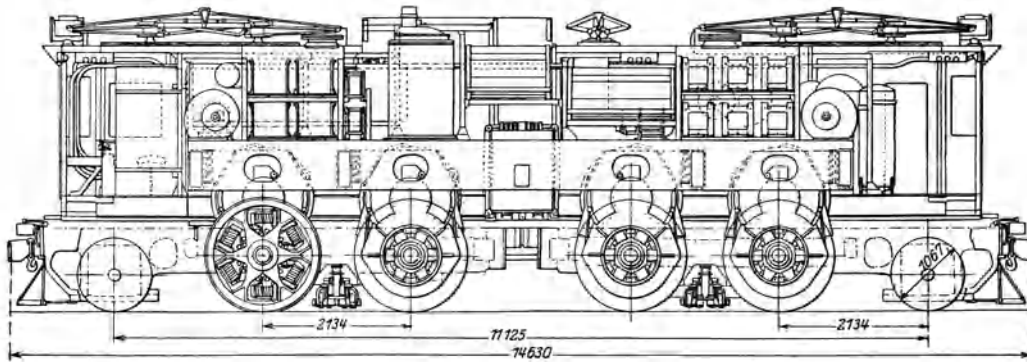


Abb. 474. New York, New-Haven und Hartford, 1910/11, Reihe 071/072.

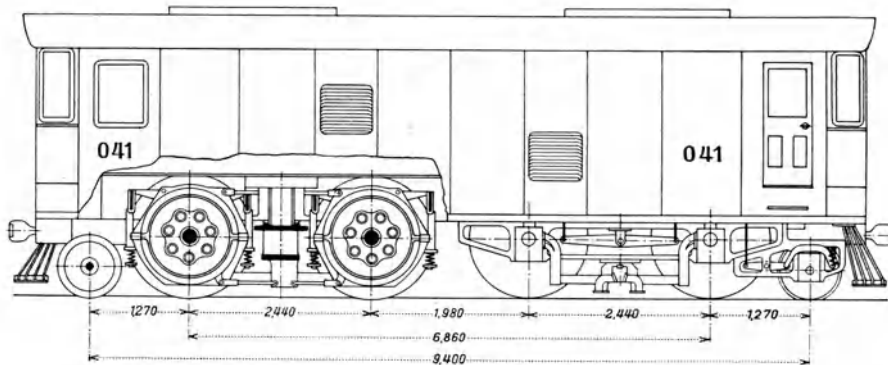


Abb. 475. New York, New-Haven und Hartford, 1907, Reihe 0—41.

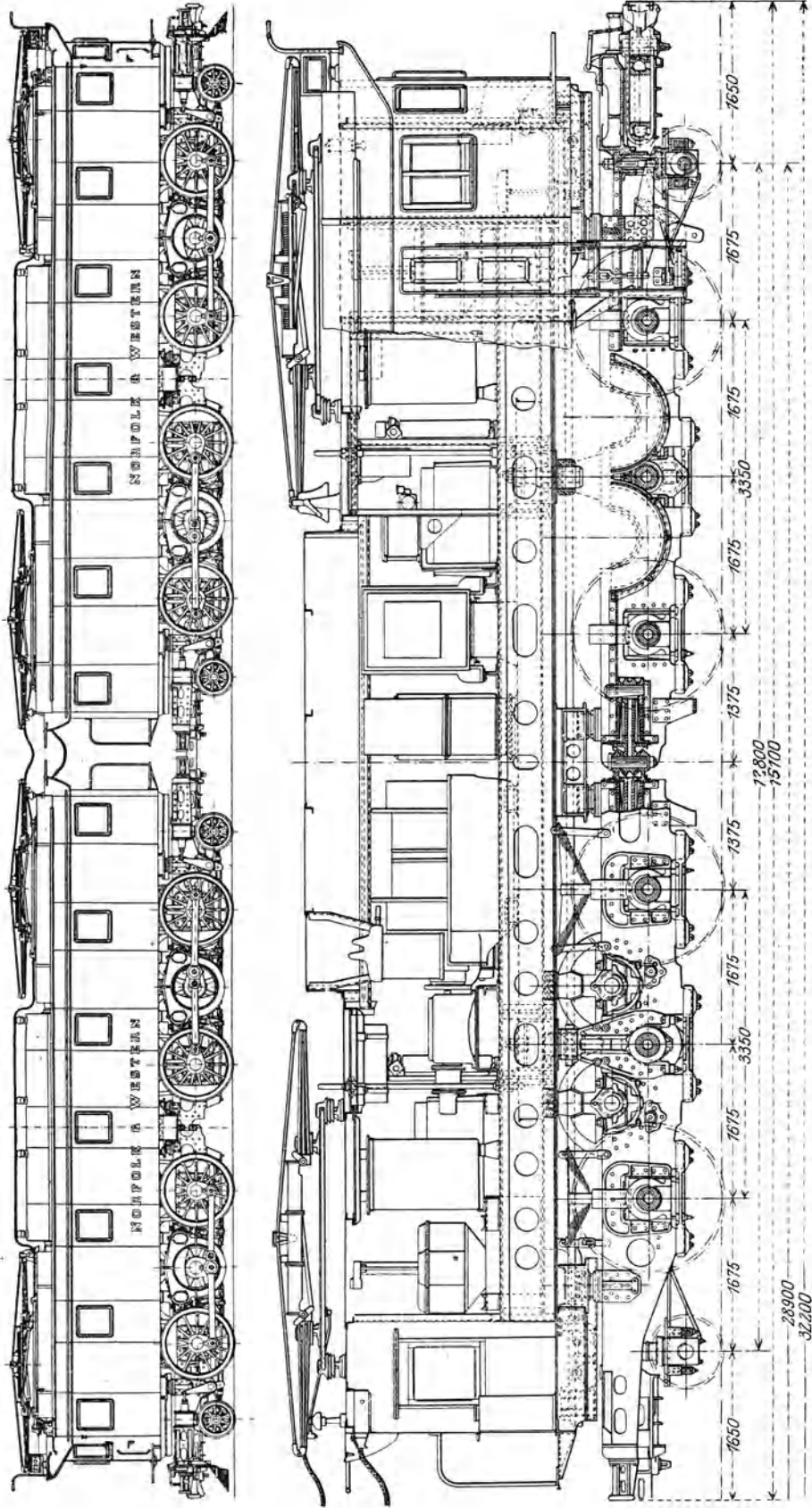


Abb. 476. Norfolk—Western, 1915.

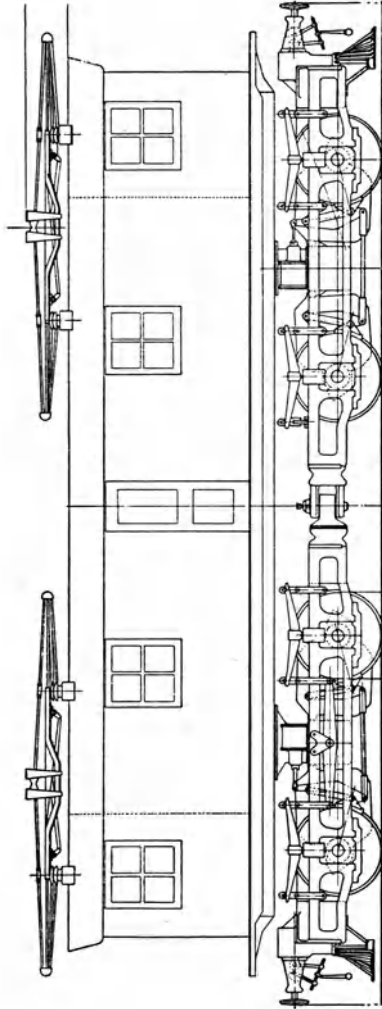


Abb. 477. Paulista, GEC, Reihe — 204, 1921.

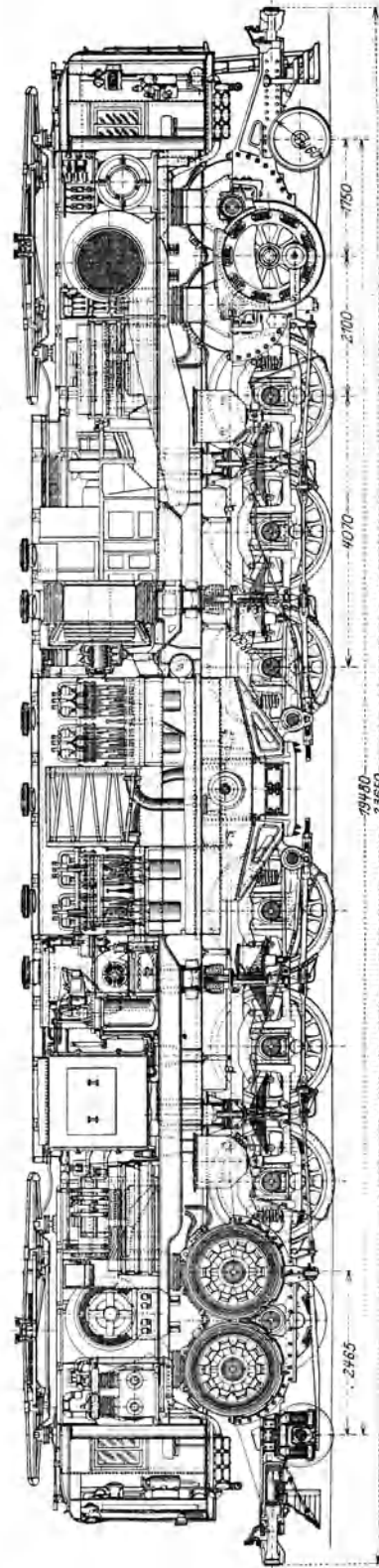


Abb. 478. Pennsylvania, 1917.

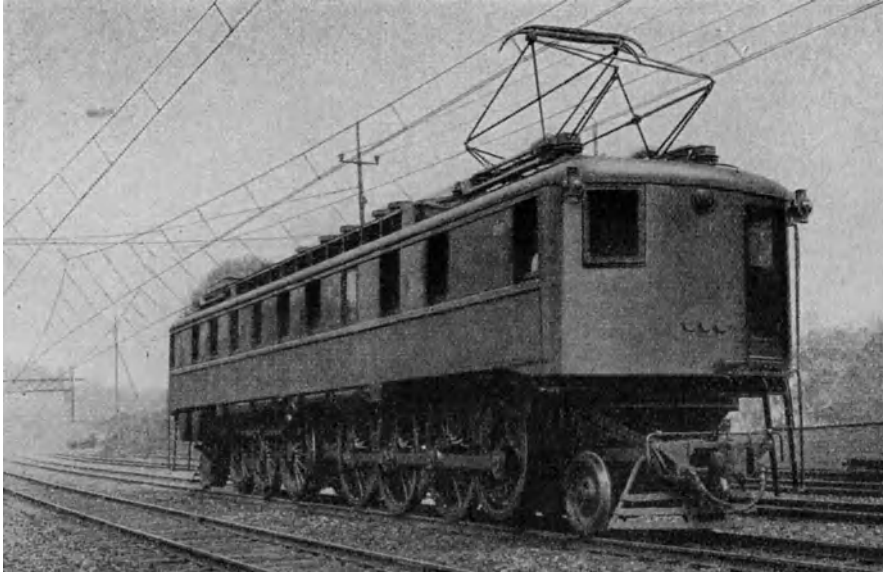


Abb. 478 a. Pennsylvania, 1917.

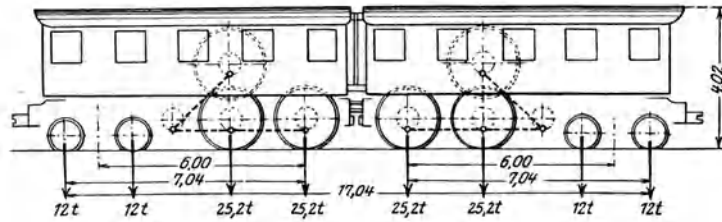


Abb. 479. Pennsylvania, 1910.



Abb. 479 a. Pennsylvania, 1910.

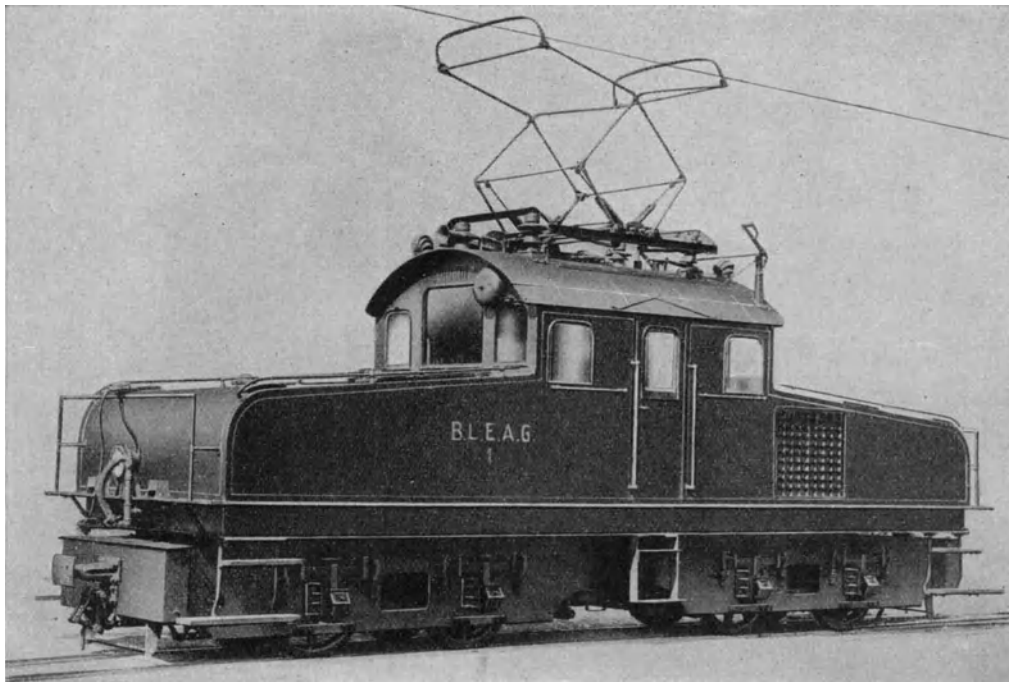


Abb. 480. Albtal, 1915.

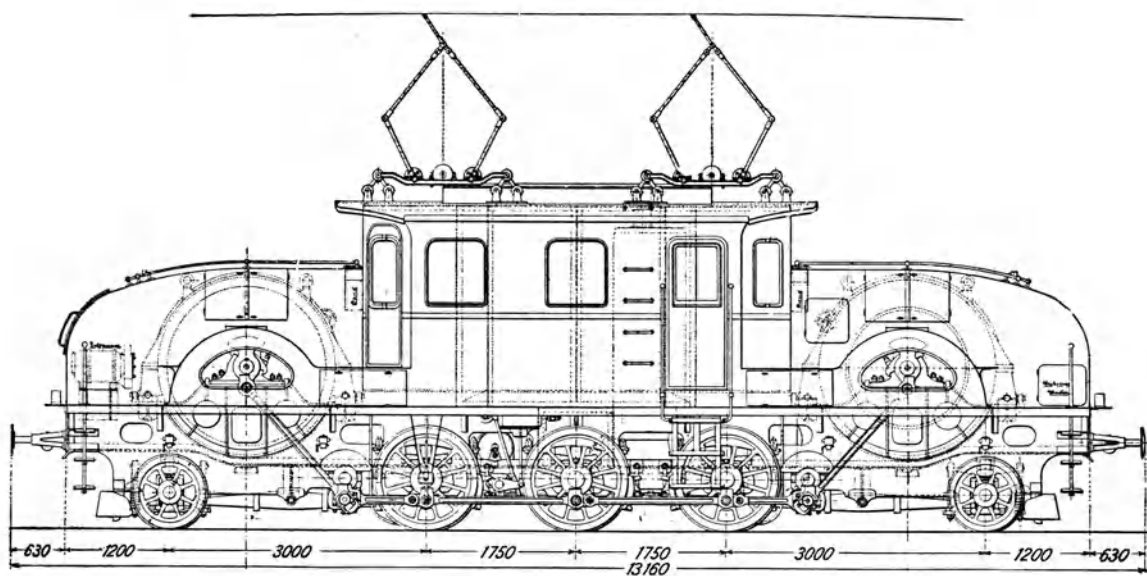


Abb. 481. Baden, Wiesental (Probemaschine 1911).

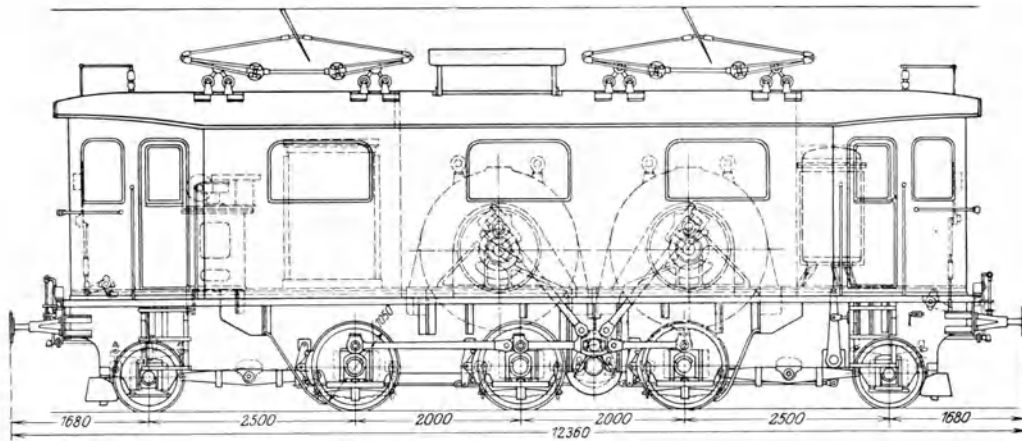


Abb. 482. Baden, Wiesental, 1912, SSW.

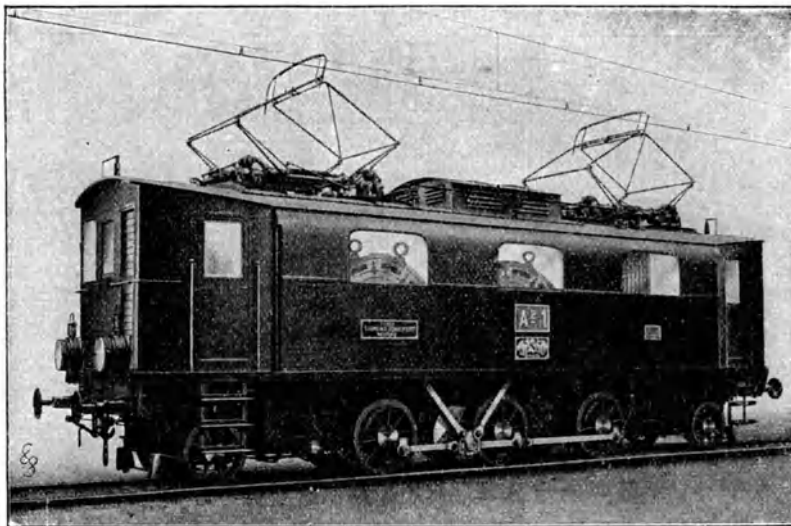


Abb. 482 a. Baden, Wiesental, 1912, SSW.

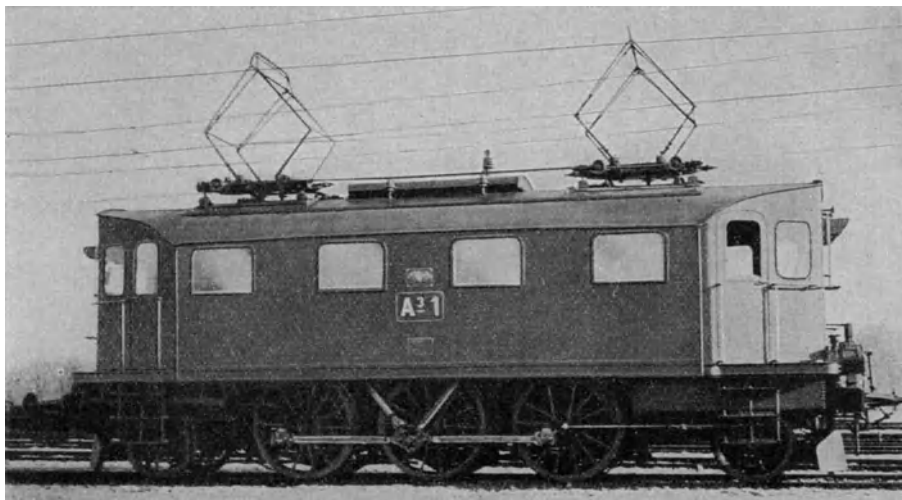


Abb. 483. Baden, Wiesental, 1913, BCM.

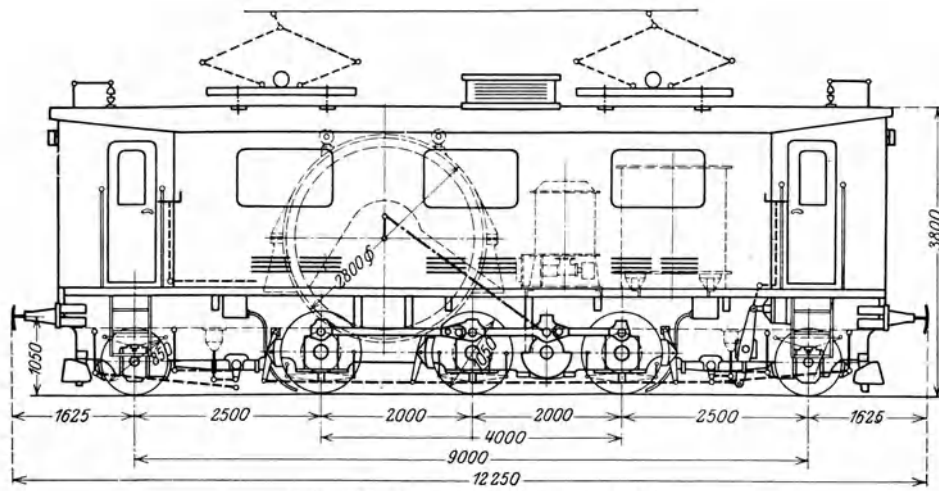


Abb. 484. Bayern, Mittenwald, 1913.

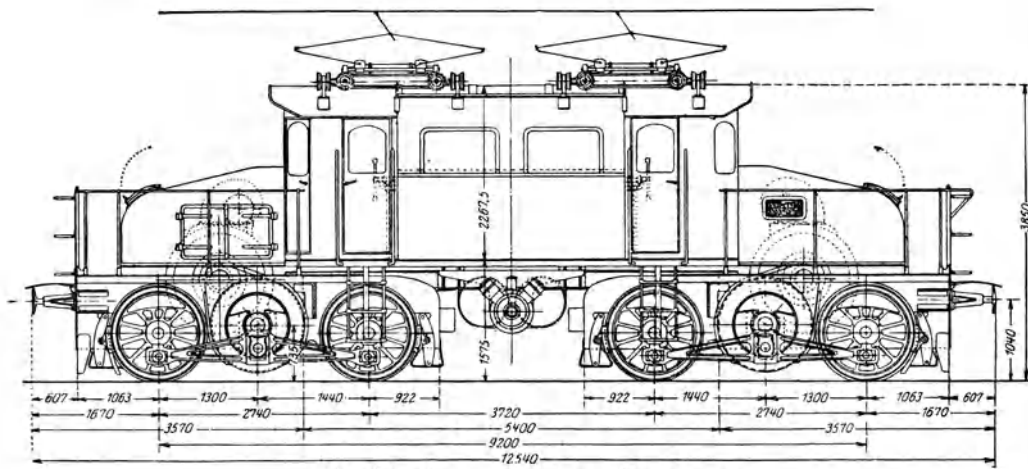


Abb. 485. Bayern, Salzburg—Freilassing.

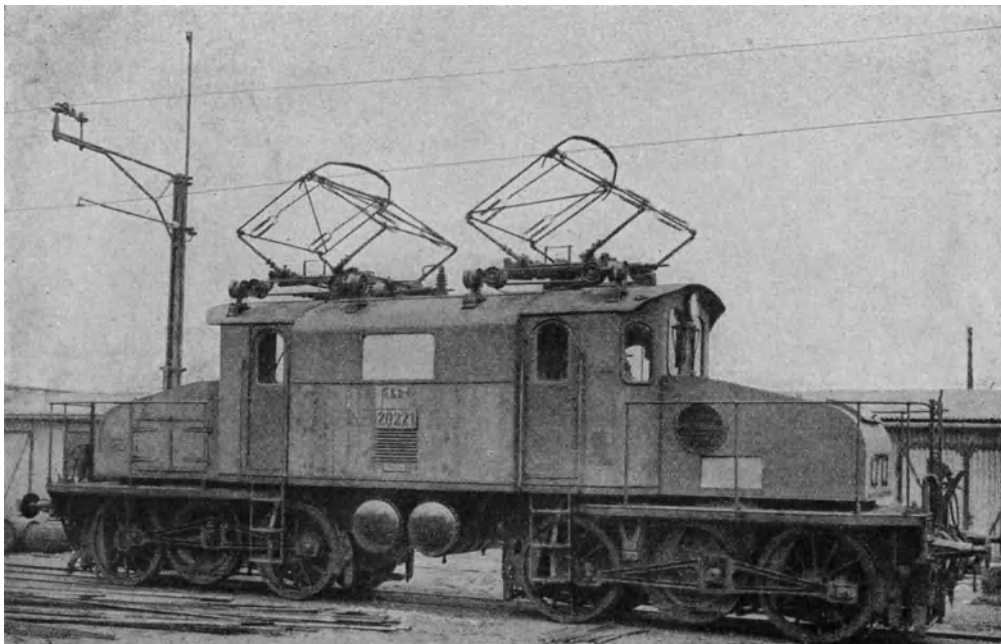


Abb. 485 a. Bayern, Salzburg—Freilassing, BBCM.

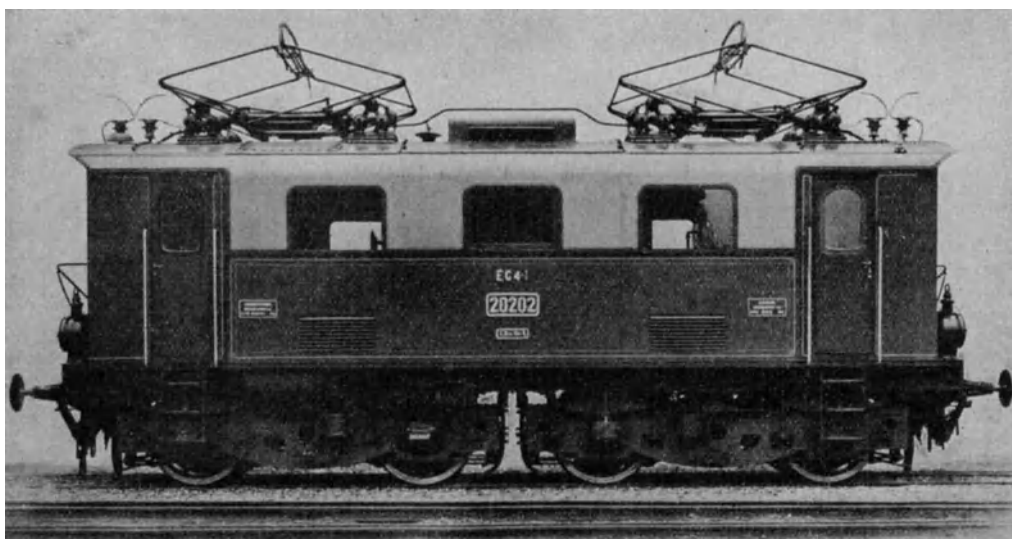


Abb. 486. Bayern, Salzburg—Freilassing, BEW.

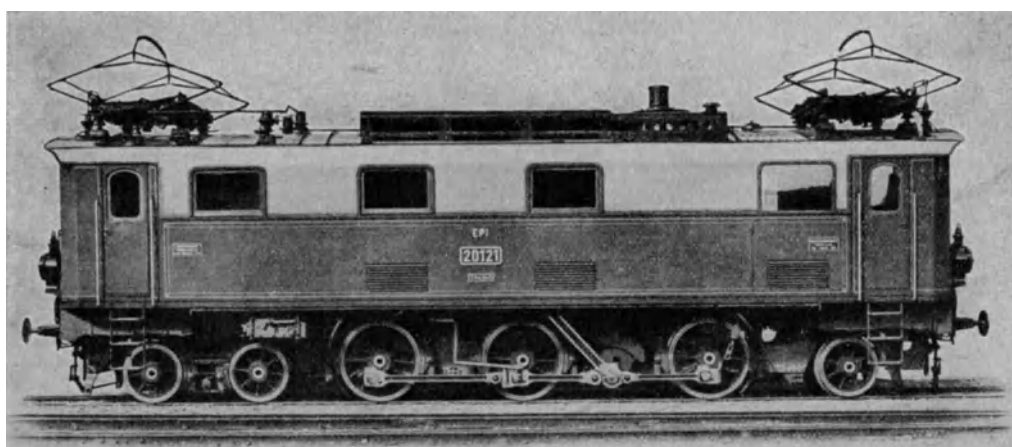


Abb. 487. Bayern, Salzburg—Freilassing.

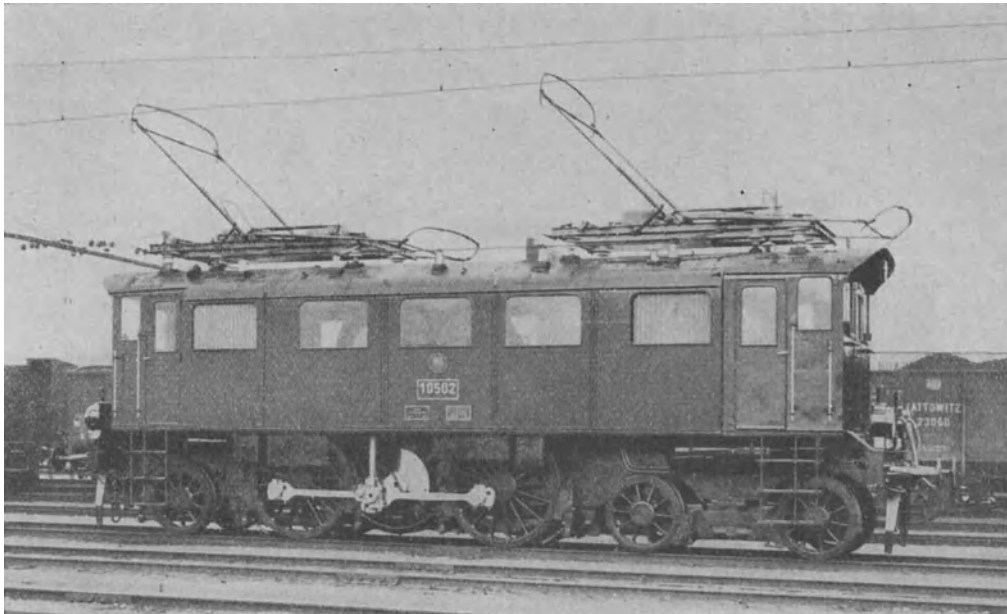


Abb. 488. Preußen, ES 2.

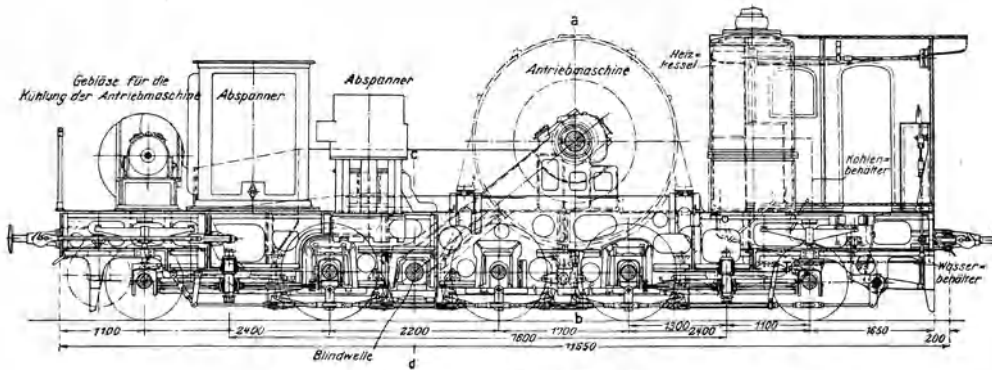


Abb. 489. Preußen, ES. 6.

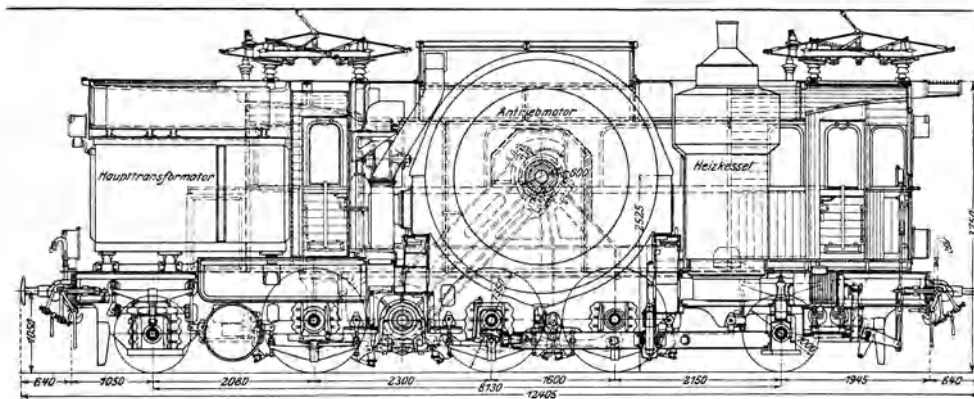


Abb. 490. Preußen, ES 9—19.

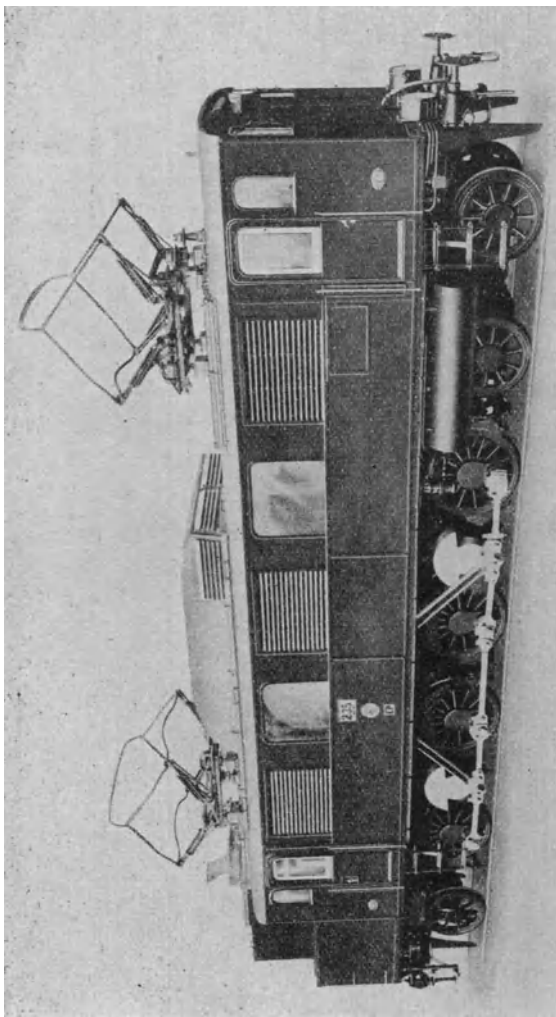


Abb. 492a. Preußen, EP 235.

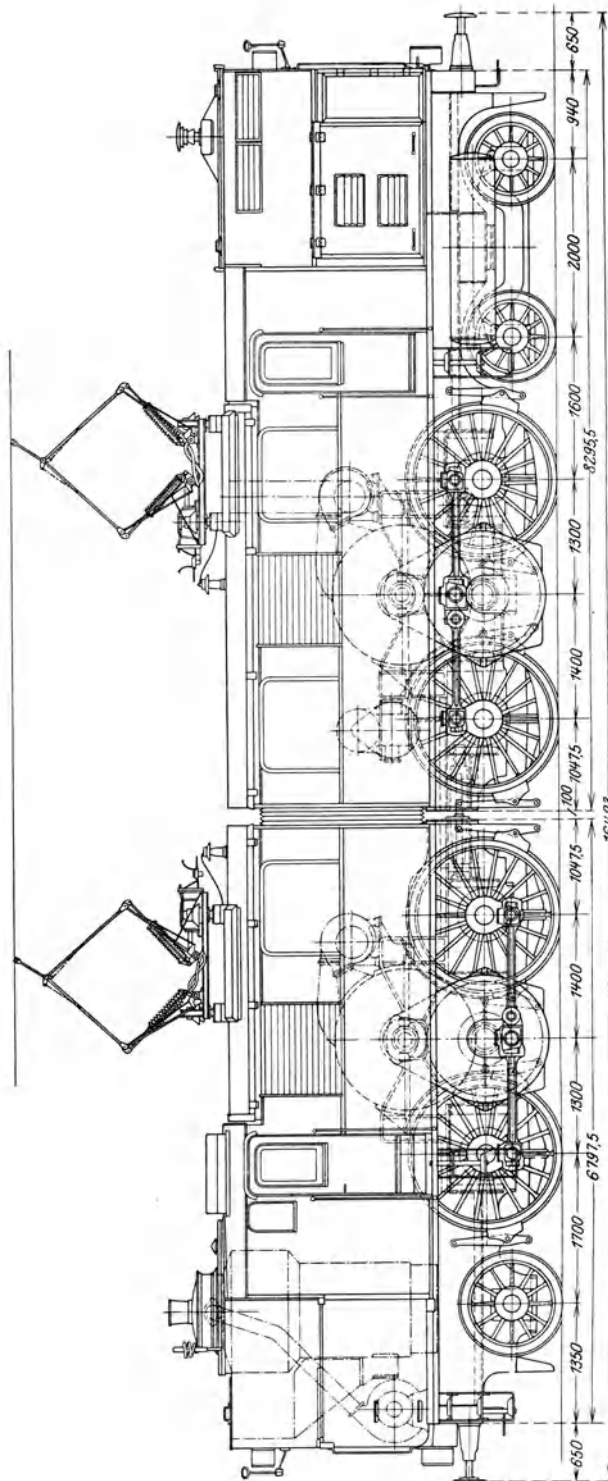


Abb. 493. Preußen, EP 209/12 und 233/37.

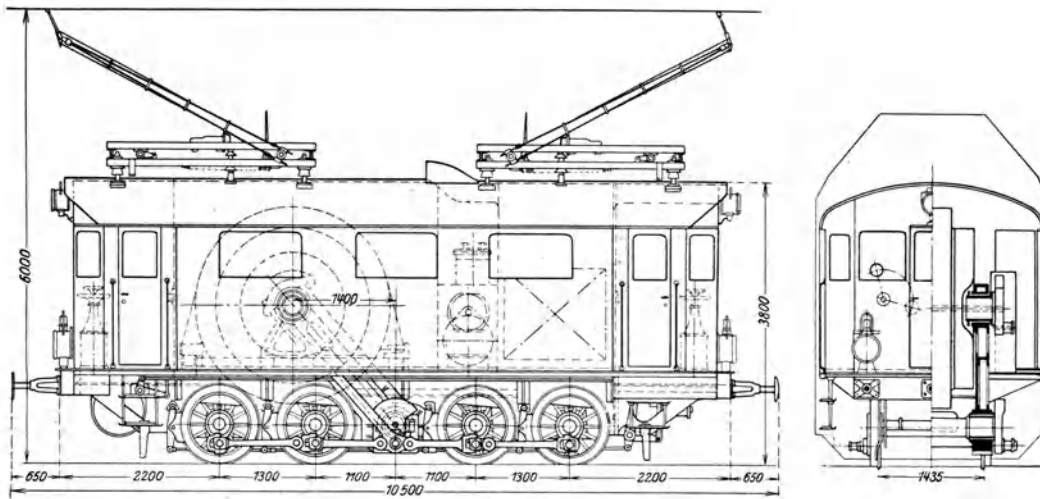


Abb. 494. Preußen, EG 502—508.

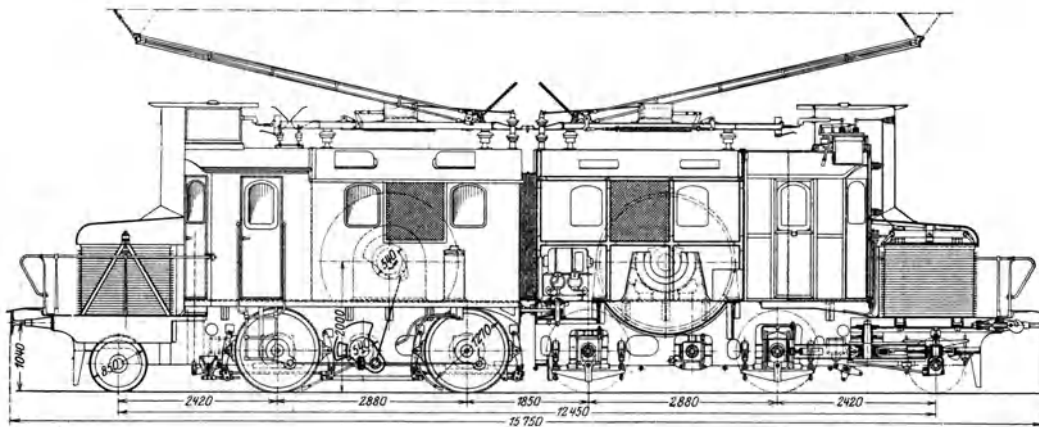


Abb. 495. Preußen, EG 509/510.

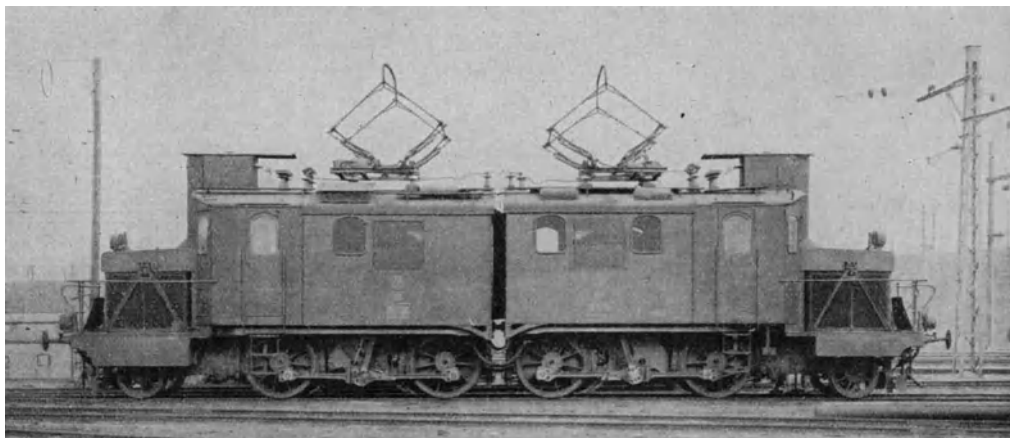


Abb. 495 a. Preußen, EG 509/10.

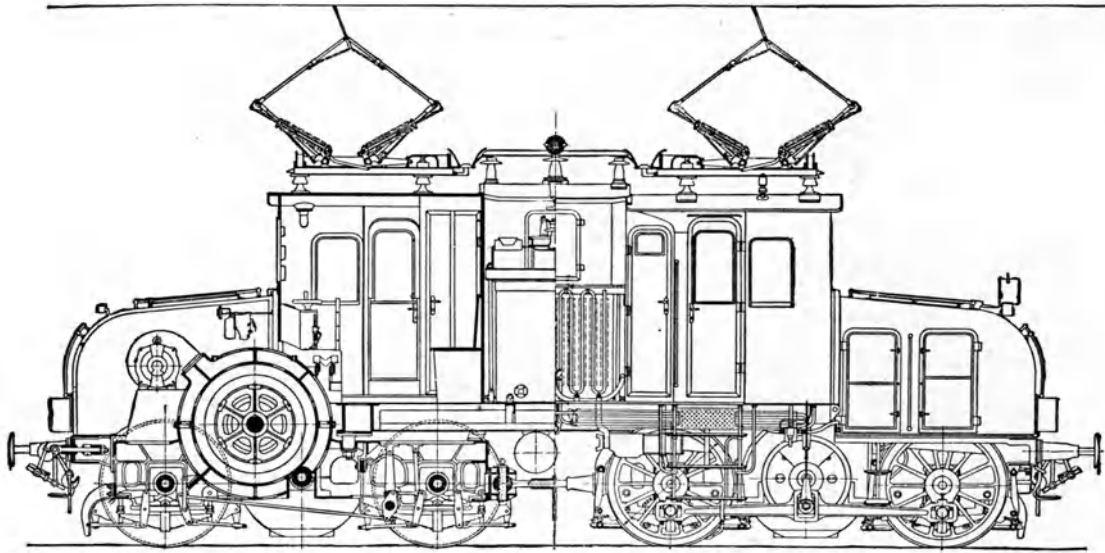


Abb. 496. Preußen, EG 511—537.

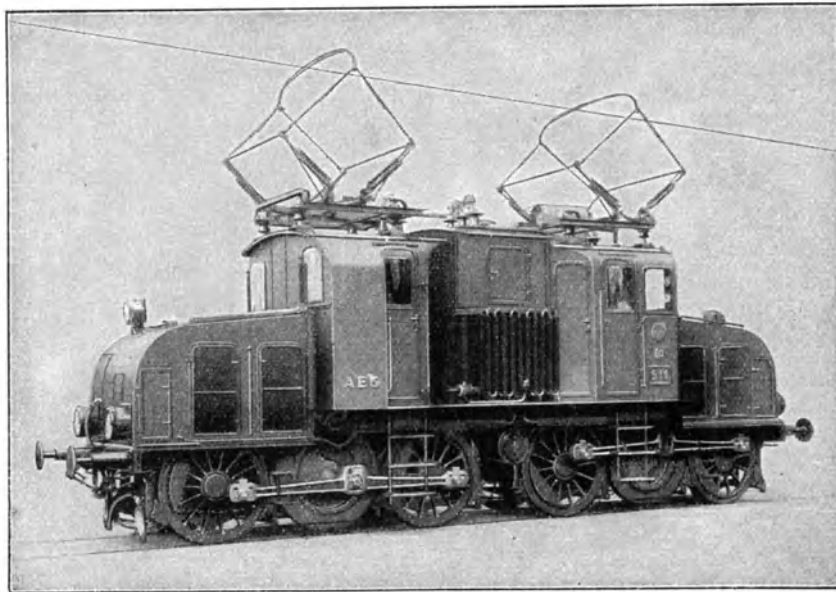


Abb. 496 a. Preußen, EG 511—537.

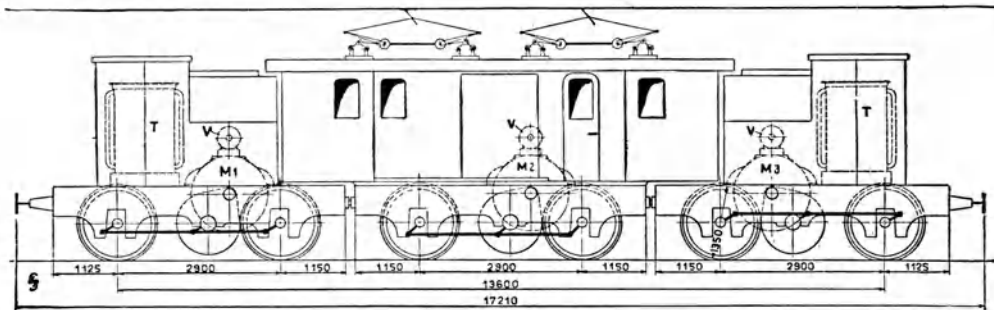


Abb. 497. Preußen, EG 538—550.

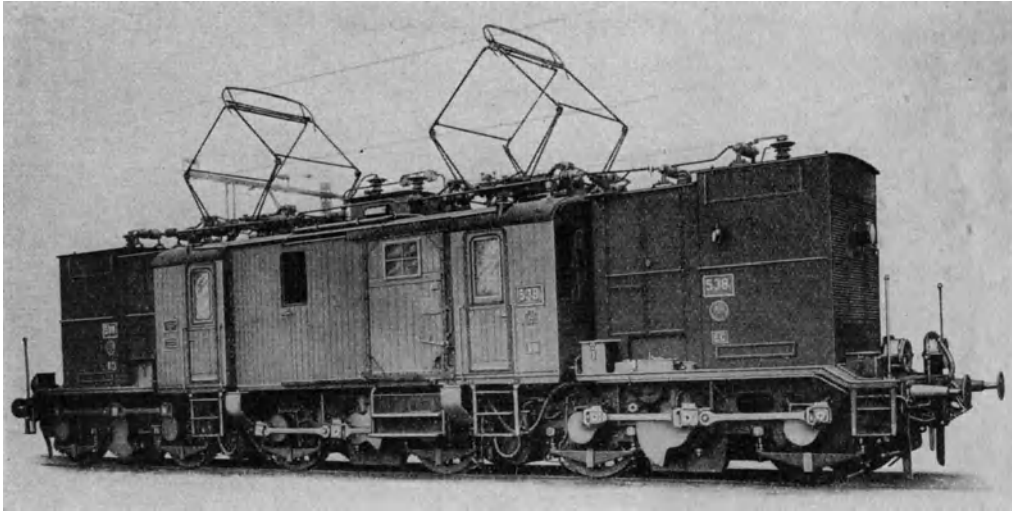


Abb. 497 a. Preußen, EG 538—550.

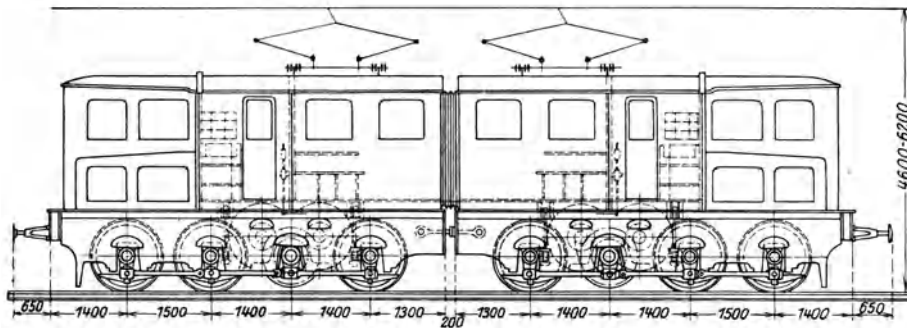


Abb. 498. Preußen, 551—552.

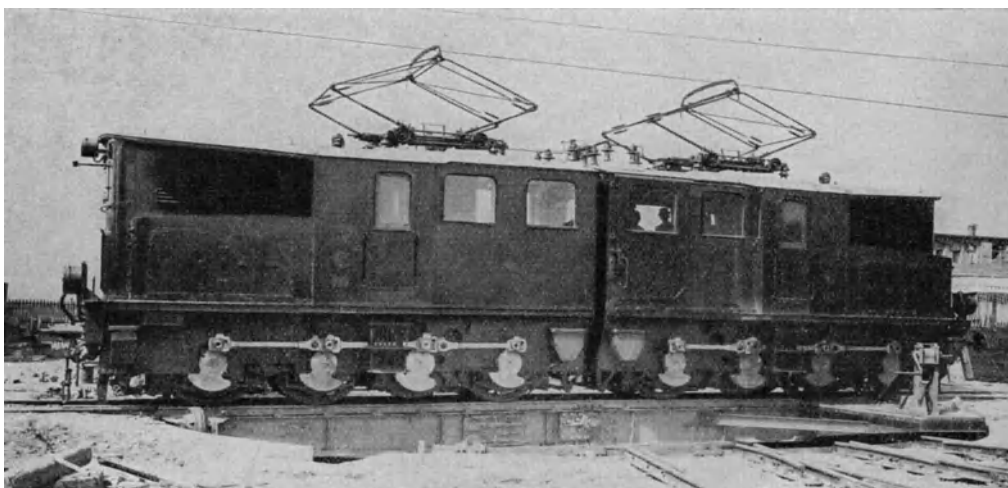


Abb. 498 a. Preußen, 551—552.

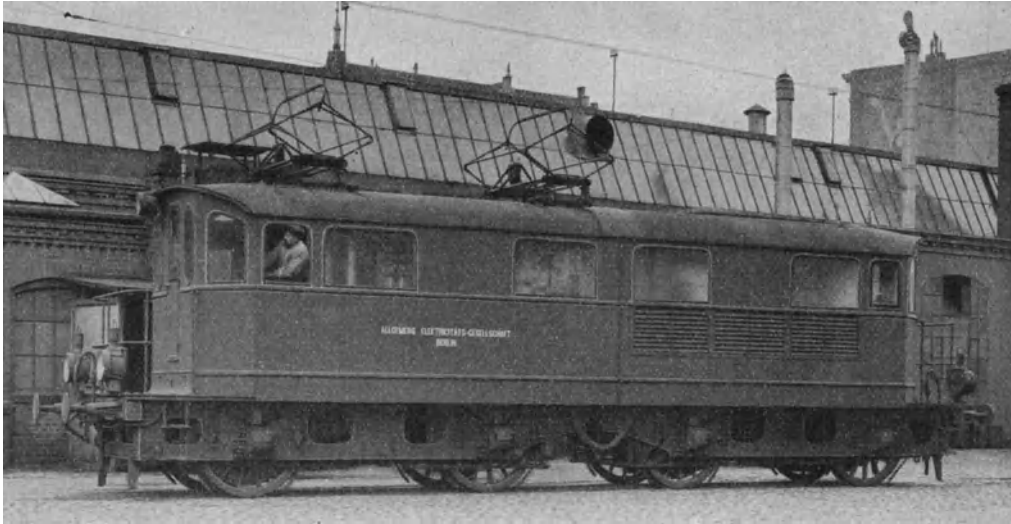


Abb. 499. Preußen, Oranienburg, 1908.

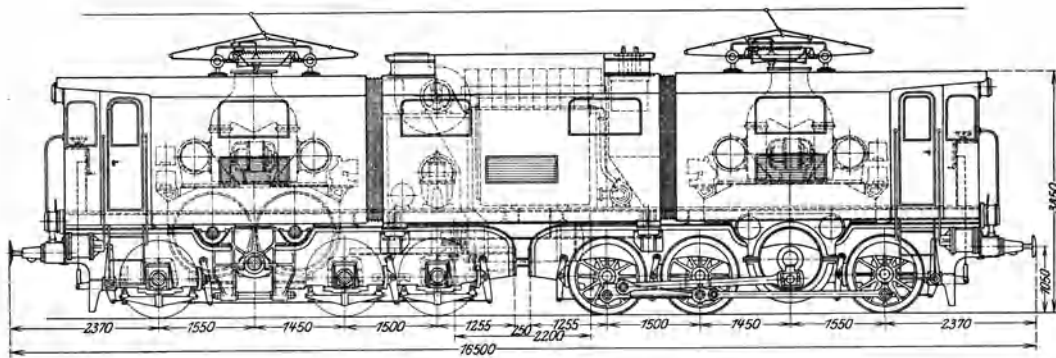


Abb. 500. Deutsche Reichsbahn, GZ,

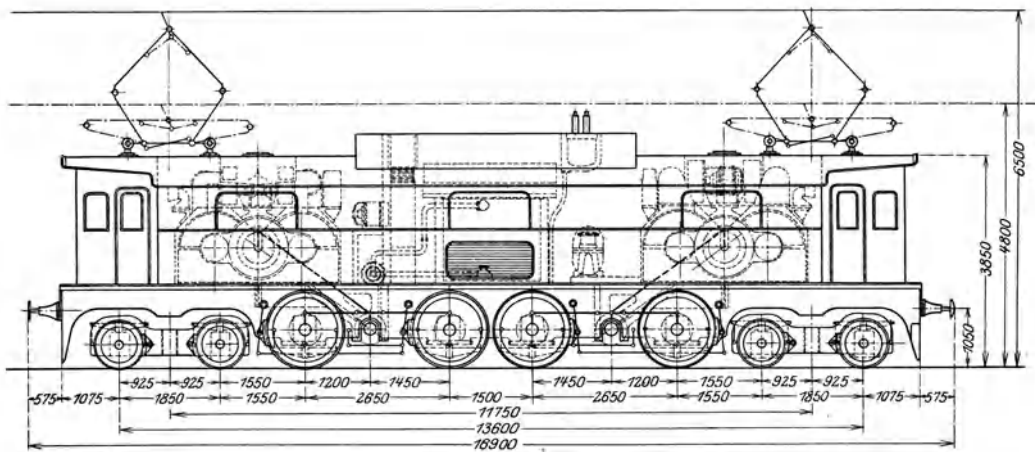


Abb. 501. Deutsche Reichsbahn, Gebirgs-PZ.

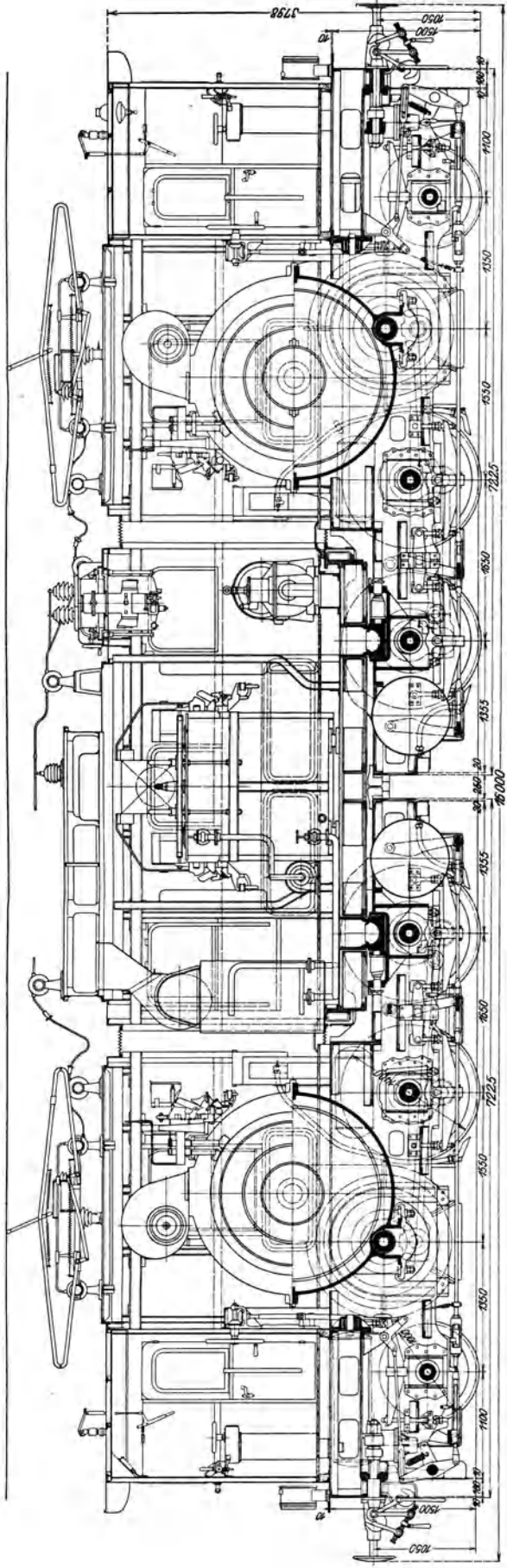


Abb. 503.

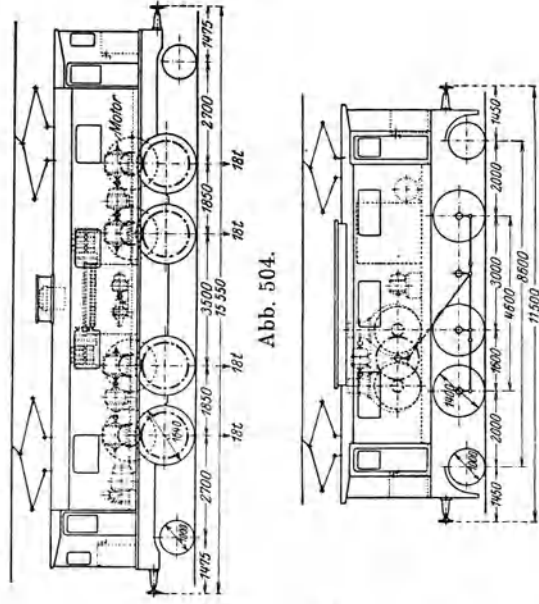


Abb. 504.

Abb. 505.

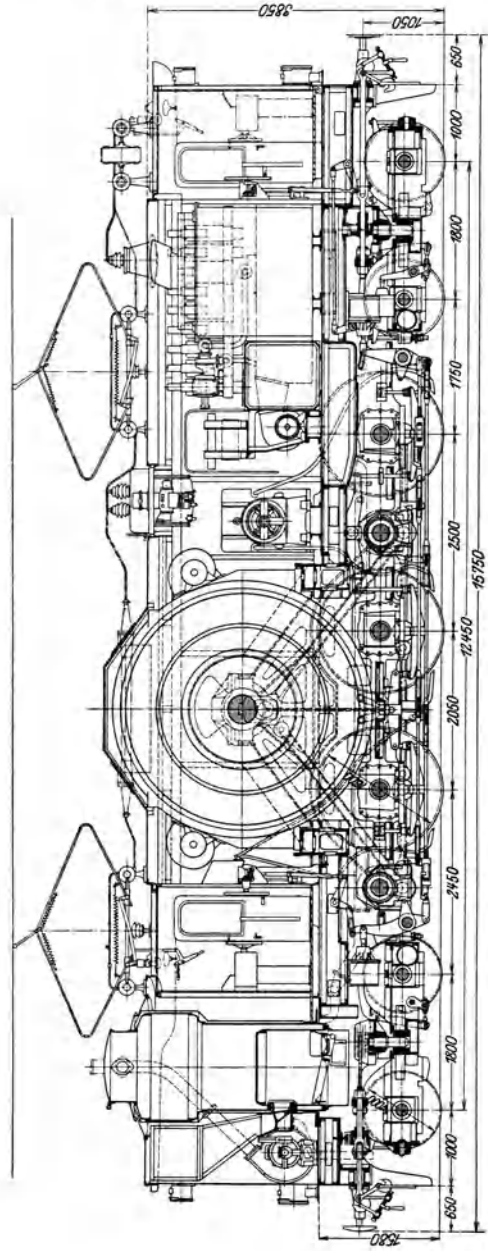


Abb. 502.

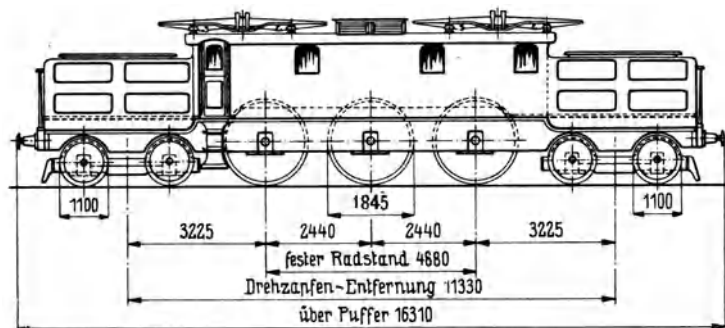


Abb. 506. North Eastern, SZ, 1921.

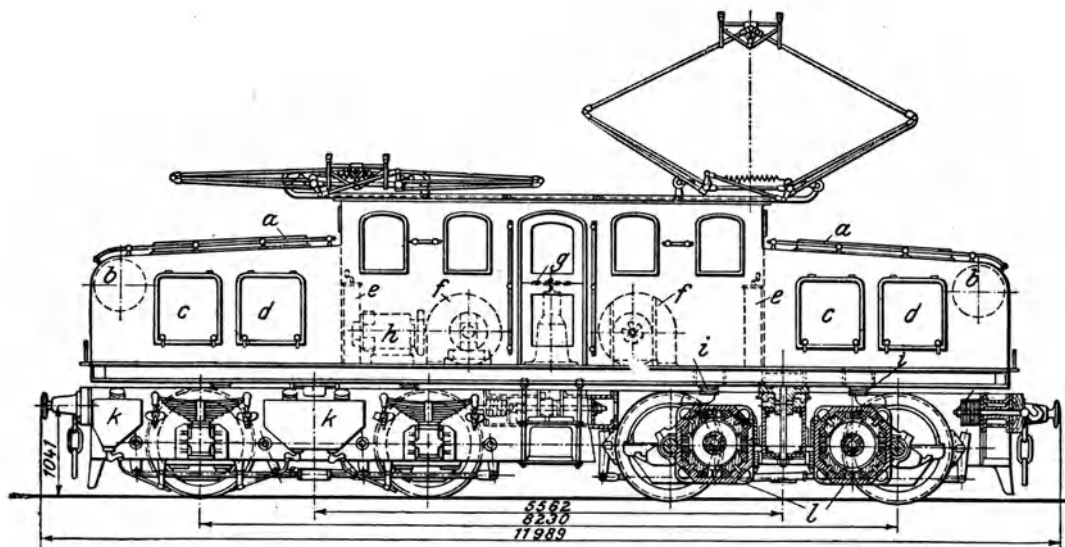


Abb. 507. Nord Eastern, GZ, 1917.

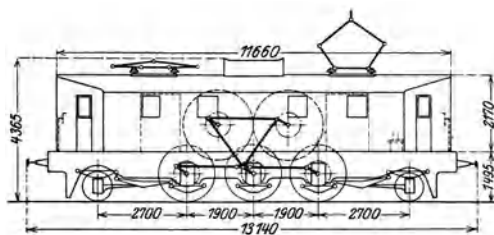


Abb. 508. Französische Südbahn, BBC 1911.

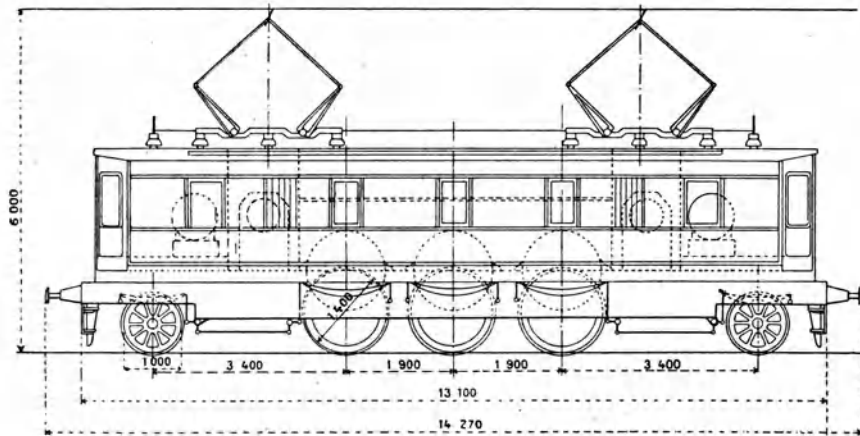


Abb. 509. Französische Südbahn, Jeumont, 1912.

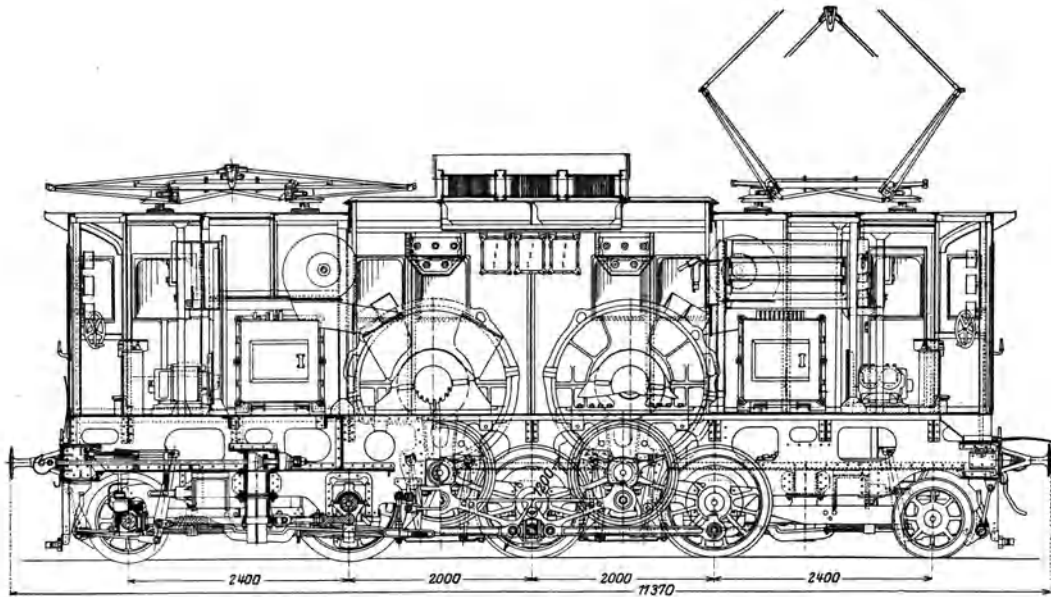


Abb. 510. Französische Südbahn, Westinghouse.

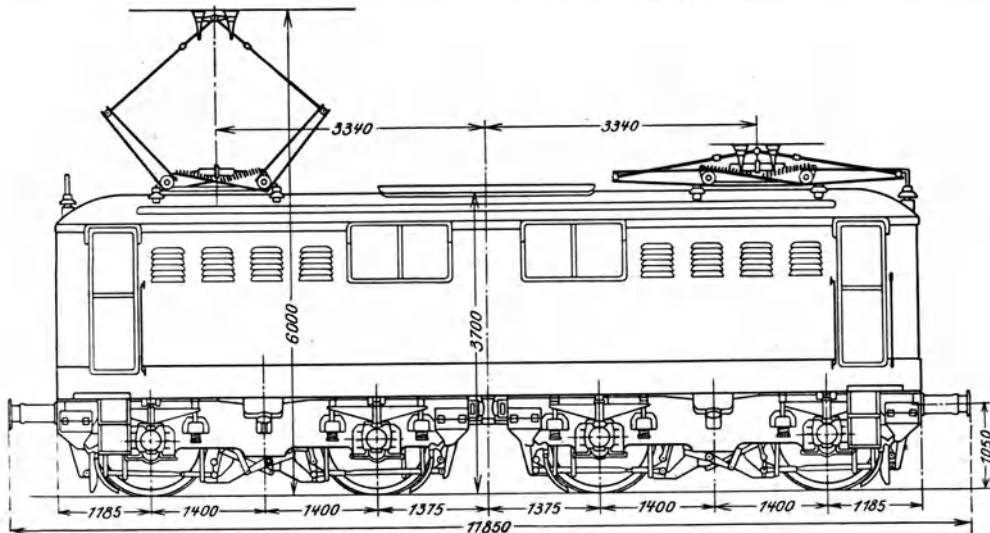


Abb. 511. Französische Südbahn.

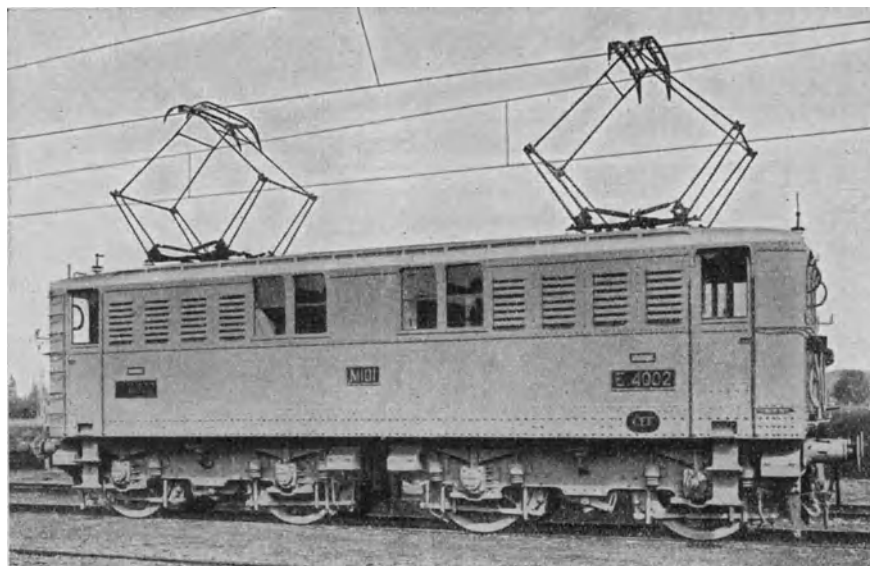


Abb. 511 a. Französische Südbahn.

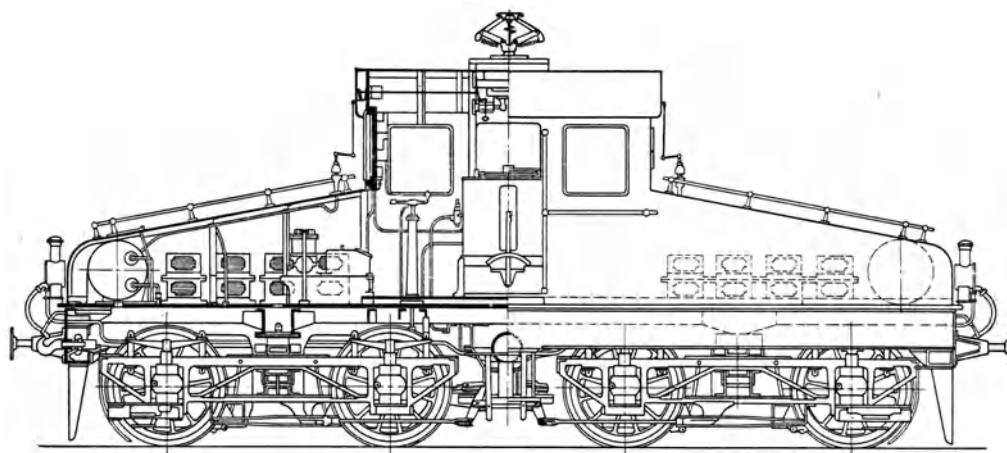


Abb. 512. Paris—Orléans, 1900.

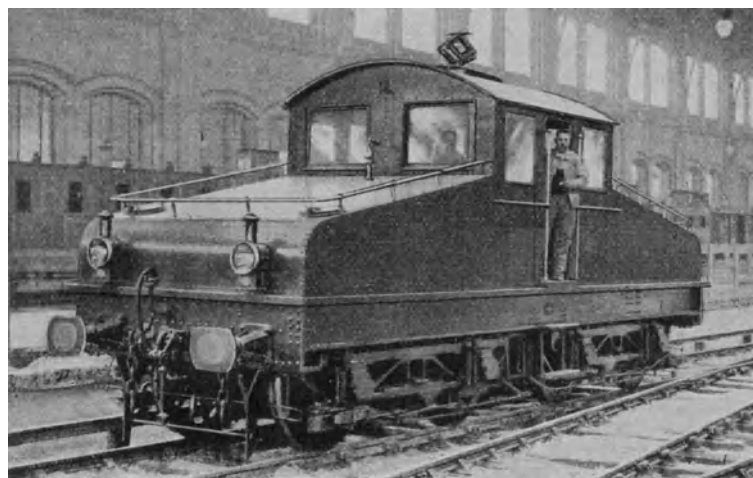


Abb. 512 a. Paris—Orléans, 1900.

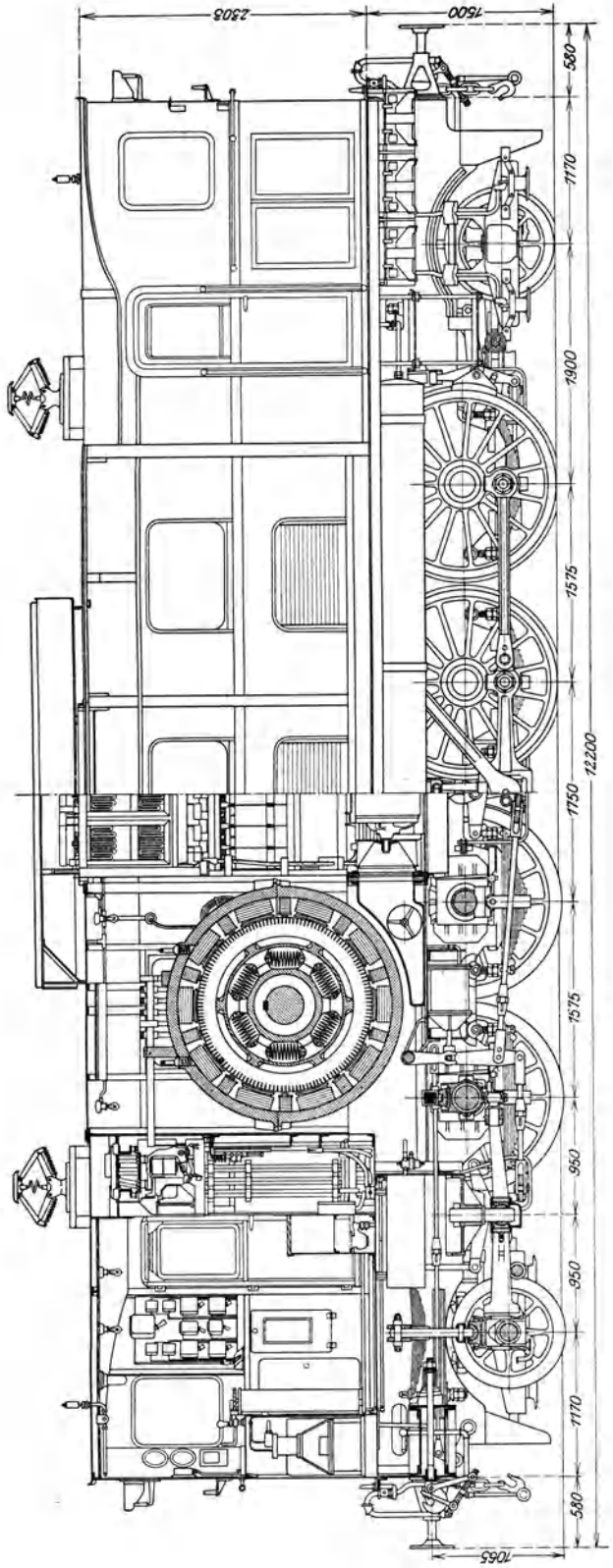


Abb. 513. Paris—Orléans, 1918.

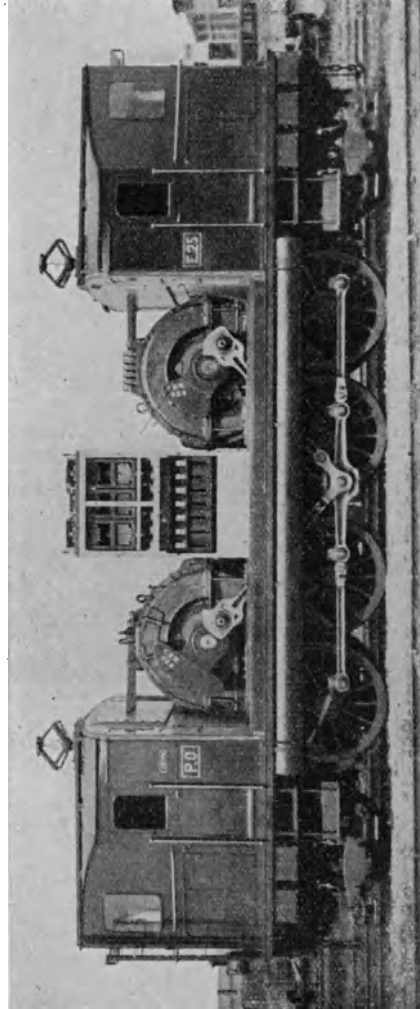


Abb. 513a. Paris—Orléans, 1918.

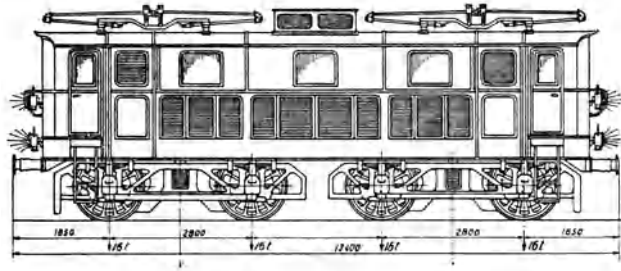


Abb. 514. Paris—Orléans, 1923.

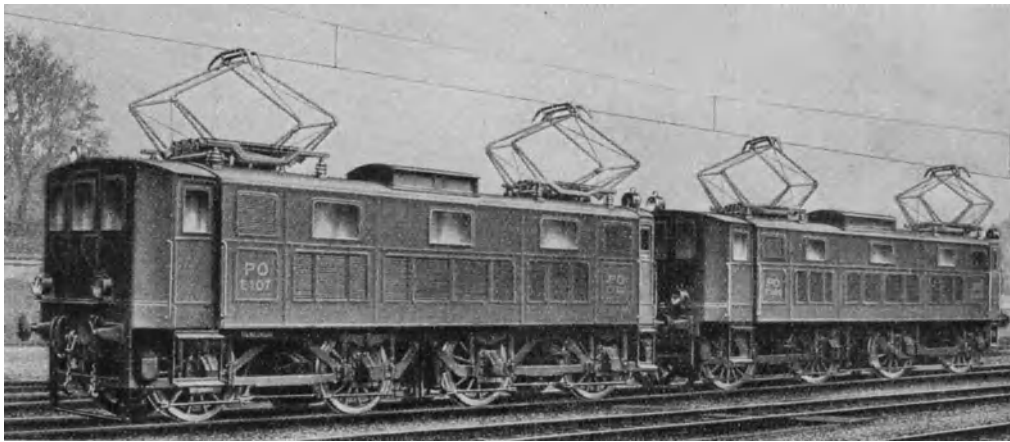


Abb. 514 a. Paris—Orléans, 1923.

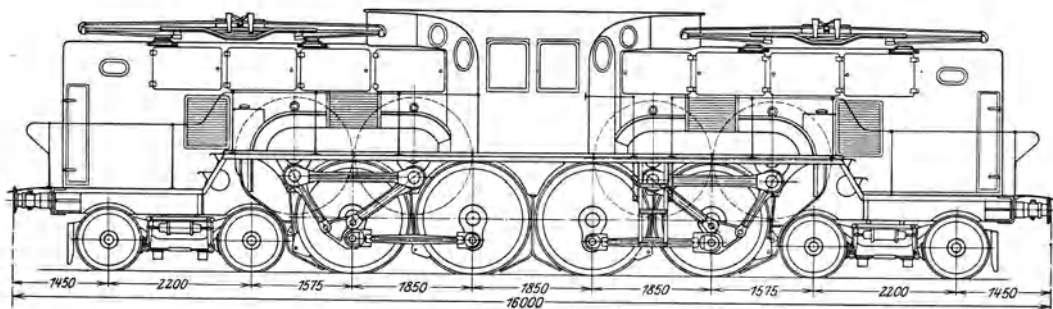


Abb. 515.

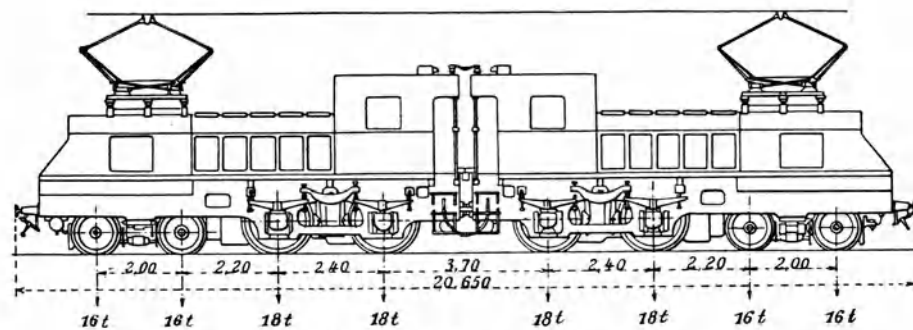


Abb. 516. Paris—Lyon—Méditerranée.

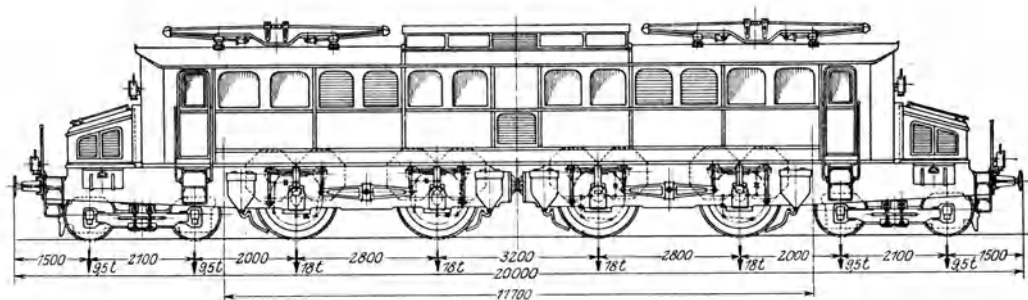


Abb. 517. Paris—Lyon—Méditerranée.

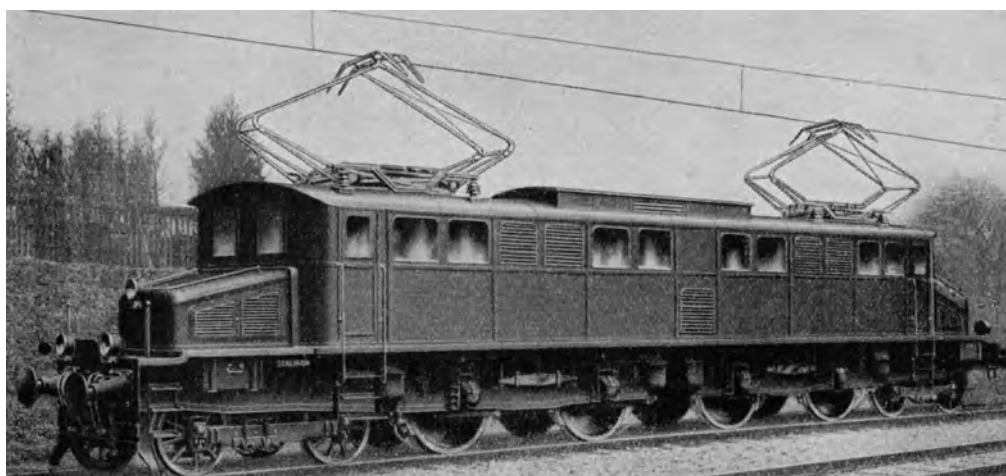


Abb. 517a. Paris—Lyon—Méditerranée.

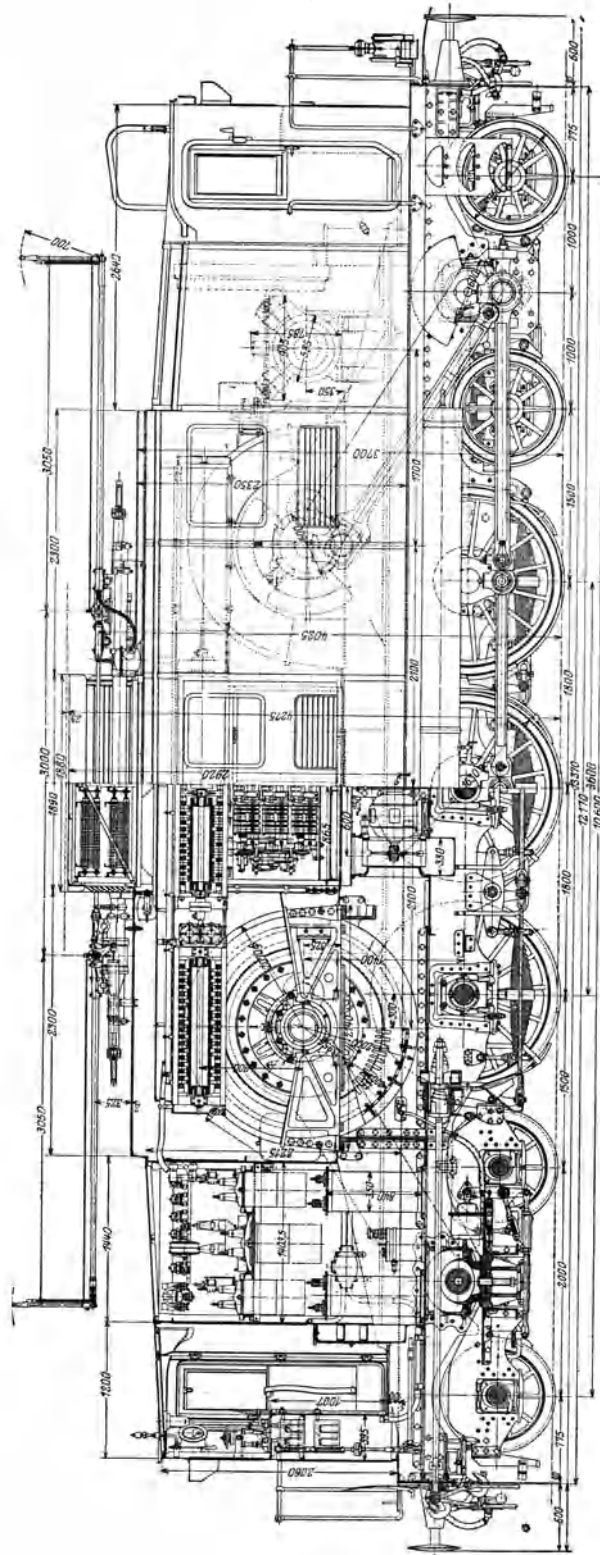


Abb. 518. Italien, 1918, Gr. 33.

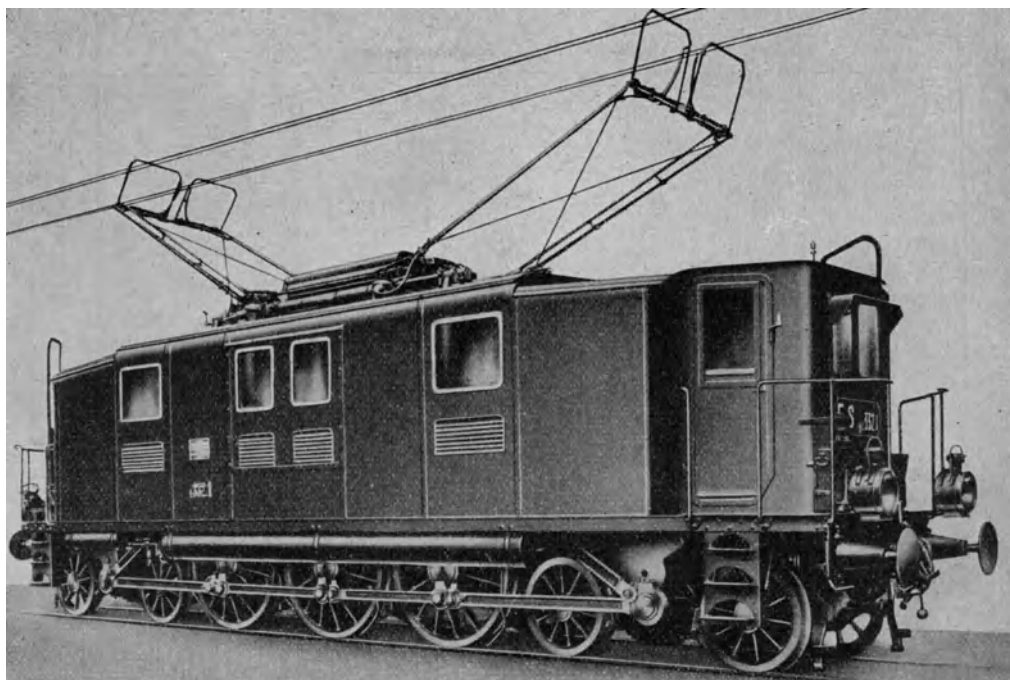


Abb. 518a. Italien, 1918, Gr. 33.

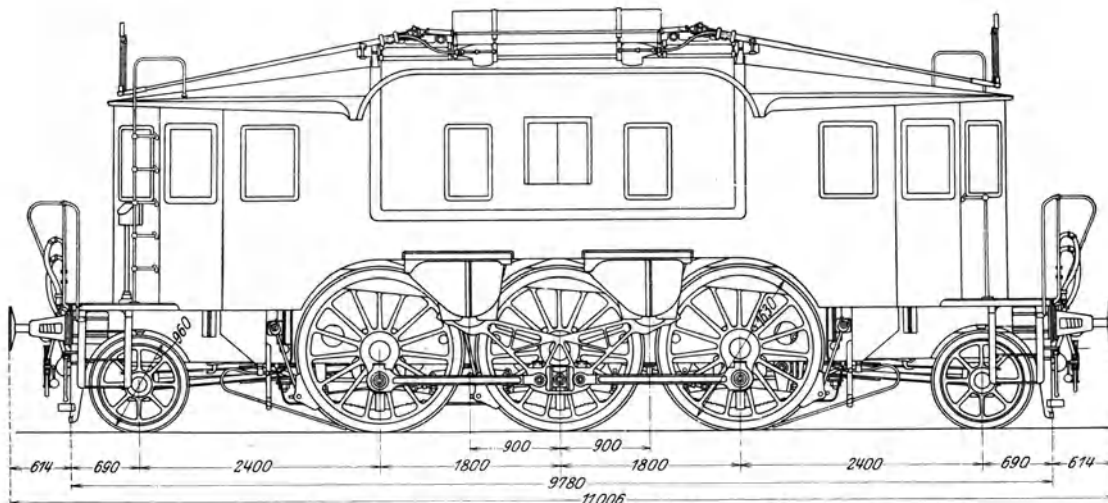


Abb. 519. Italien, 1915, Gr. 30.

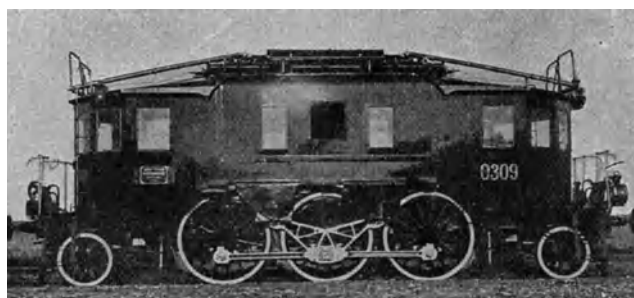


Abb. 519a. Italien, 1915, Gr. 30.

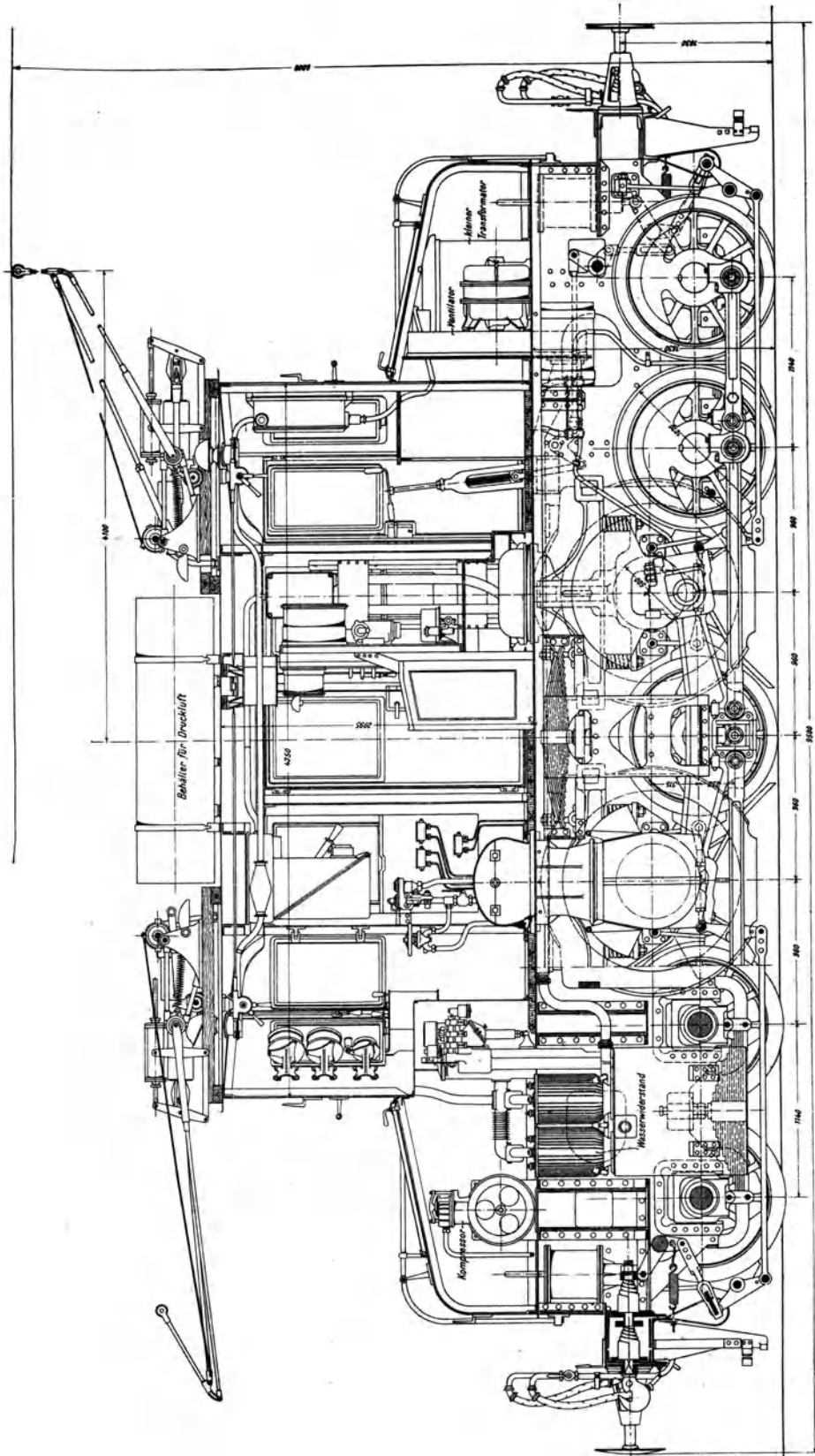


Abb. 520. Italien, Giovi, 1909, Gr. 50.

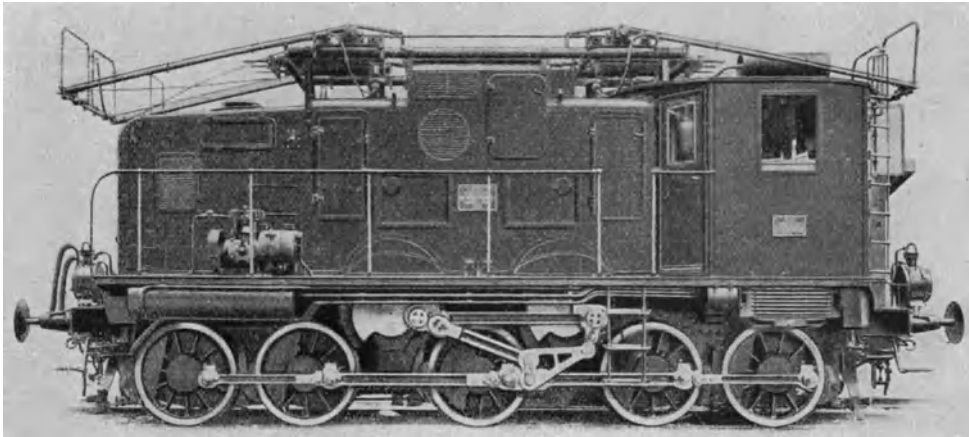


Abb. 521. Italien, Staatsbahn, 1923, Gr. 55.

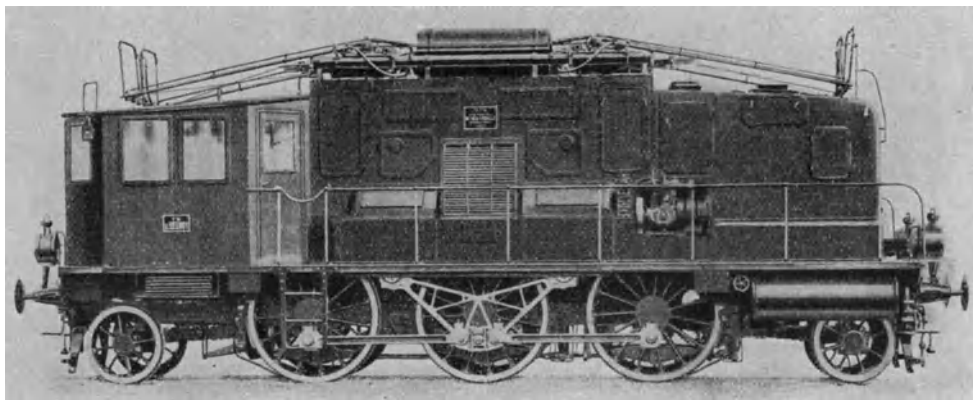


Abb. 522. Italien, Staatsbahn, 1923, Gr. 33.

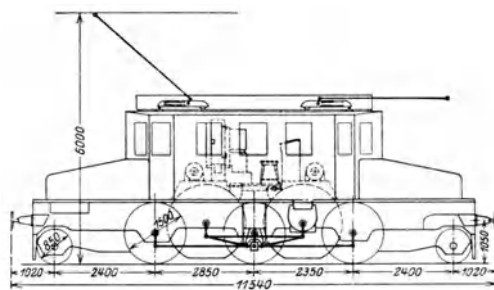


Abb. 523. Italien, Valtellina, 1906, Gr. 38.

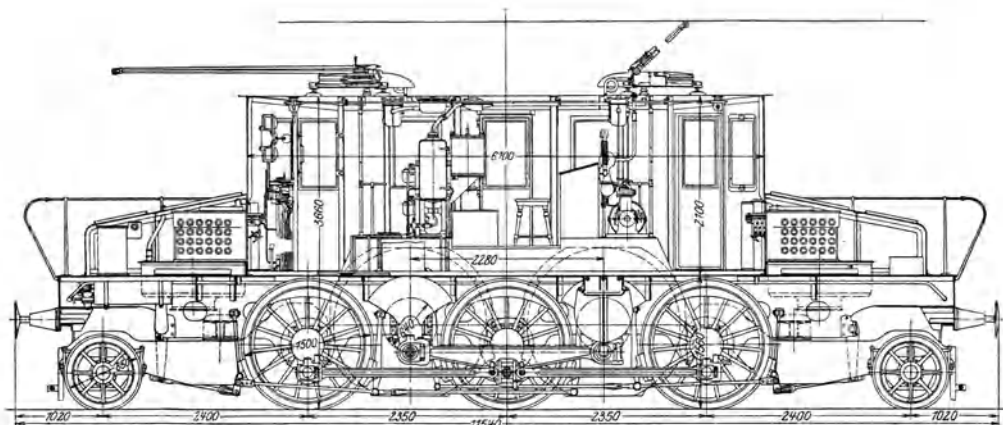


Abb. 524. Italien, Valtellina, 1903, Gr. 36.

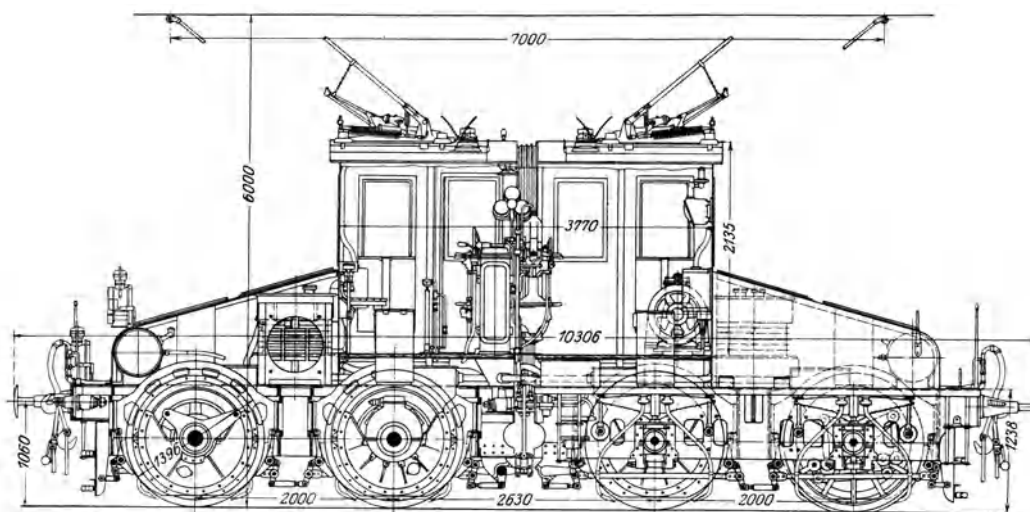


Abb. 525. Italien, Valtellina, 1902, Gr. 34.

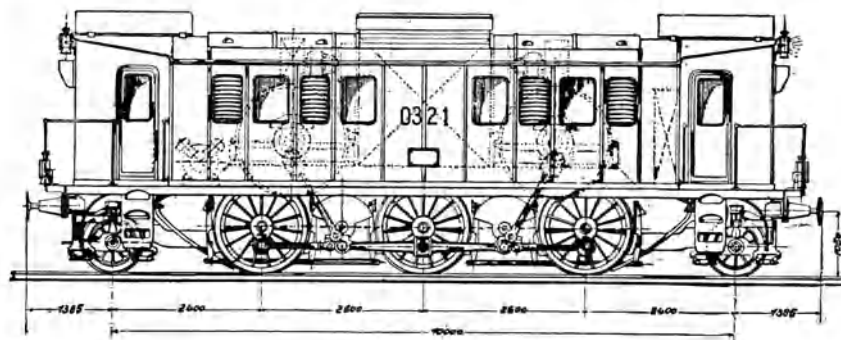


Abb. 526. Italien, Varesina, 1913, Gr. 32.

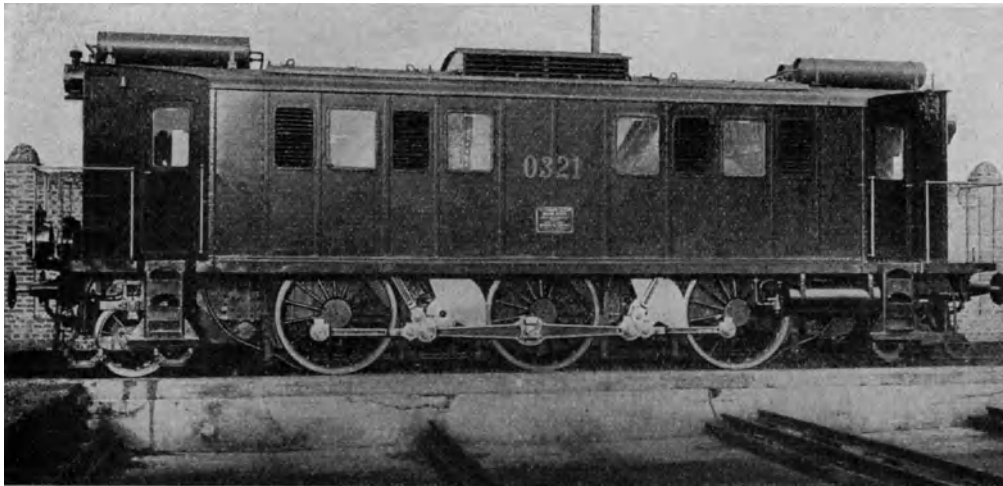


Abb. 526 a. Italien, Varesina, 1913, Gr. 32.

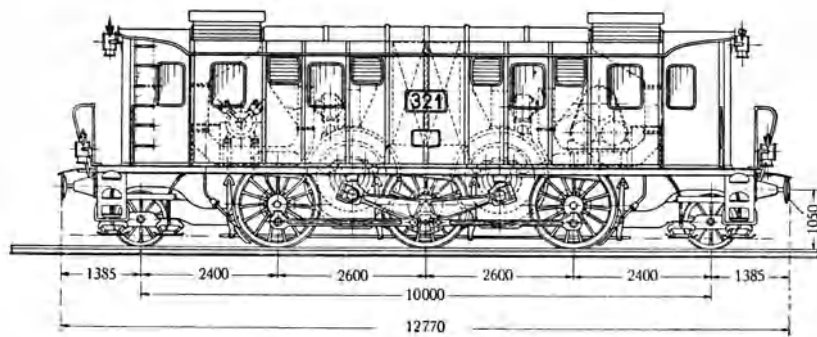


Abb. 527. Italien, Varesina, 1923, Gr. 32.

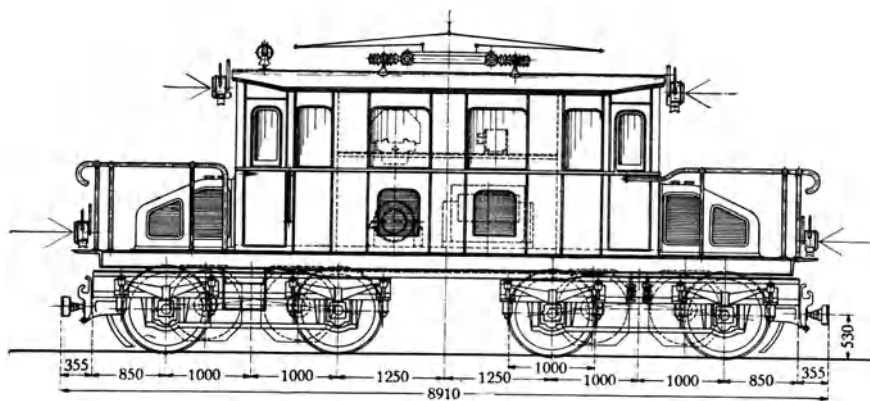


Abb. 528. Italien, Pinerola—Perosa.

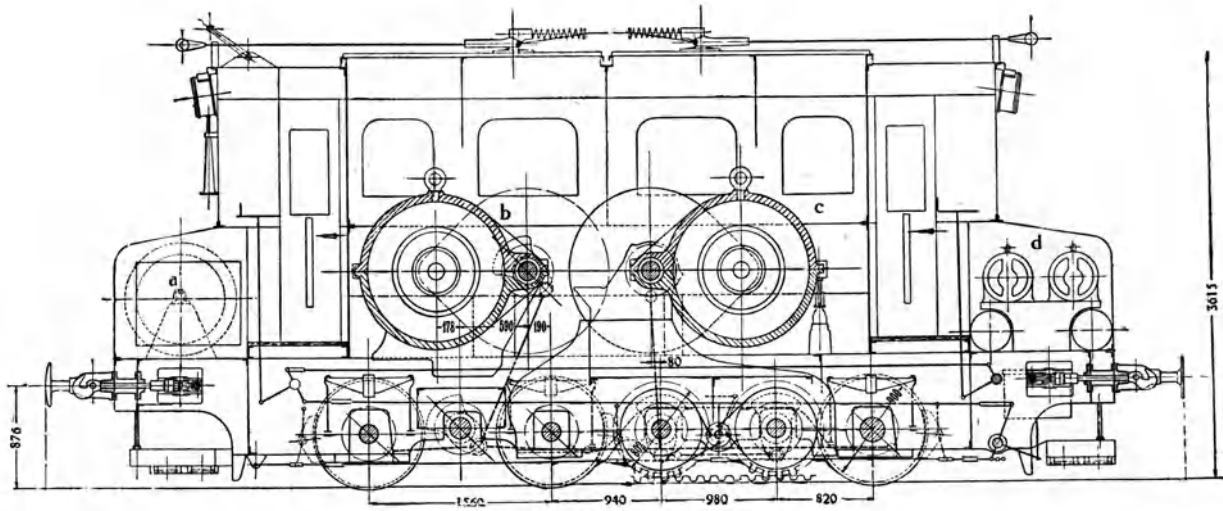


Abb. 529. Usui—Toge, 1913.

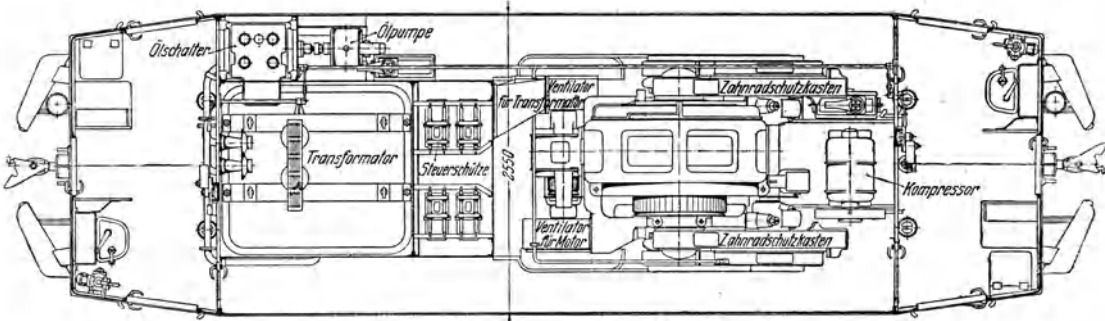
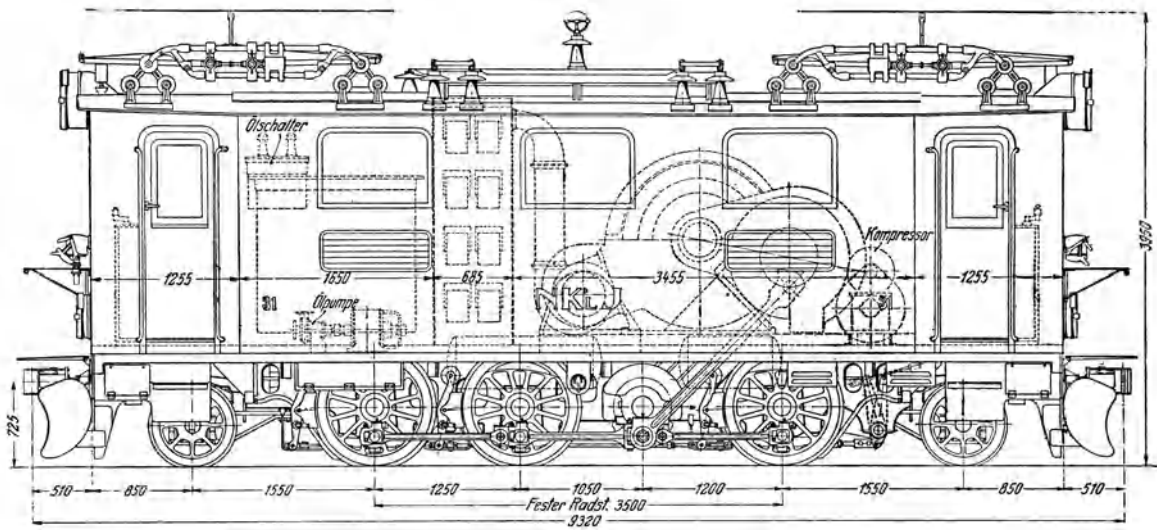


Abb. 530. Schweden, Nordmark.

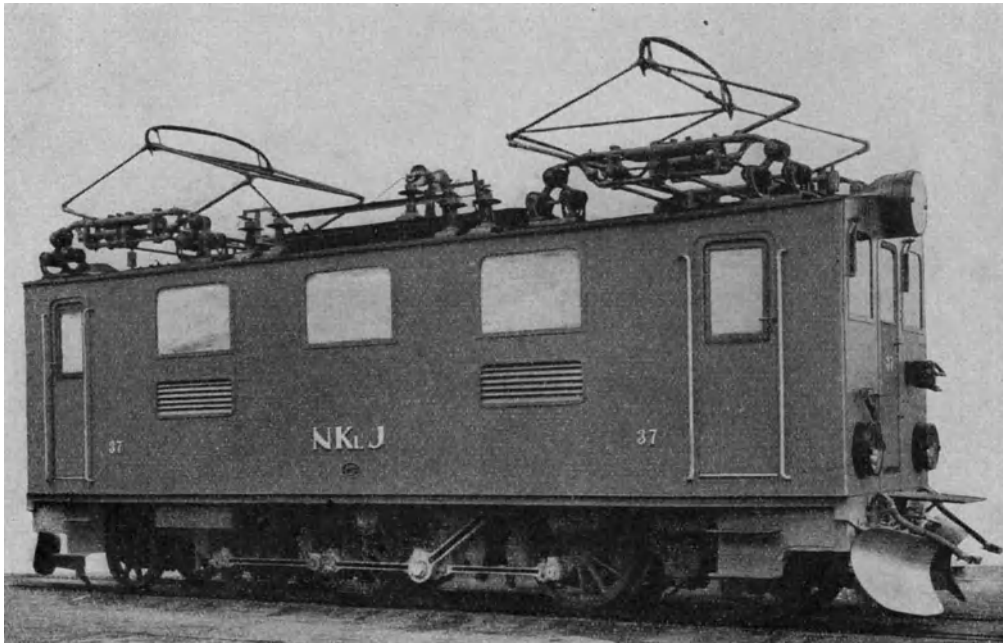


Abb. 530 a. Schweden, Nordmark, 1920.

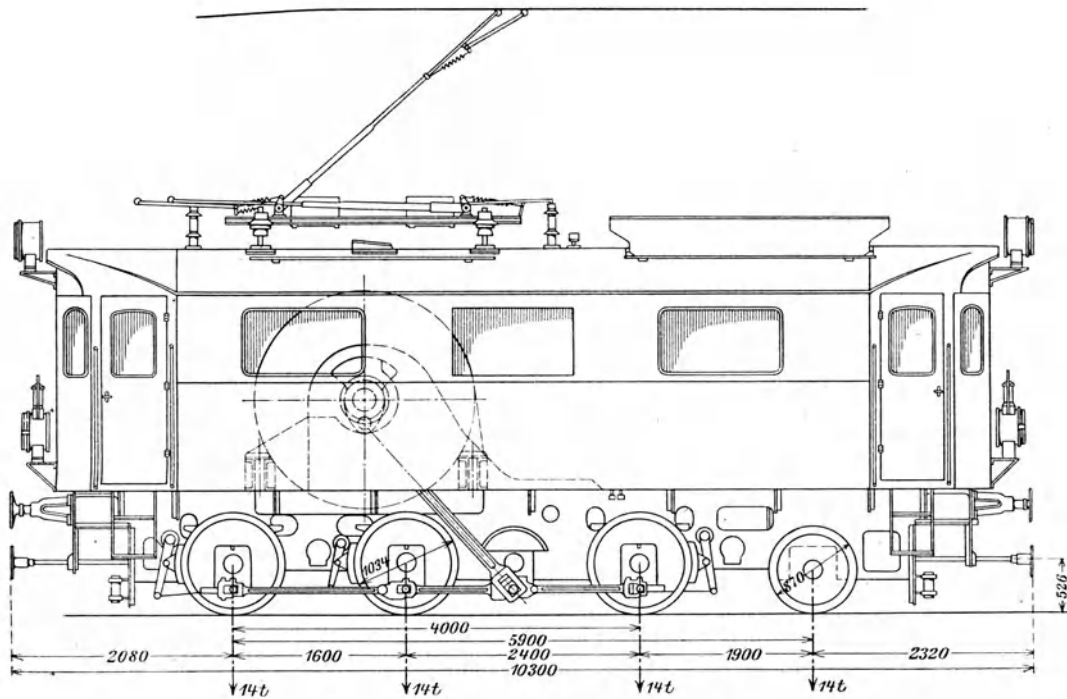


Abb. 531. Österreich, Mittenwald, 1912. Wien—Preßburg, 1914.

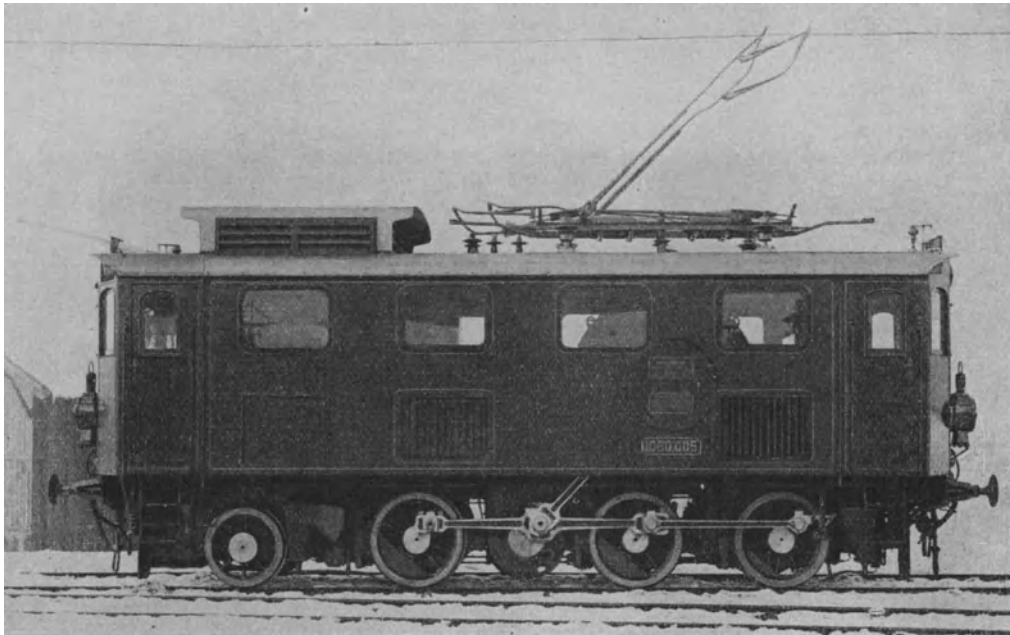


Abb. 531 a. Österreich, Mittenwald, 1912. Wien—Preßburg, 1914.

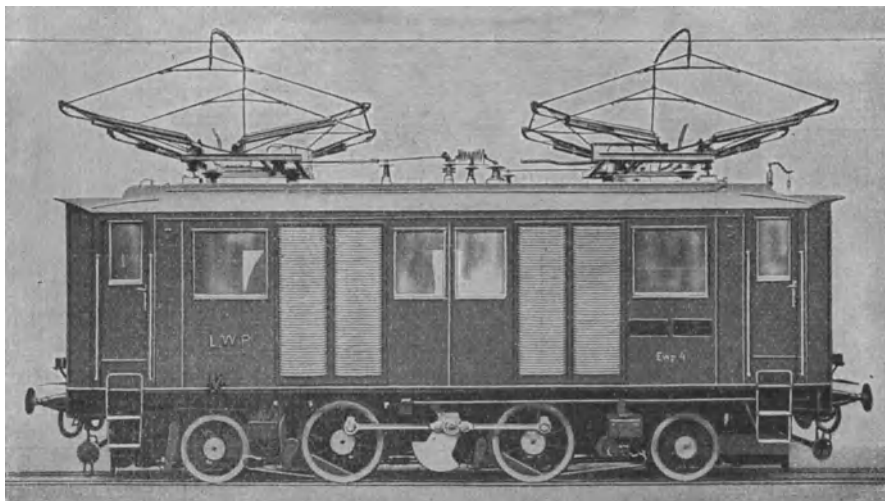


Abb. 532. Österreich, Wien—Preßburg, 1914.

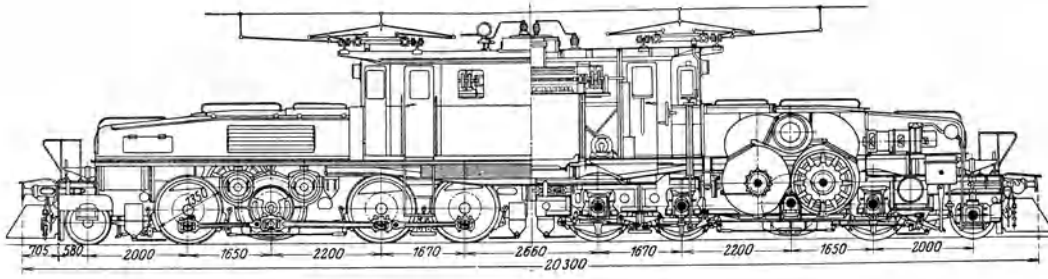


Abb. 533. Österreich, ÖBB, BBC, 1922.

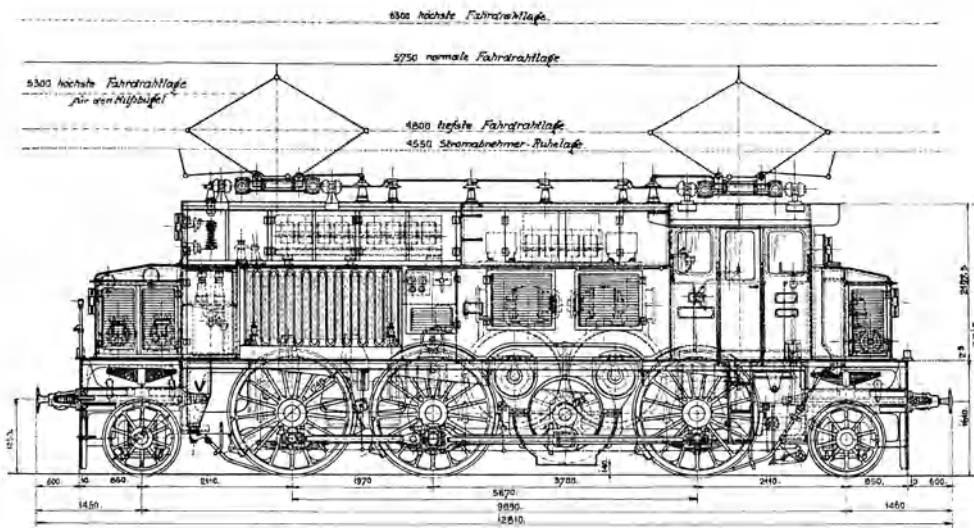
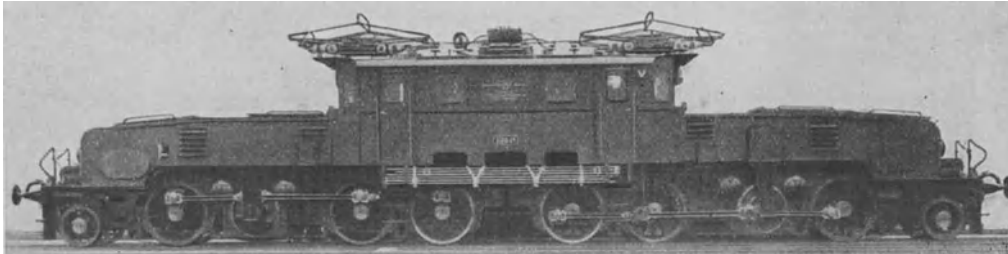


Abb. 534. Österreich, ÖBB, AEGU, 1923.

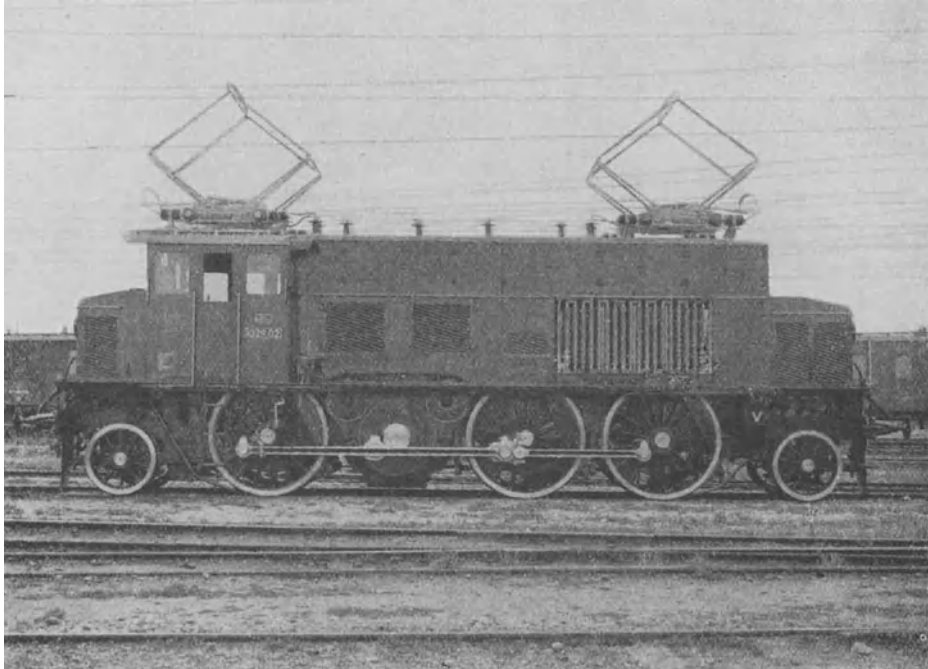


Abb. 534a. Österreich, ÖBB, AEGU, 1923.

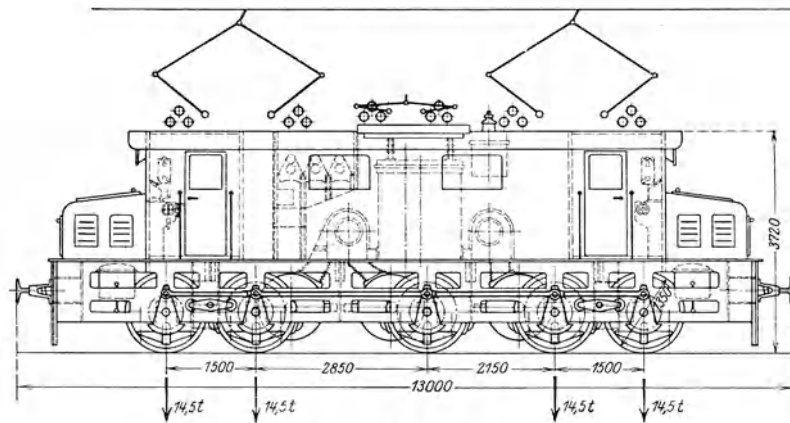


Abb. 535. Österreich, ÖBB, ÖSSW, 1923.

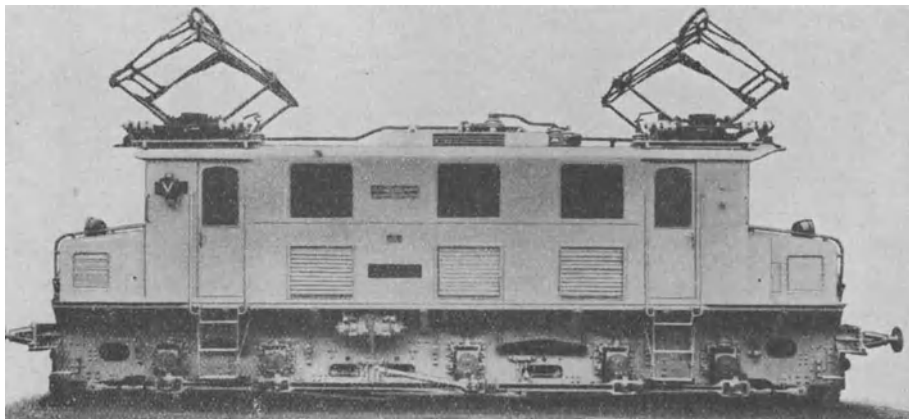


Abb. 535a. Österreich, ÖBB, SSW, 1923.

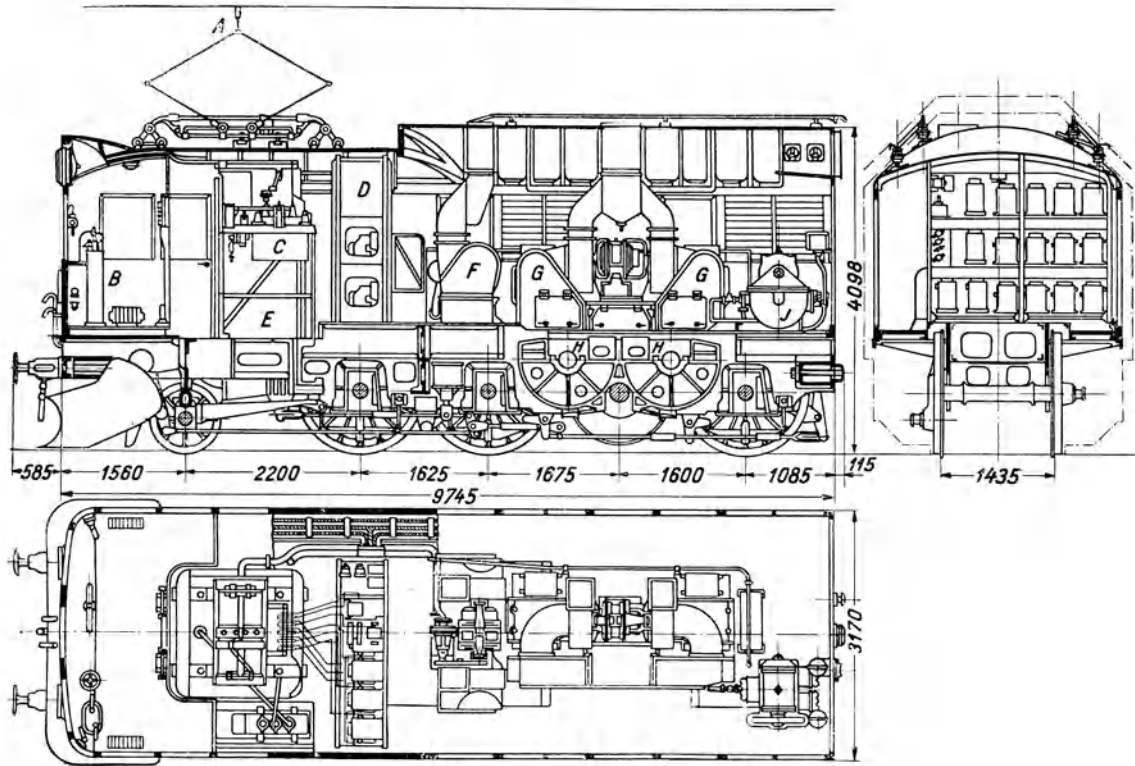


Abb. 536. Schweden, Riksgränsen, 1922.

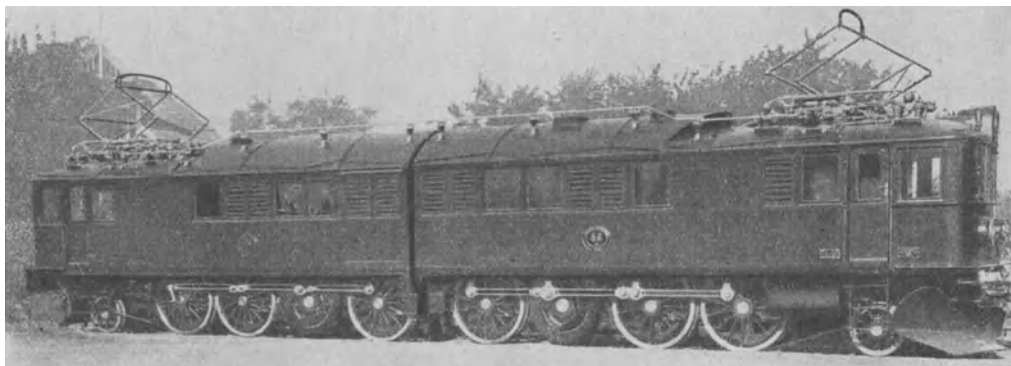


Abb. 536a. Schweden, Riksgränsen, 1922.

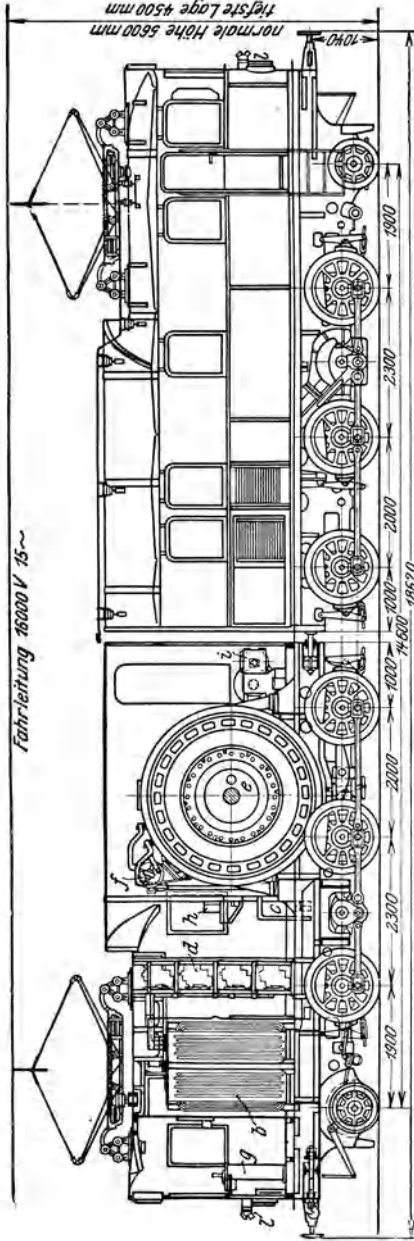
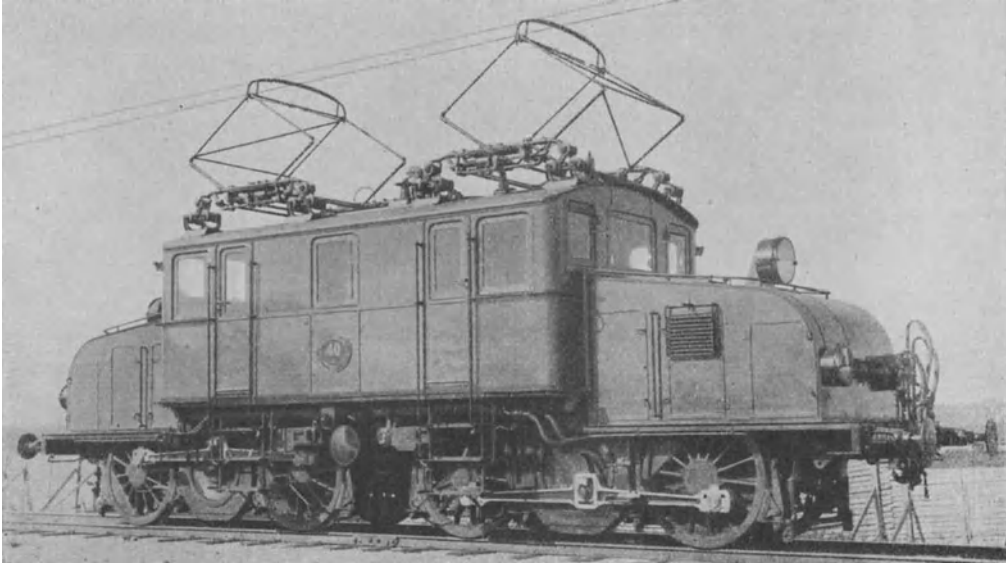


Abb. 538. Schveden, Riksgränsen, GO.

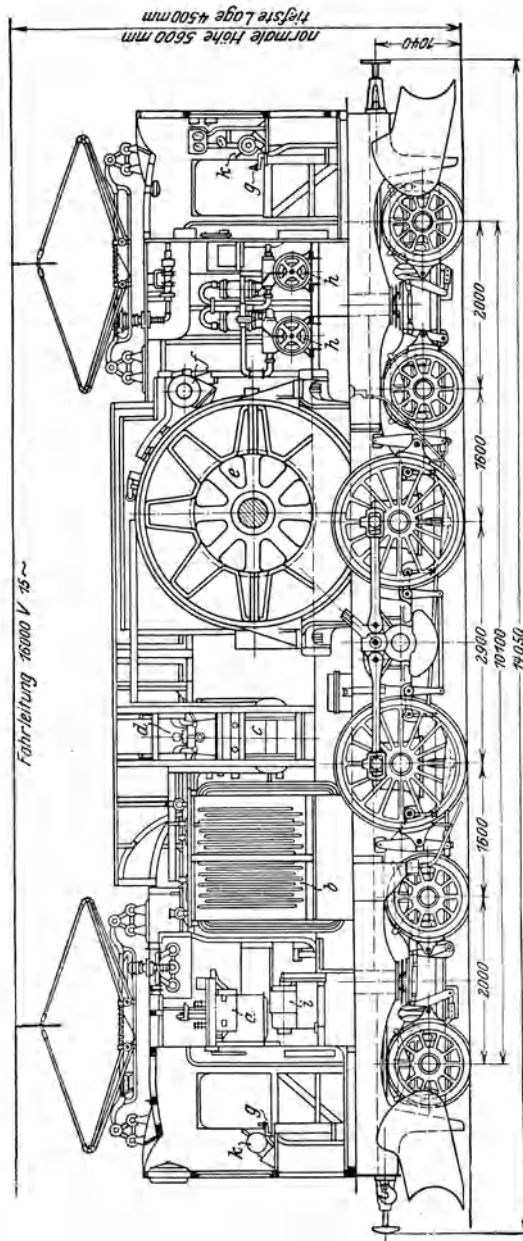


Abb. 539. Schveden, Riksgränsen, F.

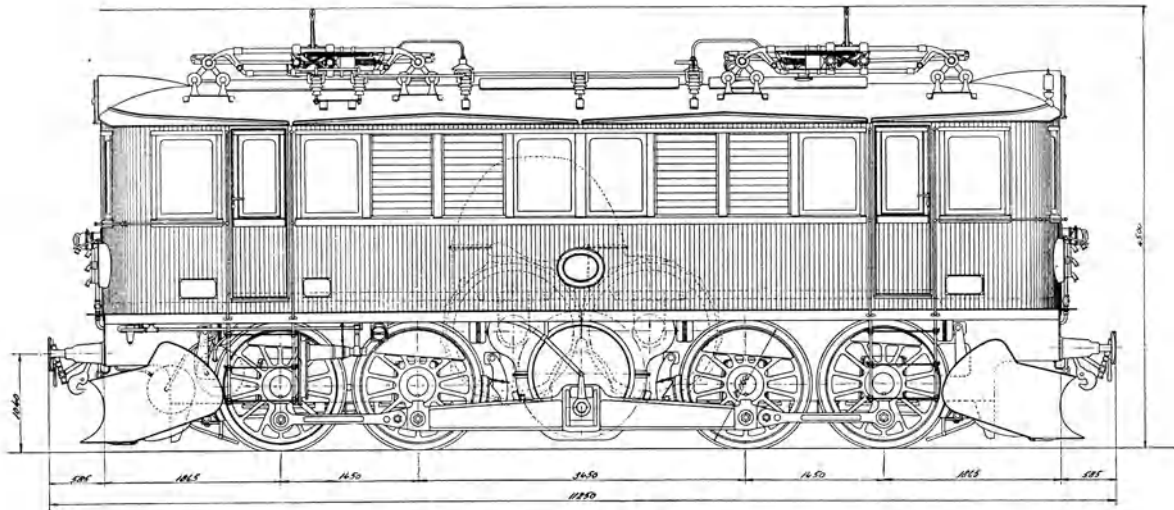


Abb. 540. Schweden, Riksgränsen, GZ, 1923.

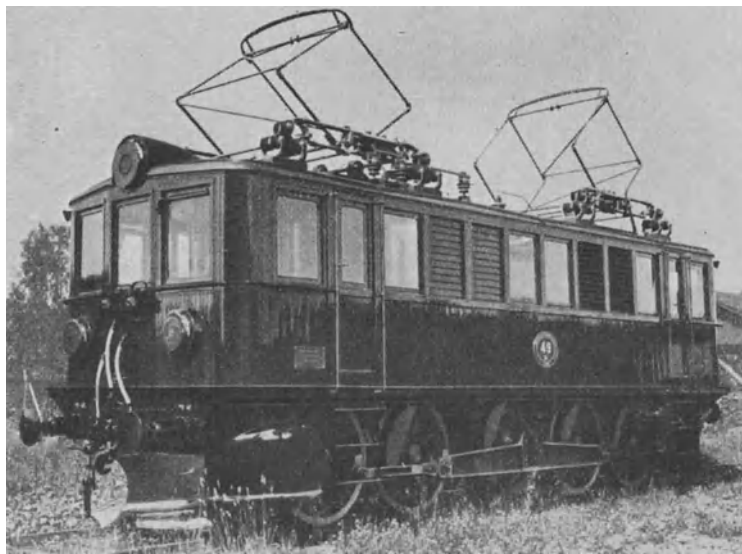


Abb. 540 a. Schweden, Riksgränsen, GZ, 1923.

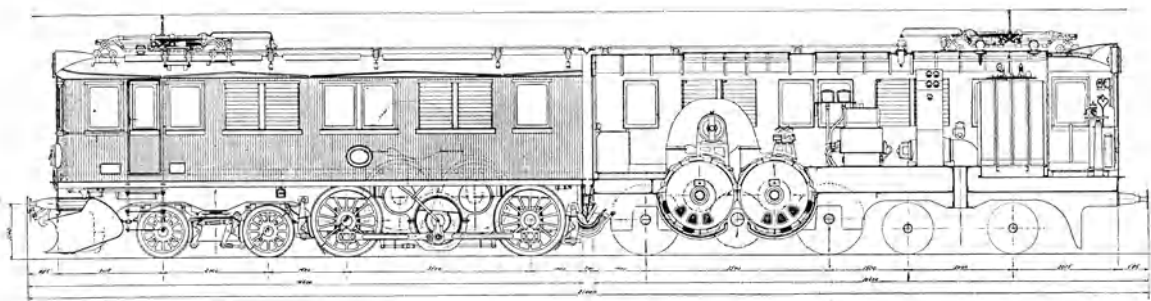


Abb. 541. Schweden, Riksgränsen, SZ, 1923.

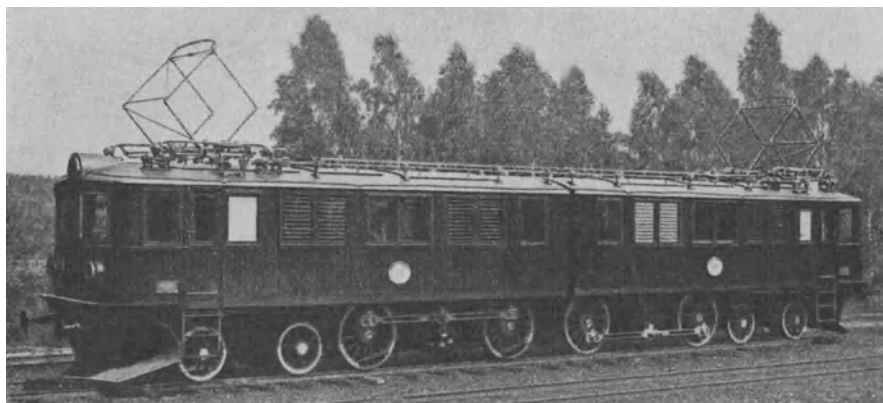


Abb. 541 a. Schweden, Riksgränsen, SZ, 1923.

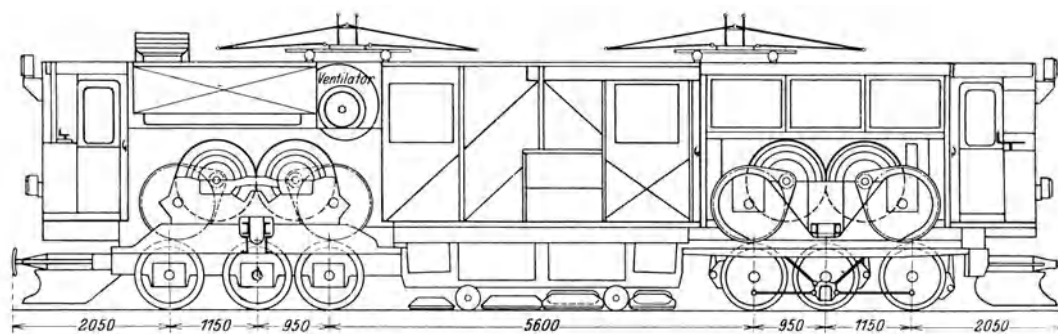


Abb. 542. Schweiz, Bernina, 1917.

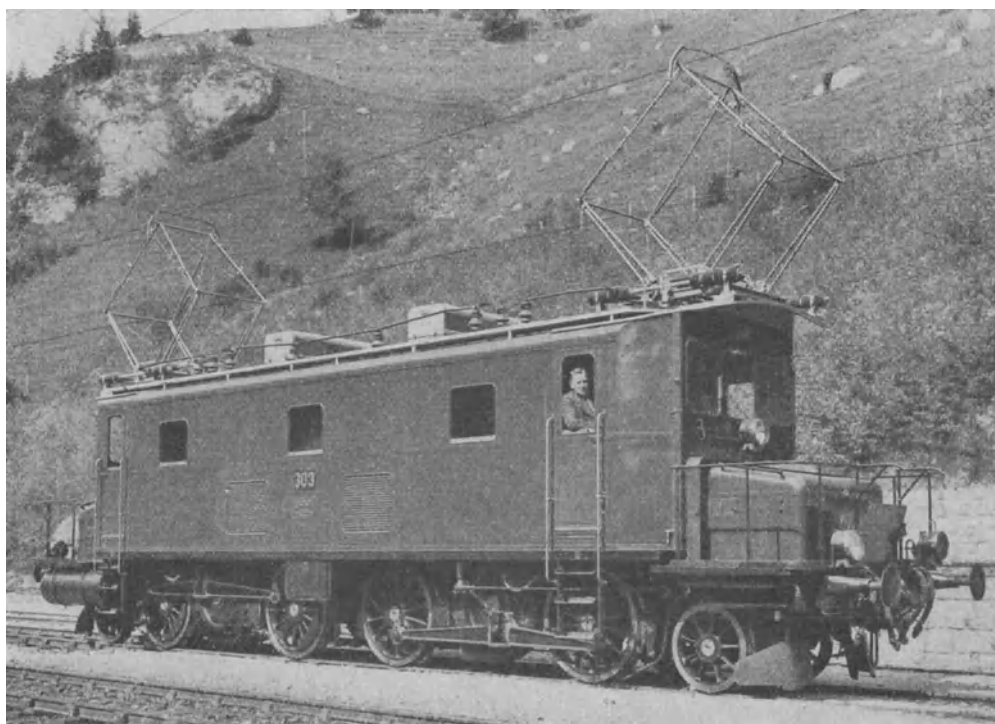


Abb. 543. Schweiz, Bernische Dekretsbahnen.

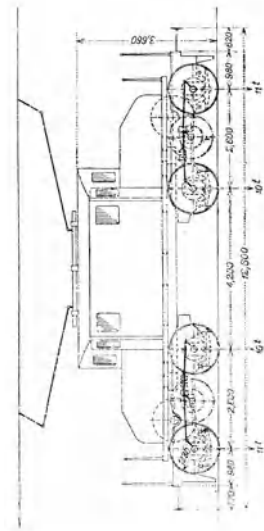


Abb. 544. Schweiz, Burgdorf—Thun, 1918.

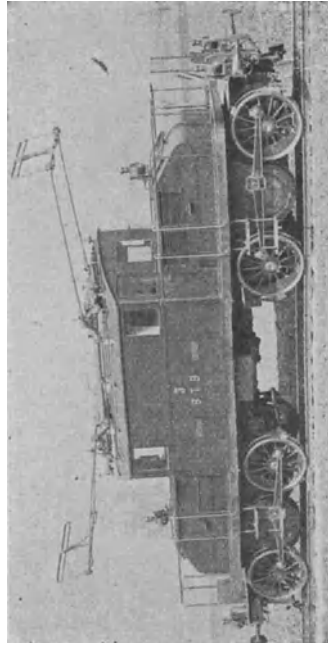


Abb. 544n. Schweiz, Burgdorf—Thun, 1910.

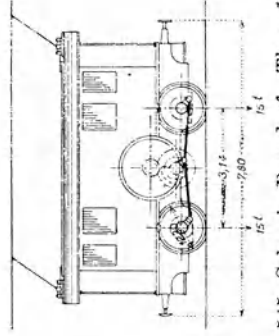


Abb. 545. Schweiz, Burgdorf—Thun, 1899.

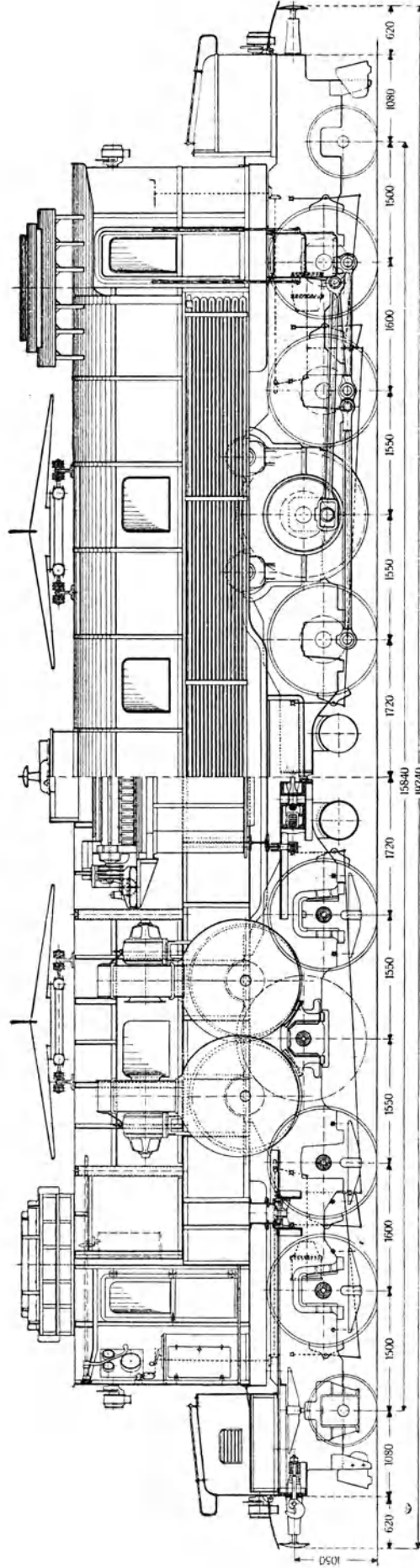


Abb. 546. Schweiz, Gotthard, R 14210.

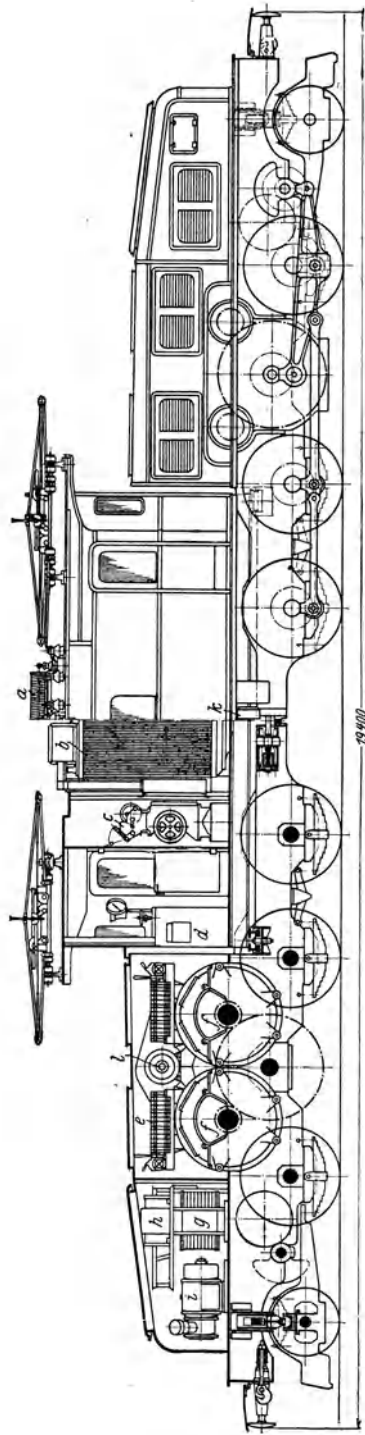


Abb. 547. Schweiz, Gotthard, 1919, R 12251.

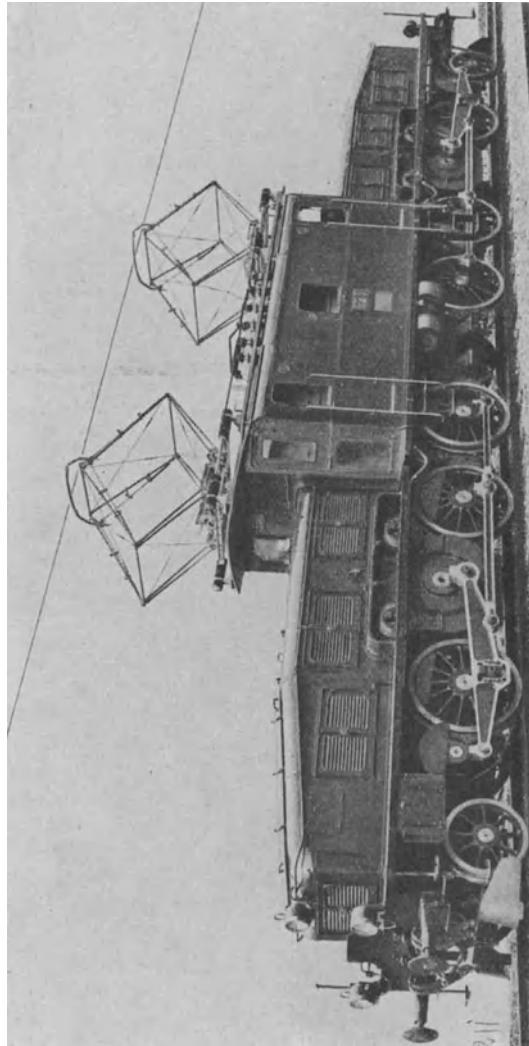


Abb. 547 a. Schweiz, Gotthard, 1919, R 12251.

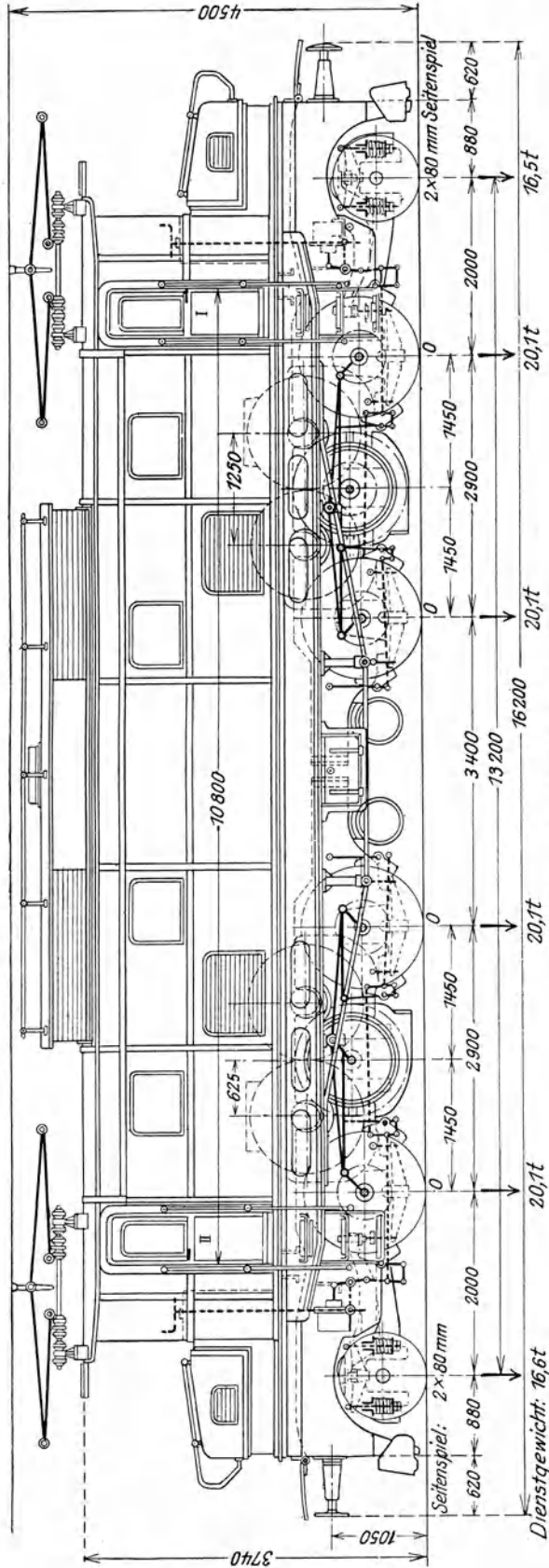


Abb. 548. Schweiz, SBB, R.12801.

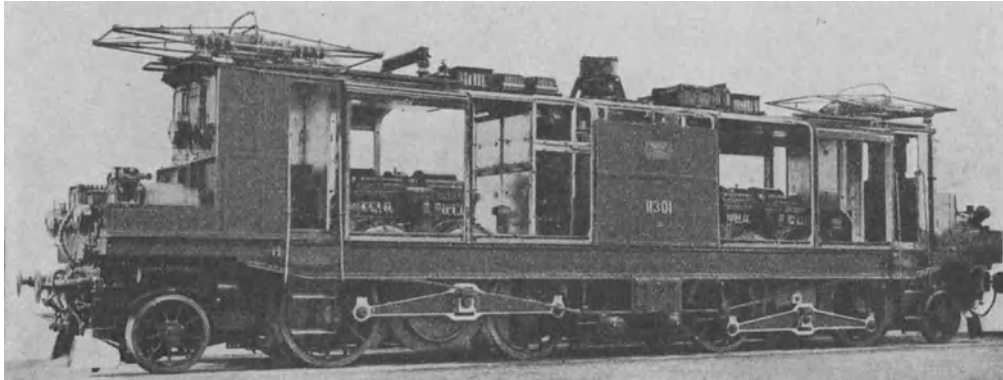


Abb. 548a. Schweiz, Gotthard, 1920, R 12301.

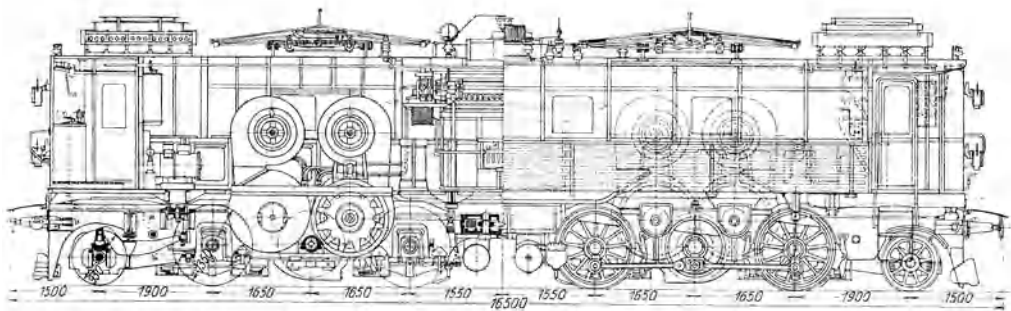


Abb. 549. Schweiz, Gotthard, 1919, R 11302.

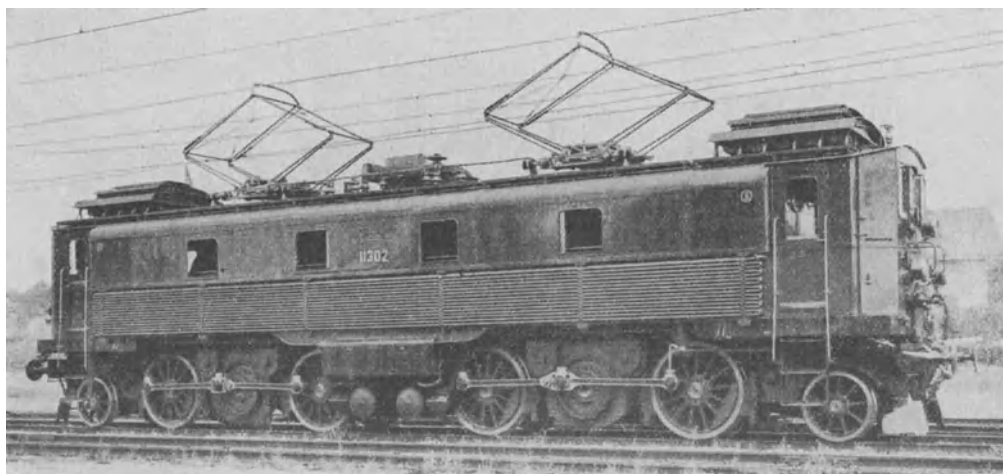
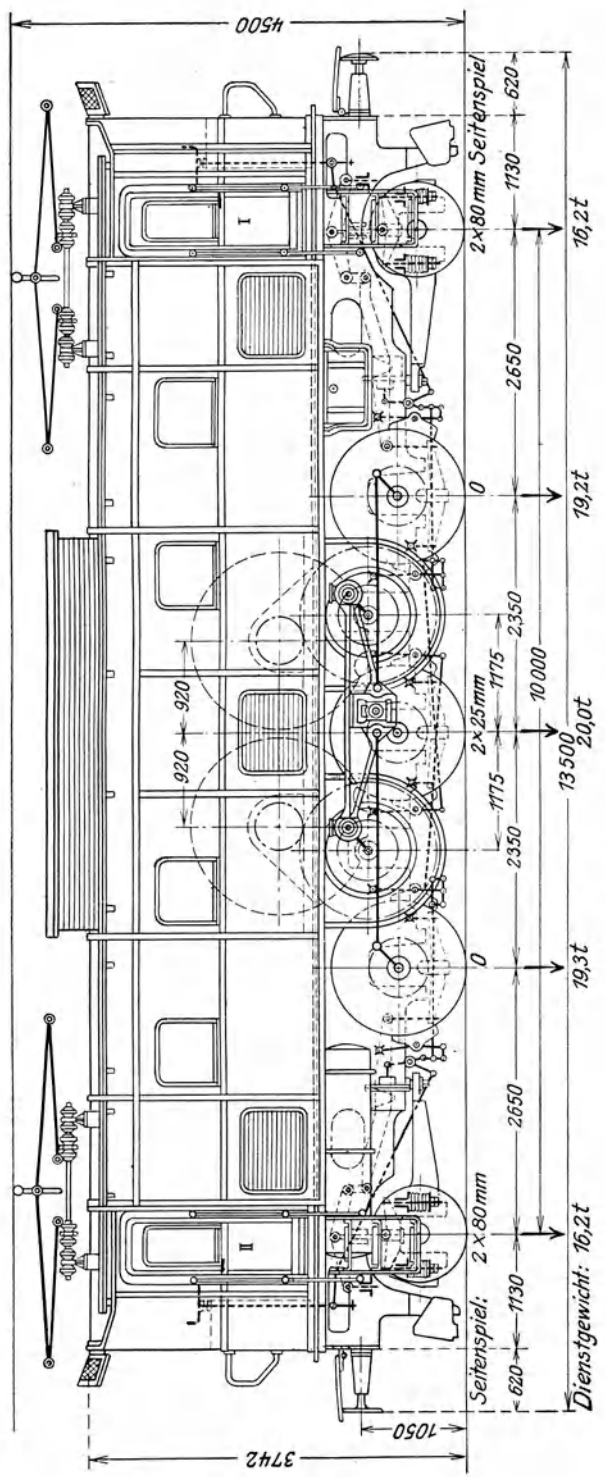


Abb. 549a. Schweiz, Gotthard, 1919, R 11302.



Seefehlner, Elektr. Zugförderung. 2. Aufl.

Abb. 550. Schweiz, Gotthard, 1919, R 11201.

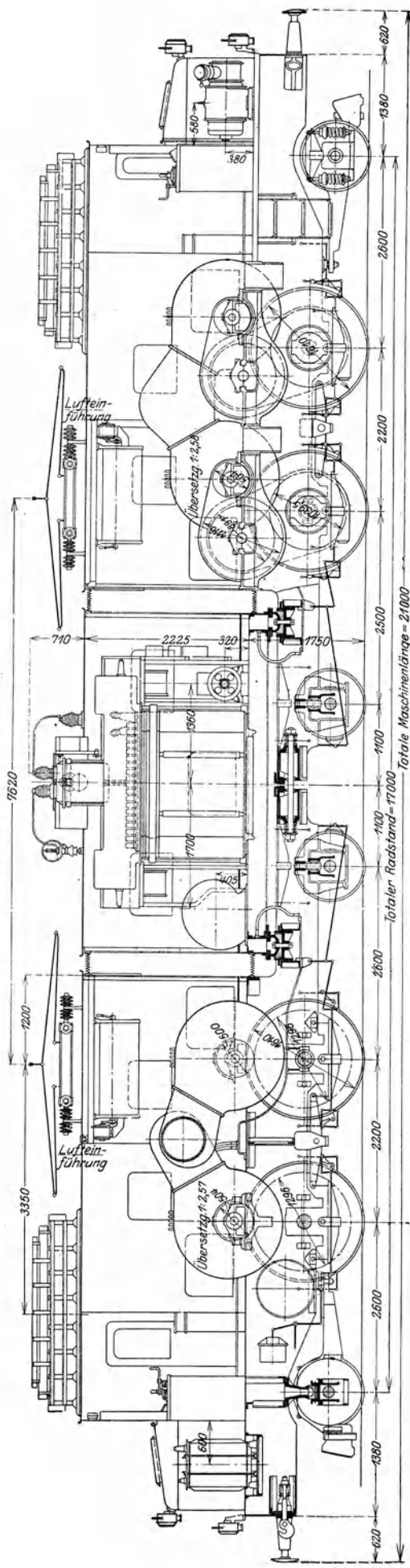


Abb. 553. Schweiz, SBB, R 11000.

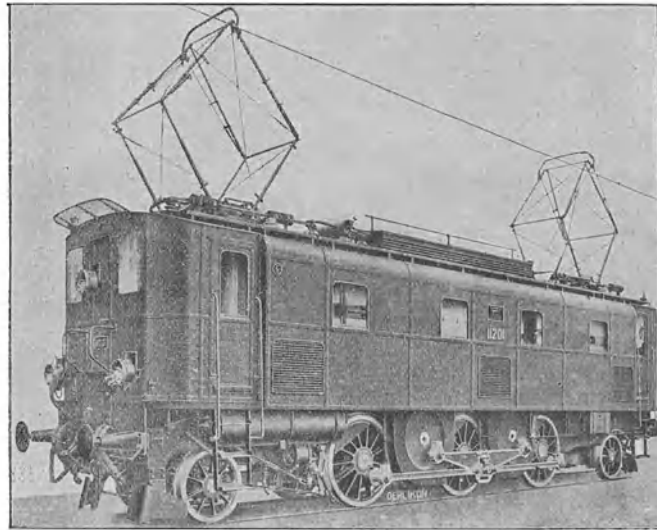


Abb. 550a. Schweiz, Gotthard, 1919, R 11 201.

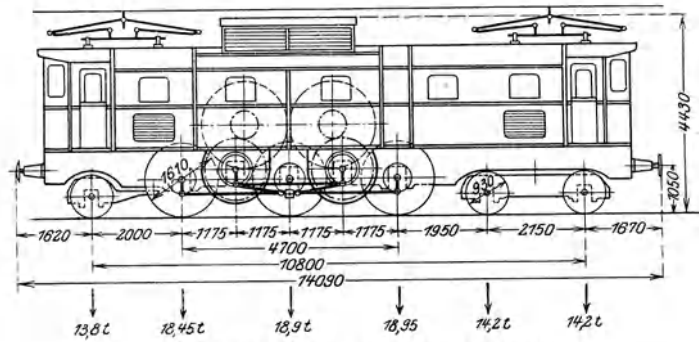


Abb. 551. Schweiz, SBB, R 10 401.

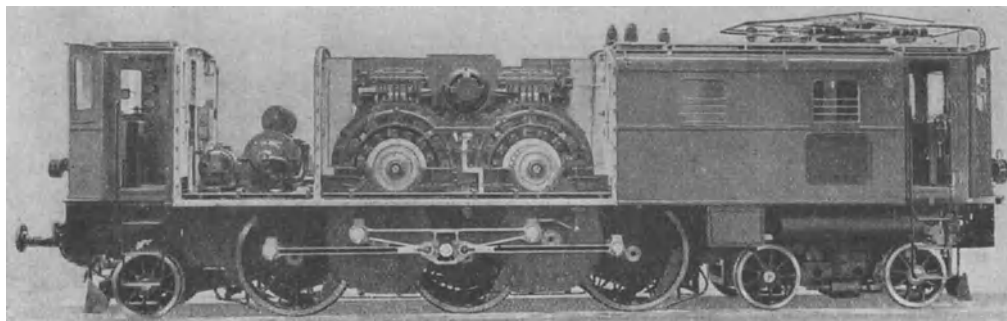


Abb. 551 a. Schweiz, SBB, R 10 401.

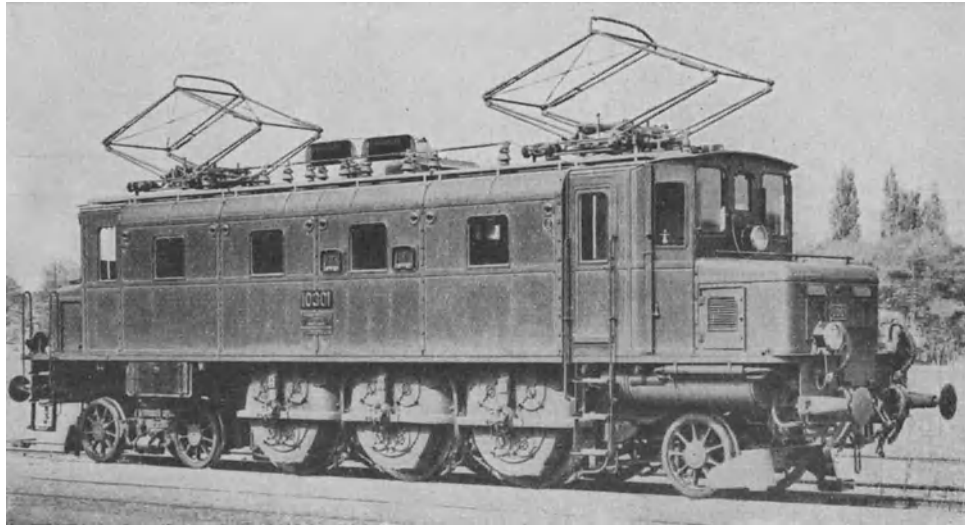


Abb. 552 a. Schweiz, SBB, R 10301.

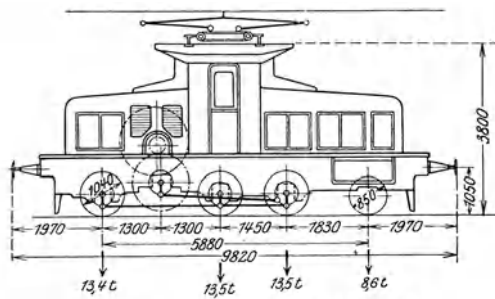


Abb. 554. Schweiz, SBB, R 16301.

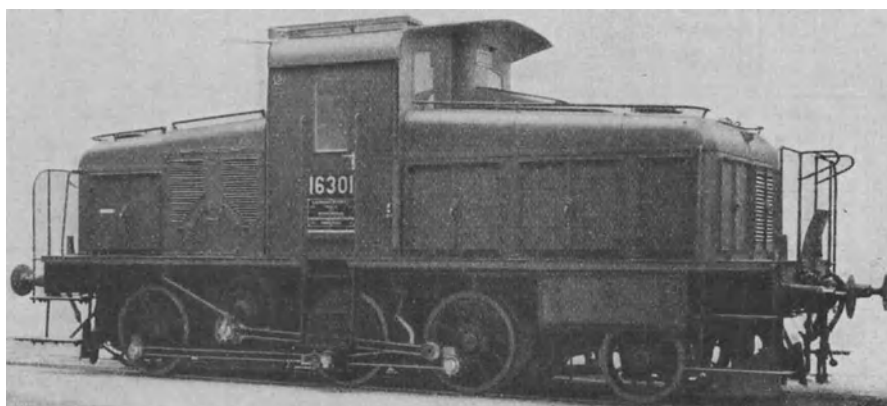


Abb. 554 a. Schweiz, SBB, R 16301.

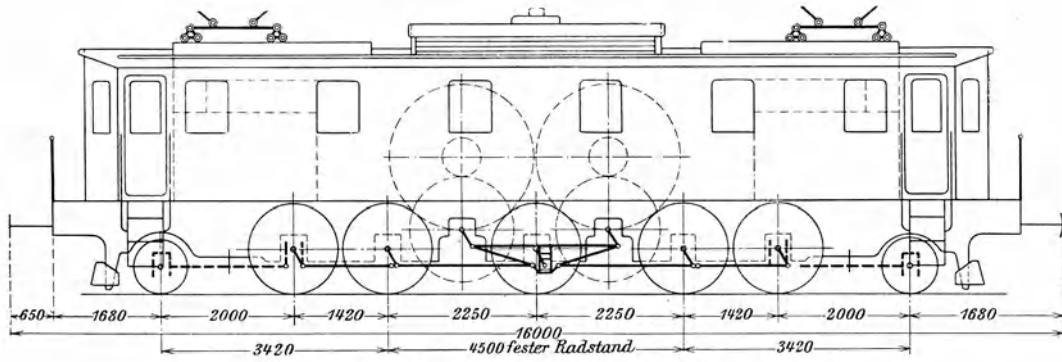


Abb. 555. Schweiz, Lötschberg, 1914.



Abb. 555 a. Schweiz, Lötschberg, 1914.

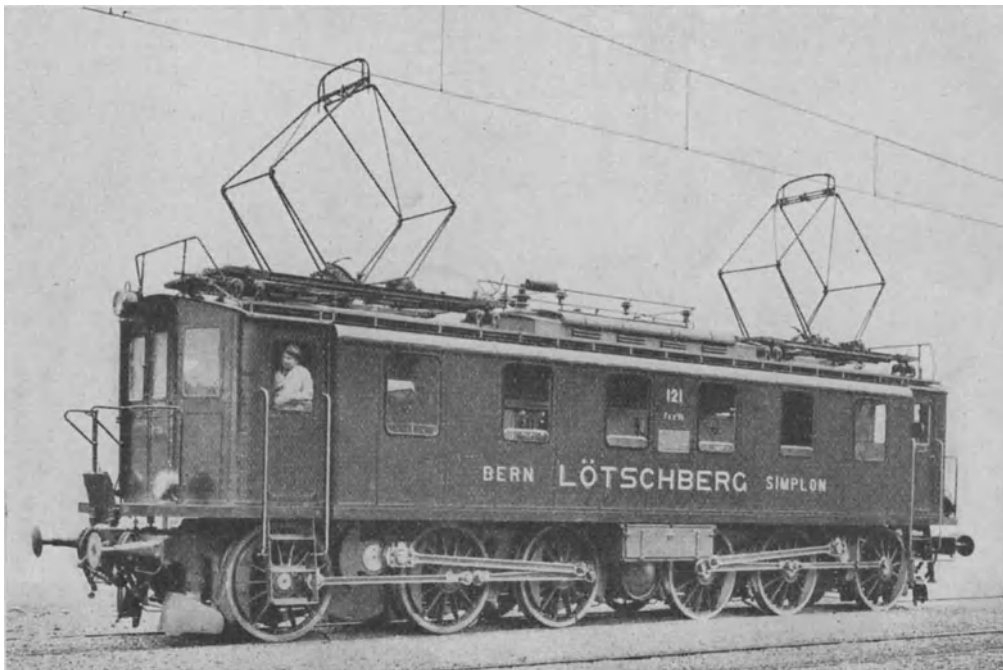


Abb. 556 a. Schweiz, Lötschberg, 1910.

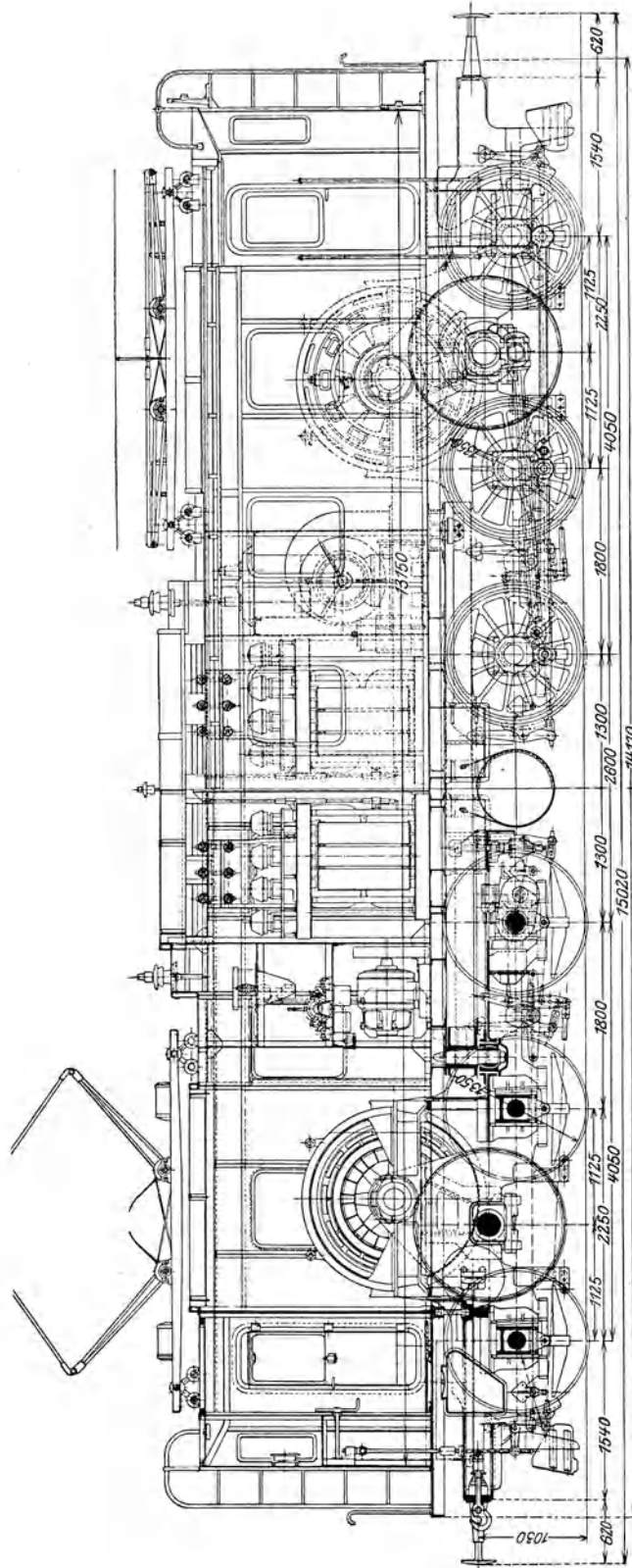


Abb. 556. Schweiz, Lötschberg 1910.

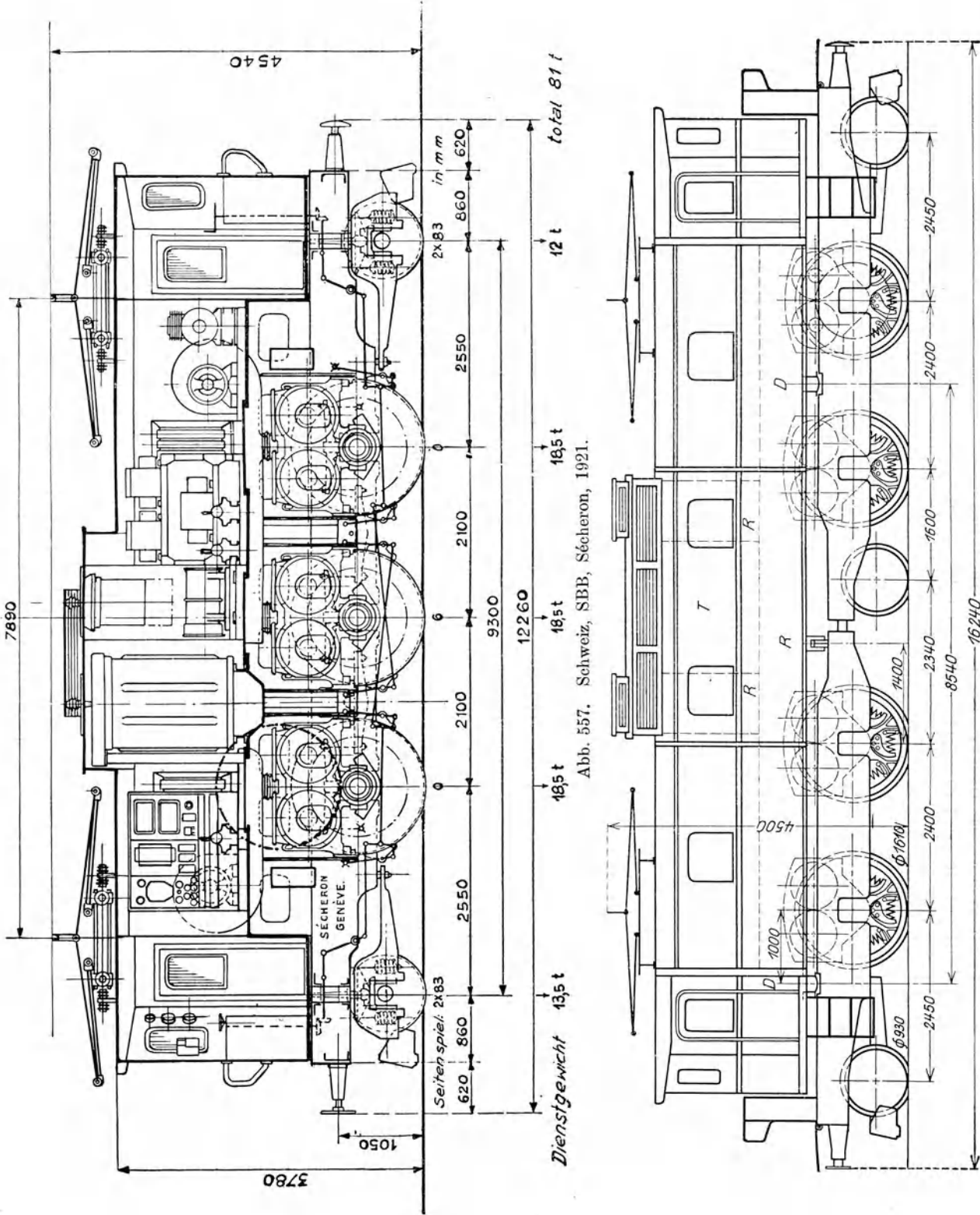


Abb. 557. Schweiz, SBB, Sécheron, 1921.

Abb. 558. Schweiz, SBB, Sécheron, 1921.

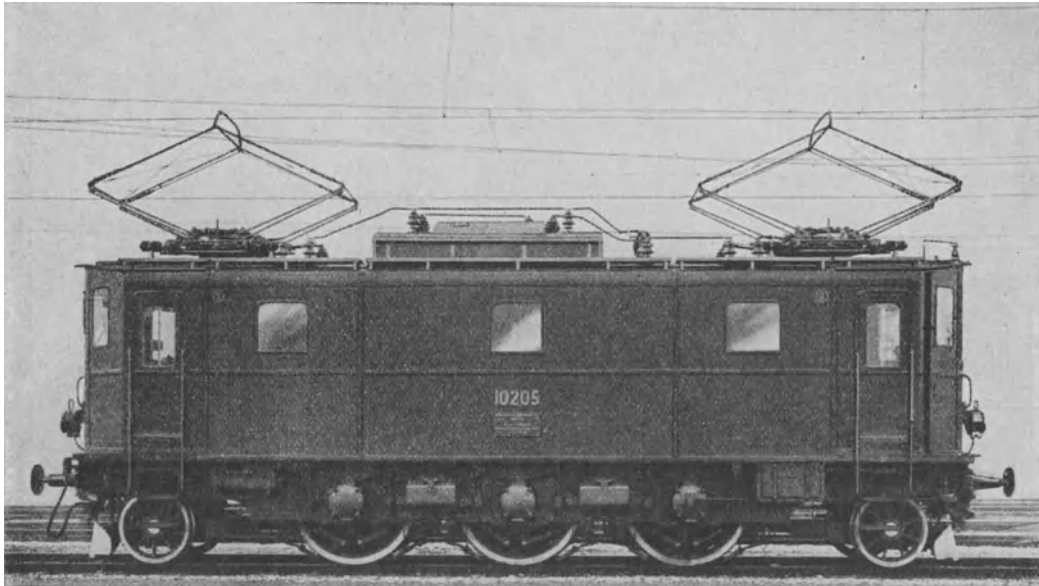


Abb. 557a. Schweiz, SBB, Sécheron, 1921.

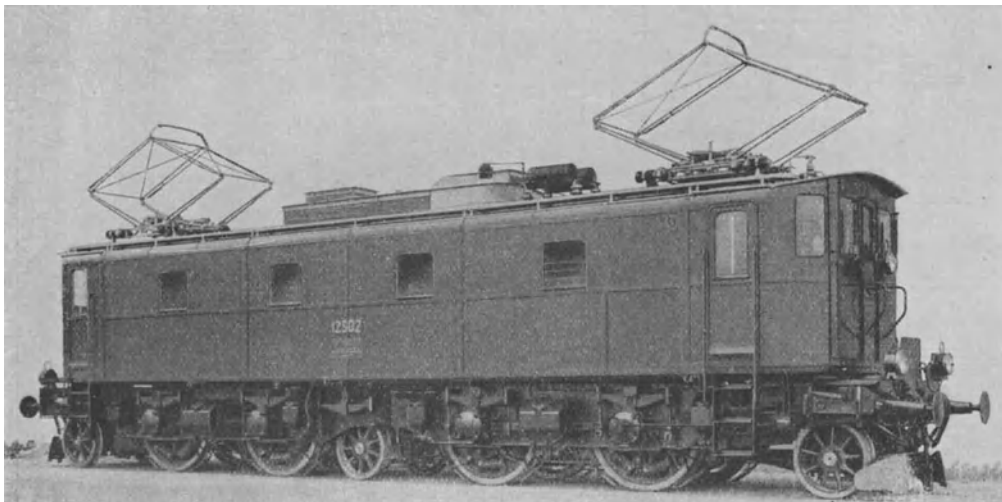


Abb. 558a. Schweiz, SBB, Sécheron, 1921.

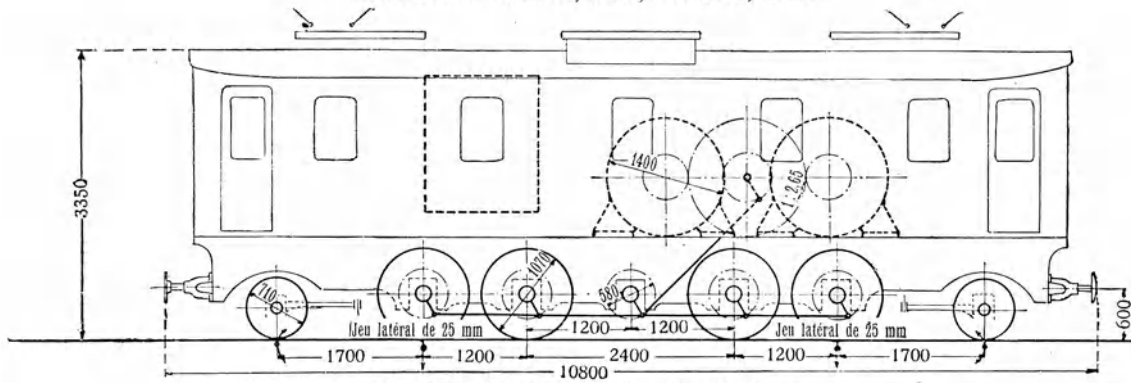


Abb. 560. Rhätische Bahn, R 391. AEG.



Abb. 559. Schweiz, Valle Maggia.

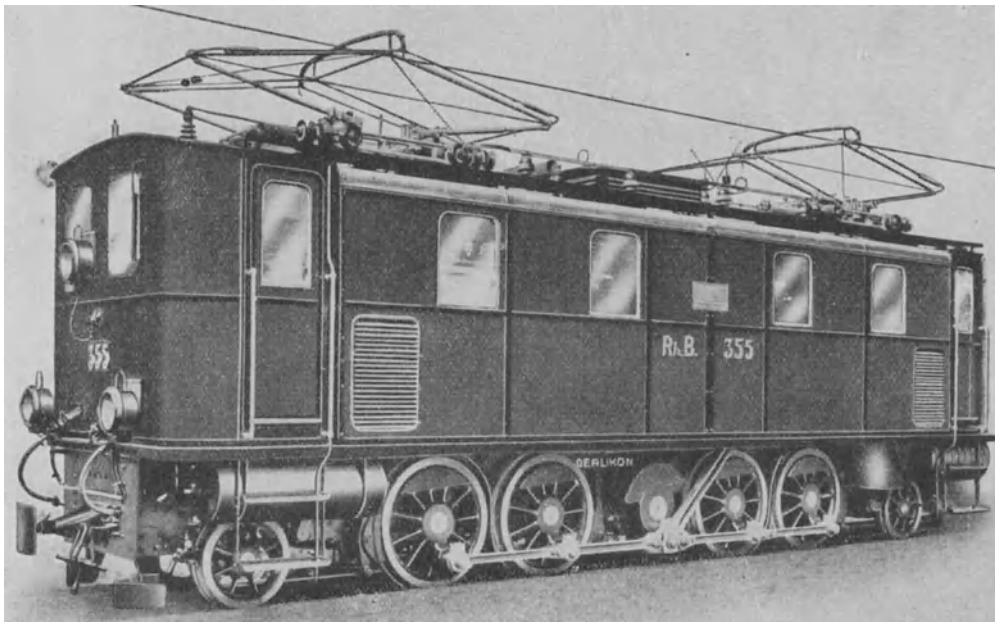


Abb. 561 a. Rätische Bahn, R 355.

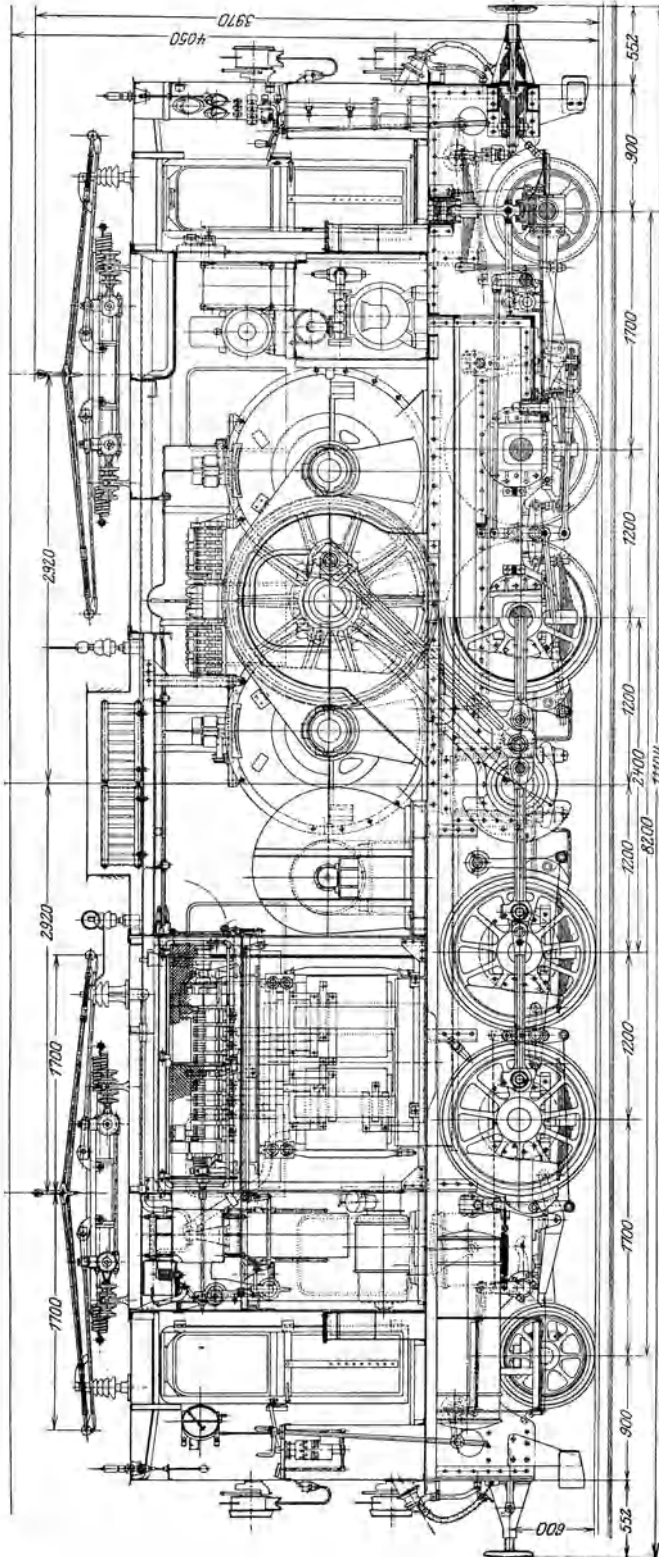


Abb. 561. Rhätische Bahn, R. 955.

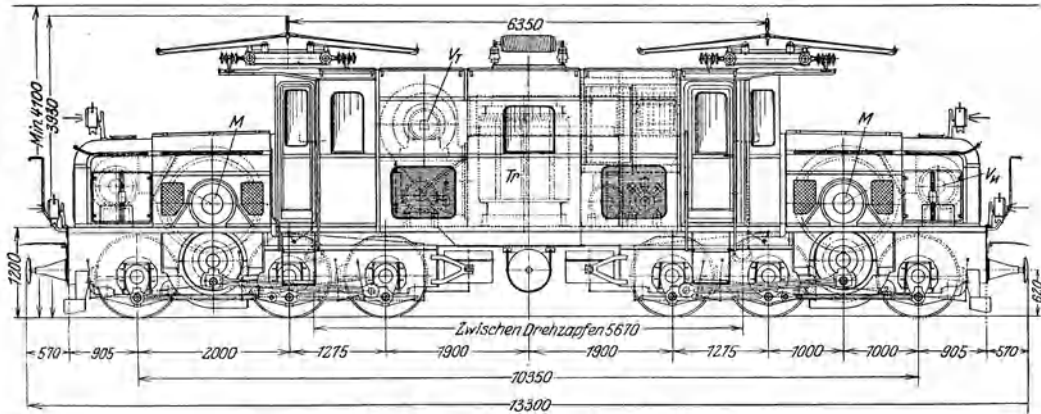


Abb. 562. Rhätische Bahn, R 401.

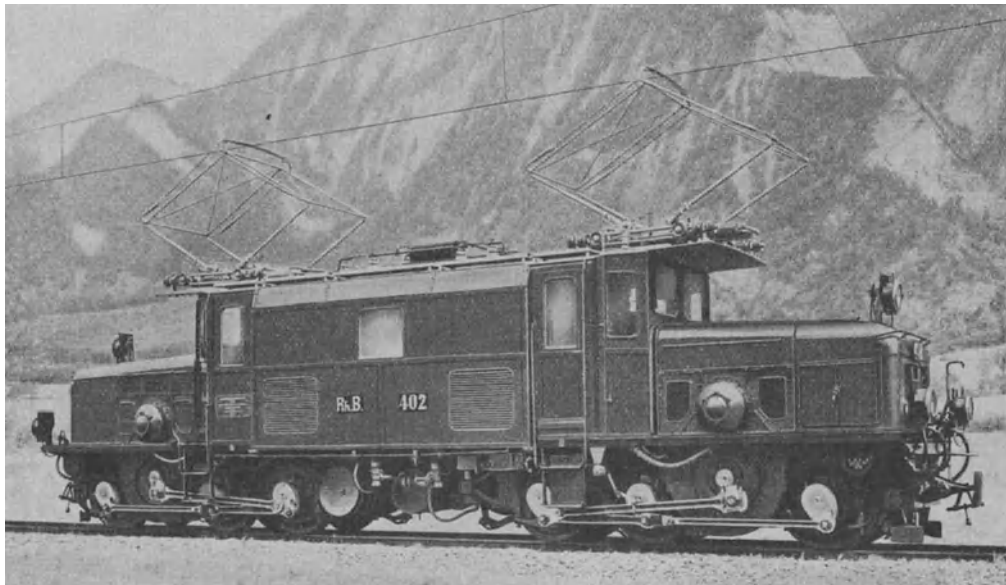


Abb. 562a. Rhätische Bahn, R 401.

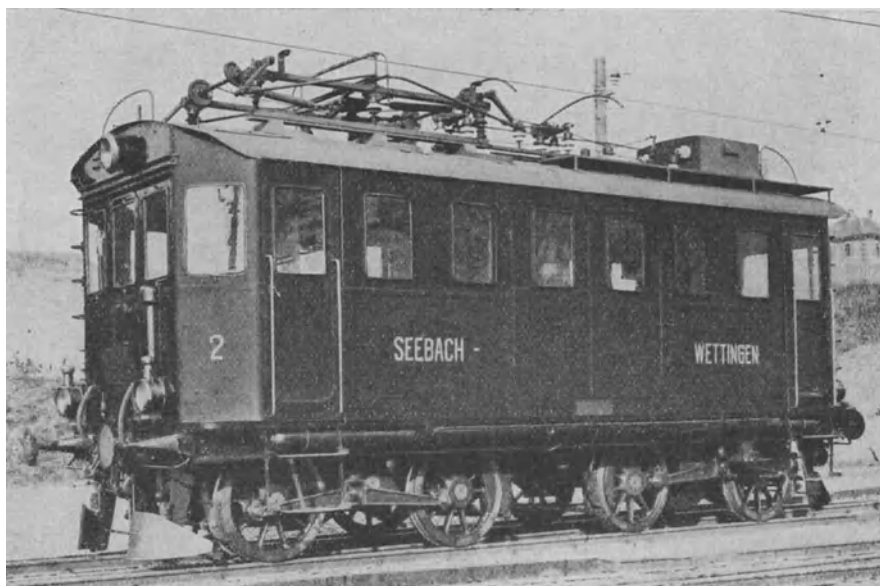


Abb. 563a. Seebach—Wettingen, Nr. 2.

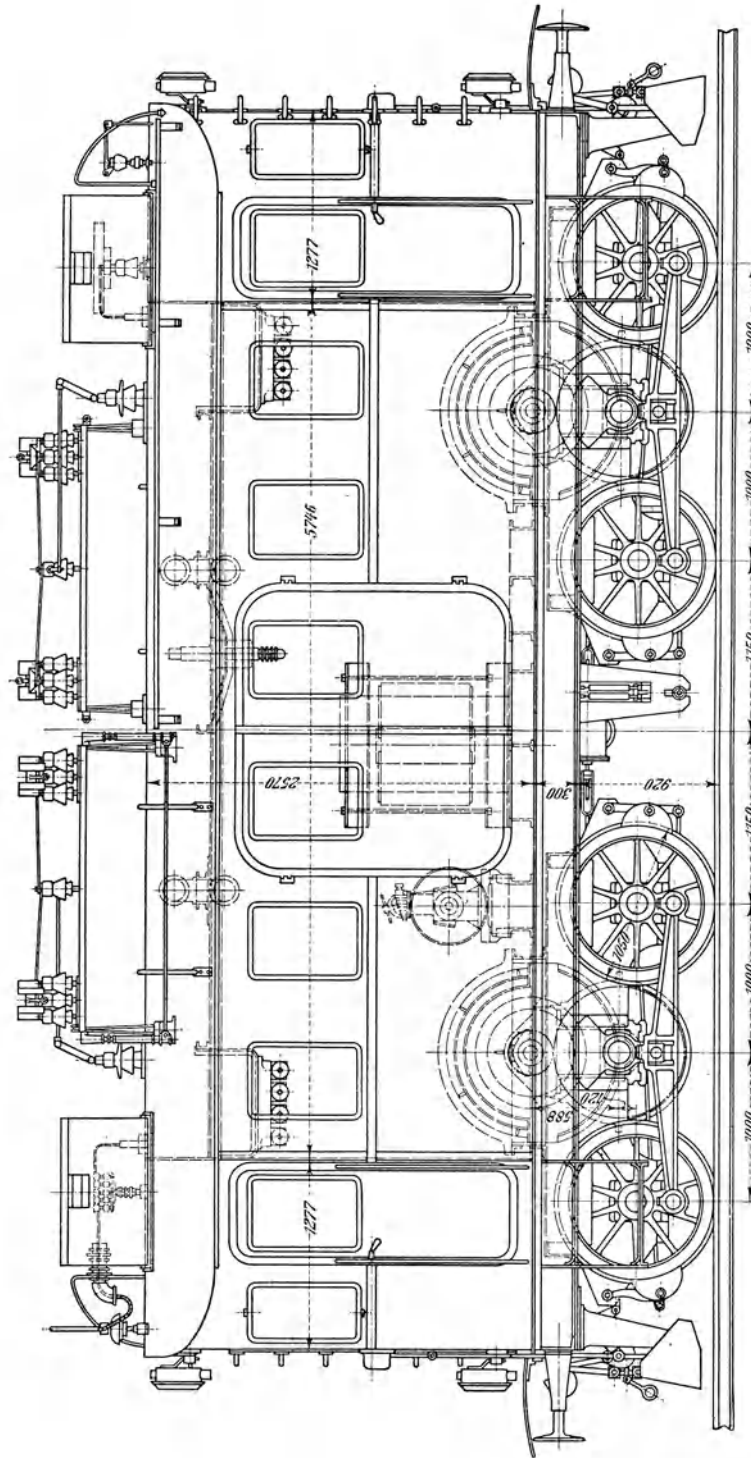


Abb. 563. Seebach—Wettingen, Nr. 2.

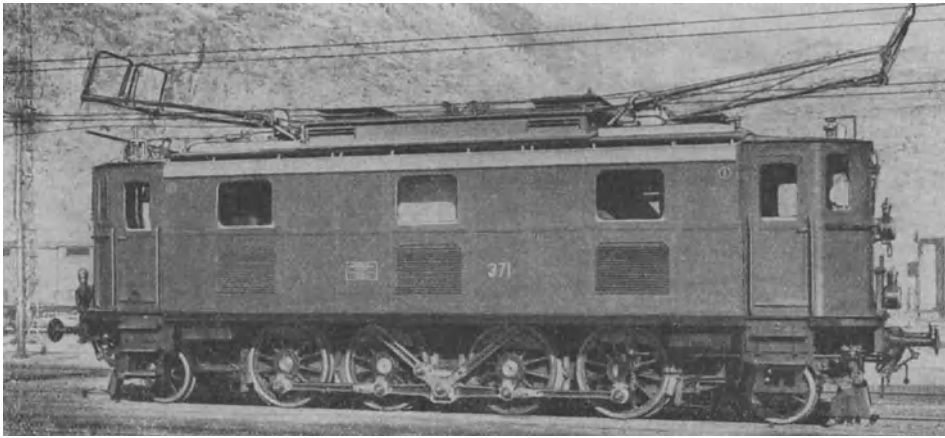


Abb. 566. Simplon, 1917, R 37.

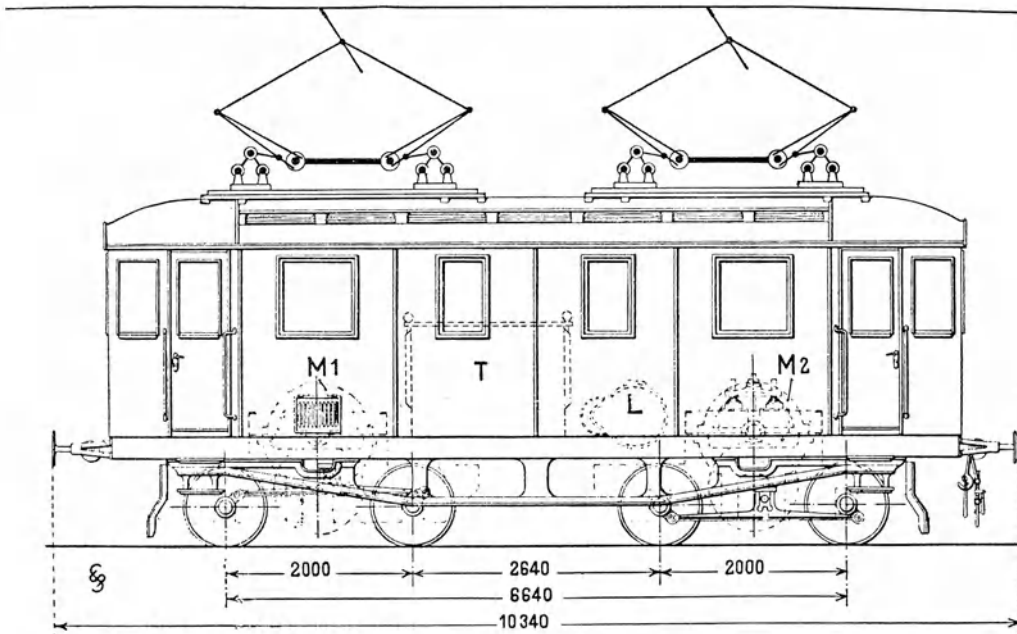


Abb. 567. Vác-Gödöllő, 1911.

XIV. Gleislose Bahnen.

- Andrews: Bus and car costs compared. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 24 und Nr. 18.
 Chardin. La ligne d'omnibus électriques à trolley de Modane à Lanslebourg. RGE 1923, Bd. 14, Nr. 23.
 Findeis: Schienenlose Bahnen. Neue Freie Presse 9. Mai 1922.
 Iglesias-Peridier: Les autobus électriques à trolley. BSFE Juli 1912. Ref. RGE 1923, Bd. 13, Nr. 15.
 Jackson: Trackless trolleys at work abroad. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 20.
 Kennelly and Schurig: Tractive resistances on different roads at different speeds. Proc. 1918, H. 6.
 Kurz: Schienenlose Drehstrombahnen. Öst. Städtezeitung Jänner 1922.
 Kurzel: Schienenlose Drehstrombahnen System Kurz. Wien: Auttramgesellschaft. 1921.
 Munroe: Railless electric traction. ER 1922, Bd. 91, Nr. 2328.
 Oetling: Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen Radbereifungen und Fahrbahn. München: Oldenbourg 1919.
 Schiemann: Gleislose Bahnen statt Straßenbahnen. EKB 1921, H. 21.
 Simon: Gleislose und Schienenbahnen. ERJ 1922, Bd. 59, S. 233. — Ref. ETZ 1922, H. 41.
 Soberski: Autoomnibus und gleislose Oberleitungsbahn in Wettbewerb mit Gleisbahnen für den Nahverkehr. ETZ 1923, H. 6.
 Taffs: Über gleislose Oberleitungszugförderung. ER 1923, Nr. 2358. — Ref. E.u.M 1923, H. 24.
 Thirlwall: The respective fields of the rail car, trolleybus and gasoline bus in city transportation. GER 1921, Nr. 12.
 Voit: Lastkraftwagenverkehr und Straßenerhaltung. ZÖIAV 1921, H. 6.
 Automatic control for railless cars. ERJ 1921, Bd. 58, Nr. 20.
 Tracless trolleys. ERJ 1921, Bd. 57, Nr. 2, 13, 14, 19, 22, 26. — Bd. 58, Nr. 24.
 Autobusse und Trambahnen in England. GC 1922, Bd. 58, S. 354. — Ref. ETZ 1922, H. 36.

1. Allgemeines. Die gleislosen Bahnen haben zum Ziel für untergeordnete Verkehrsaufgaben ein maschinell betriebenes Verkehrsmittel zu schaffen, das zufolge seiner geringen Anlagekosten mit der animalischen Zugkraft oder mit dem Benzinbetrieb in Wettbewerb treten kann, was den letztgenannten Betriebsarten gegenüber durch eine wirtschaftlich arbeitende Betriebskraft erzielt werden soll.

Der Gedanke, einem durch Elektromotoren angetriebenen freizügigen Fahrzeug den Strom mittelst 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 vier Fünfteln des sonst benötigten Anlagekapitals würde zweifelsohne eine bedeutende Entlastung der Betriebskosten von den festen, durch Verzinsung, Tilgung und Erneuerung des Anlagekapitals verursachten Ausgaben bedeuten.

Das Mindestbedürfnis der Verkehrsleistung, welches für die Bauwürdigkeit einer Bahnanlage vorausgesetzt werden muß: das Gleichgewicht der Betriebsrechnung, 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 Unebenheiten der Straßendecke verursachten Stößen nicht gewachsen waren. Diese Sachlage wird insbesondere deshalb noch ungünstiger, weil im Laufe der Zeit auch der Zustand der Straßendecke durch den Ver-

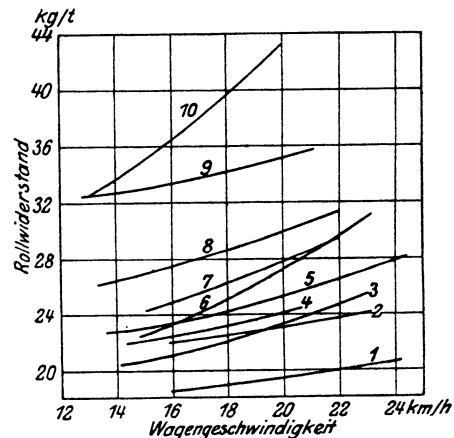


Abb. 568. Rollwiderstände auf Straßen.

1. Asphalt. 2. Holzpflaster. 3. Makadam. 4. Ziegelsteinpflaster. 5. Geteertes Makadam. 6. Granitpflaster mit zementvergossenen Fugen. 7. Schlacke. 8. Kies. 9. Sehr schmutzige, geteerte Straße. 10. Gewöhnliches Pflaster.

kehr der schweren Fahrzeuge leidet. Mit dem Fortschritt der Automobiltechnik ist der erstere Übelstand wesentlich gemildert worden; der letztere besteht nach wie vor. Die Zerstörung der Straßendecke ist insbesondere bei denjenigen Anlagen eine beträchtliche, bei welchen eine mehr oder weniger gleichmäßige, dichte Zugfolge eingehalten wurde. Demgegenüber ist das Verkehrsbedürfnis derartiger Anlagen sprunghaft und 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's gelten für Fahrzeuge mit Vollgummireifen folgende Werte:

Asphaltstraße	20	kg/t
Steinpflaster	20 bis 35	"
" trocken	20 bis 25	"
" naß	20 bis 35	"
" schlammig	35 bis 45	"
Landwege	50 bis 190	"

Kennelly und Schurig haben die in Abb. 568 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 — 50⁰/₁₀₀igen Ausnützung der gebotenen Fahrgelegenheit, so kann man die für den Stromverbrauch maßgebenden Vergleichszahlen mit Gleisebetrieb berechnen.

Ein Straßenbahntrieb- bzw. Anhängewagen wiegt — Sitz- und Stehplätze in beiden Fällen berücksichtigt — 120 bzw. 70 kg für die Person. 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 10⁰/₁₀₀.

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 $\frac{12400}{4770} \approx 2,6$ fachen Kraftaufwand, der für die Abnützung von Fahrzeug und Straßendecke — insbesondere der kostbaren Gummibereifung — aufgewendet wird.

Diese Rechnung stimmt mit den verschiedentlich veröffentlichten Stromverbrauchszahlen gut überein. Der Stromverbrauch für das Tonnenkilometer beträgt 110 bis 210 Wh, im Mittel etwa 150 Wh, d. h. das 2,5- bis 3fache des bei Straßenbahnen unter ungünstigsten Verhältnissen erzielten Wertes.

Diese Betrachtungen weisen auf diejenigen Verhältnisse hin, unter welchen der gleislose Betrieb mit einigen Aussichten auf Erfolg in Betracht gezogen werden kann.

Die Voraussetzung hiezu ist eine tragfähige, in gutem Zustand erhaltene Straßendecke und spezifisch leichte, kräftig gebaute Fahrzeuge, die mit mäßiger Geschwindigkeit fahren.

Bei den ausgeführten Anlagen findet man Fahrgeschwindigkeiten bis zu 35 km/h und Reisegeschwindigkeiten von 15 bis 25 km/h, im Mittel etwa 13 bis zu 15 km/h. Wenn man bedenkt, daß diese Ergebnisse selbst mit einem hochentwickelten Verkehrsmittel auf vorzüglicher Fahrbahn, wie es die Straßenbahnen sind, kaum übertroffen werden können, so ist es einleuchtend, daß die Geschwindigkeiten zu hoch gewählt sind und

eine Hauptursache für den großen Verschleiß der Fahrzeuge und die rasche Zerstörung der Straßendecke bilden. Hohe Geschwindigkeiten anzuwenden ist um so weniger Anlaß, als eine Konkurrenz 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. auch der Vorspannbetrieb auf Steilrampen ein aussichtsreiches Gebiet. Allerdings versagt 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.

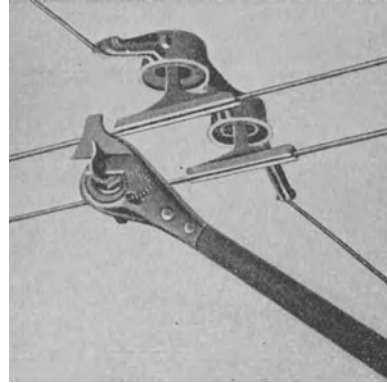


Abb. 569. Stromabnehmer Bauart Schiemann.

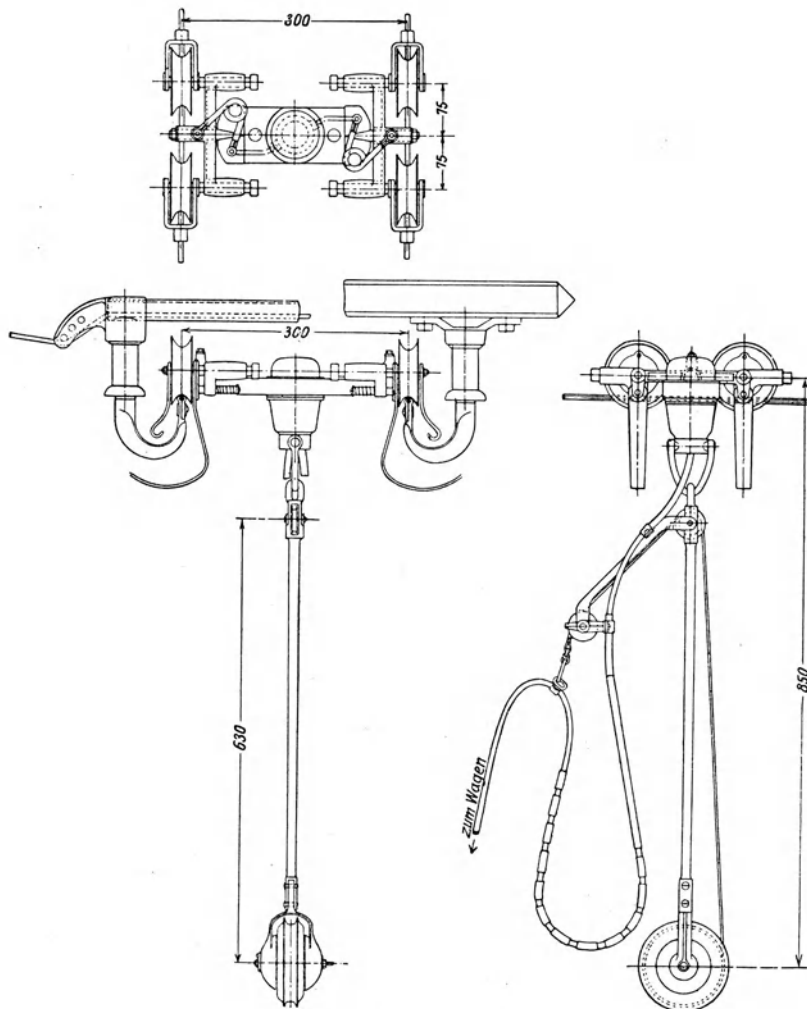


Abb. 570. Stromabnehmer Bauart Stoll.

Schiemann ordnet die Drähte nebeneinander an und bestreicht dieselben von unten mit zwei, auf einer Rute gelenkig sitzenden Schleifkontakten. Die Fahrleitung

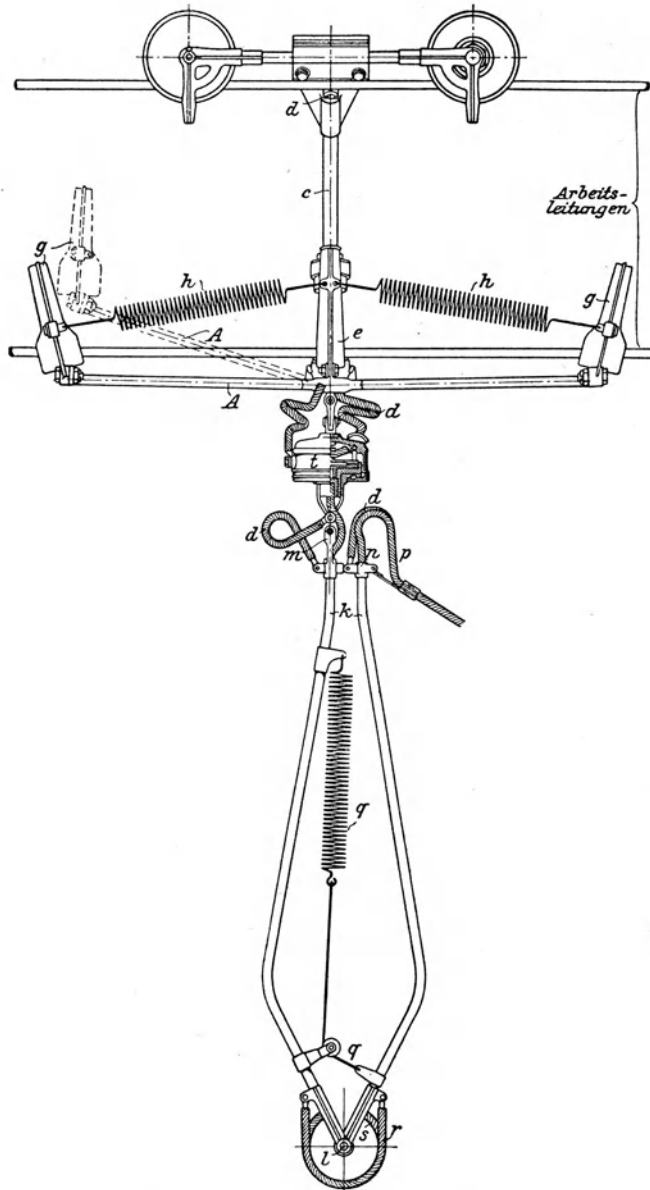


Abb. 571. Stromabnehmer Bauart Köhler.

nehmer 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 vorgehen werden.

Die Bauart Schieman verlangt im Hinblick auf den Richtungsbetrieb die Anordnung der Fahrleitung in der Straßenmitte (Abb. 572).

kann hierbei genau so wie eine gewöhnliche Straßenbahnfahrleitung aufgehängt werden (Abb. 569). Die Rute des Stromabnehmers ist drehbar gelagert, ihre Länge mit etwa 5,5 m so bemessen, daß die Fahrzeuge nach beiden Seiten auf eine Entfernung von 3,5 m, gerechnet von der Achse der Fahrleitung, ausweichen können. Von zwei sich begegnenden Wagen hat nur der eine seine Stromabnehmer niederzuziehen, damit der andere ungehindert durchfahren kann. Neuere amerikanische Ausführungen der GEC bedienen sich der gleichen Anordnung.

Beim System Stoll besteht der Stromabnehmer (Abb. 570) aus einem vierrädrigen Wägelchen, welches mittels einer gefederten Schnur nachgeschleppt wird. Die Fahrdrähte werden von oben bestrichen und müssen durch gekrüpfte Halter von unten gestützt werden. Sie sind in 30 cm Entfernung nebeneinander angeordnet. Je nach der Länge des Schleppseiles ist ein seitliches Ausweichen bis zu 12 m möglich.

Bei der Anordnung Lloyd-Köhler liegen die beiden Fahrdrähte übereinander. Der obere Draht wird von oben bestrichen; auf ihm laufen zwei Rollen des einen Poles des Stromabnehmers. Der untere Draht wird auf der unteren Seite von zwei Schleifbügel bestrichen (Abb. 571).

Bei beiden letztangeführten Systemen müssen die Stromab-

In breiten Straßen wird es nötig, für jede Richtung eine eigene Doppelleitung anzulegen.

Da die Reichweite der Fahrleitung — es fehlen die hochwertigen Schienen —

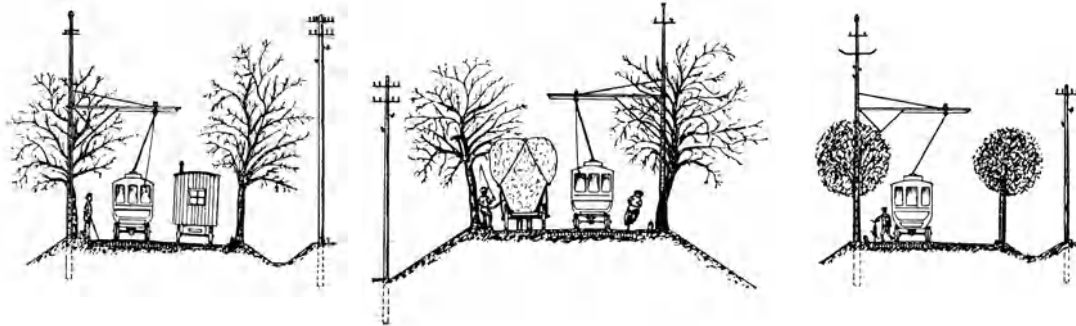


Abb. 572. Straßenbild mit Fahrleitung und ausweichenden Fahrzeugen (Schiemann).

verhältnismäßig gering ist und bei einigermaßen lebhaftem Straßenverkehr das Umwecheln der Stromabnehmer unerwünschte Aufenthalte verursacht, pflegt man bei allen drei Systemen für jede Fahrtrichtung eine eigene Doppelleitung anzulegen, die am Bahnende als Schleife befahren wird. Unter einem wird auf diese Weise der elektrische Querschnitt 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 V. 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 weiters 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. Von diesem Standpunkt kann die Bauart mit in die Radnabe verlegten Motoren (Abb. 573) als überholt angesehen werden, weil die ungefederten Massen zu groß sind. Zufolge gyro-

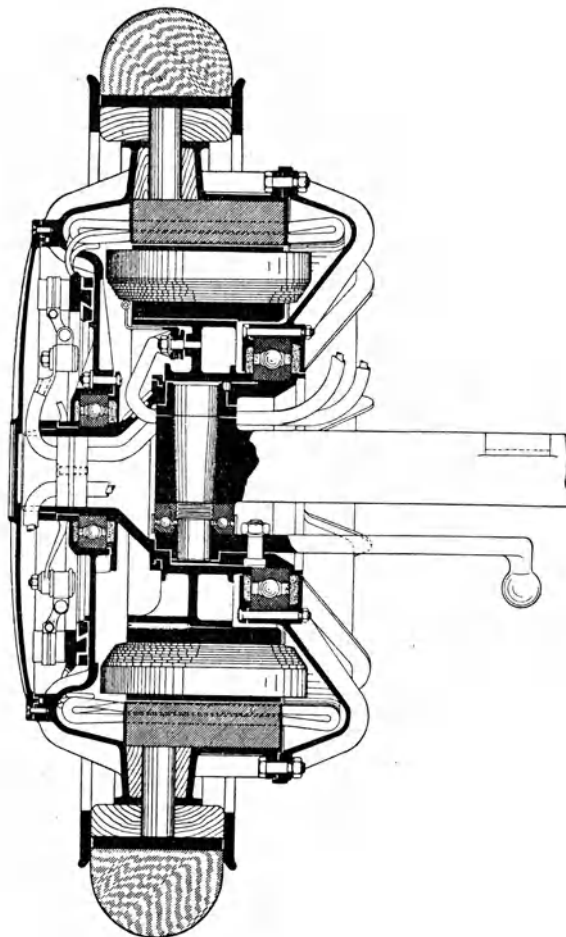


Abb. 573. Nabenmotor im Lenkrad (Lohner—Porsche—Daimler).

skopischer Wirkung der Nabenmotoren neigen diese Wagen auch mehr zum Schleudern und sind schwerer lenkbar.

Die Befestigung des Motors im Rahmen wie bei Benzinautomobilen ist mechanisch wohl umständlicher, weil Wechselgetriebe, Kardan- und evtl. Kettenantrieb nötig sind, doch sind diese Übertragungsbehelfe durchaus betriebssicher.

XV. Kalorische Fahrzeuge mit elektrischer Kraftübertragung.

Englische turboelektrische Lokomotive. Eng. 1909, S. 613. — Ref. EKB 1910, H. 15.

Hagenbucher: Diesellokomotiven. Kruppsche Monatshefte 1922, H. 4.

Heilmann: La locomotive électrique Heilmann. Paris 1894. GC 1893, Bd. 22, Nr. 14 u. 22.

Pahin: La traction thermoelectrique par automotrices. LE 23. Okt. 1915. — RGE 1921, Nr. 12. — Ref. EKB 1922, H. 9.

Ramsay: Turboelektrische Lokomotive. Ref. Eu.M 1922, H. 45.

Sperry: Neuer benzin-elektrischer Antrieb für Motorwagen. Automotive Industries, 12. Okt. 1922. — Ref. ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 48.

Elektromotor-Triebwagen mit eigener Kraftquelle. SBZ 1916, Bd. 68, Nr. 10.

Lokomotive mit turboelektrischem Antrieb. Eng. 1922, März. — Ref. ZVDI 1922, Bd. 66, Nr. 14. — Eu.M 1922, H. 22. — MFOM 1922, Nr. 4.

Petroleum-(Benzol-)elektrische Lokomotiven. RGE 1921, 31. Dez. — Ref. ZKB 1922, H. 9.

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 aber in dieser Hinsicht, wenn ein hochwertigerer Brennstoff als Kohle in einer wärmetechnisch vollkommeneren Maschine — Benzin- (Benzol-) oder Dieselmotor — zur thermomechanischen Energieumformung verwendet wird.

2. Grundsätze. Die 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-Gesell-

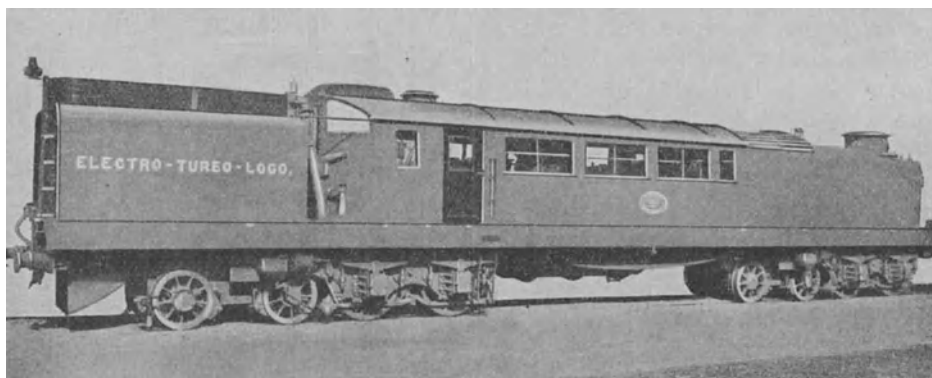


Abb. 574. 1000 PS-Dampf-Turboelektrische Lokomotive der North British Ry. Co. Gewicht 132 t.

schaft (Abb. 574) wiederholte Versuchsausführung grundsätzlich betrachtet werden, weil an Hand dieses Beispielen die Gesichtspunkte, die für dieses System mit selbstbeweglicher Stromerzeugung sprechen, zu erkennen sind.

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 dieser elektromechanischen auch noch eine rein elektromagnetische Umformung und dementsprechend ein Mehraufwand an Gewicht nötig.

Weiters ist vor Augen zu halten, daß die mit einem bestimmten Gewichts-aufwand erzielten Dauerleistungen elektrischer Triebfahrzeuge zeitlich unbeschränkt abgegeben werden können.

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 sind der Kohlen- und der Wasservorrat der Dampflokomotive anzusehen. Das Gewicht dieser Energieträger erreicht im Mittel etwa das Gewicht der übrigen auf der Dampflokomotive zur Arbeitsumformung mitgeführten Einrichtungen.

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 unmittelbarer, vielmehr findet primär die Umformung der im Brennstoff enthaltenen Energie in Wärme und sekundär durch diese 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 drei 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 sämtliche Lokomotivachsen angetrieben werden können; jedenfalls kann das Tendergewicht zum Antrieb nicht ausgenützt werden.

Das Ziel des Heilmann-Systems war allem Anscheine nach:

1. den Antrieb aller Achsen, somit auch derjenigen, die durch die Brennstoff- und Wasserbehälter belastet waren, zu ermöglichen;
2. eine wirtschaftlich arbeitende, vom Laufwerk unabhängige Dampfmaschine verwenden zu können und schließlich
3. eine gute Geschwindigkeitsregelung in dem Sinn zu erzielen, daß es durch geeignete Schaltung der Motoren und Regelung der Spannung möglich ist, innerhalb eines sehr großen Geschwindigkeitsbereiches 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 ganz unpraktikable Gewichte ergeben muß.

Diesbezüglich genügt der Hinweis, daß schon bei rein elektrischen Lokomotiven für höhere Geschwindigkeiten das Baugewicht größer ist als das Triebgewicht; Laufachsen sind daher auch bei diesen unvermeidlich.

Der Vorteil einer wirtschaftlich arbeitenden Dampfmaschine dürfte bei dem damaligen Stande der Technik mit den verwendeten schnellaufenden Vertikalmaschinen — es gab noch keine Dampfturbinen — und in Ermanglung einer Kondensation kaum erreicht worden sein.

Ein im Jahre 1910 von der Britischen Nordbahn-Gesellschaft mit einer 1000 PS-Turbolokomotive unternommener Versuch hat zu keiner weiteren Nachahmung in größerem Umfange geführt. Die nach dem Schema $2 - 2A + 2A - 2$ gebaute Lokomotive (Abb. 574) wog 132 t, d. h. reichlich das Doppelte einer rein elektrischen Maschine der gleichen Leistung und hatte eine enorme Länge. Für den Antrieb war eine 3000-tourige Zoellyturbine samt Kondensator vorhanden. Das Treibgewicht betrug 89 t.

Wie sich die Maschine im Betrieb bewährt hatte, darüber ist nichts verlautet.

Nach den Angaben von Ramsay ist im Jahre 1922 eine für wasserarme Gebiete bestimmte dampf-elektrische $1 - C + C - 1$ -Lokomotive gebaut worden, deren Erprobung im Gange ist. Der Antrieb erfolgt durch vier Drehstrommotoren von je $360/275$ PS; auch diese Lokomotive weist ein hohes Baugewicht je PS auf. Die Geschwindigkeit wird durch Kaskaden- und Nebeneinanderschaltung der Motoren und Änderung der Periodenzahl geregelt.

Der Vorteil der wirtschaftlichen Geschwindigkeitsregelung mit elektrischer Kraftübertragung ist unter den bei der Dampfmaschine obwaltenden Umständen zu teuer erkaufte und nicht am Platze, denn gerade in diesem Belange ist die Dampfmaschine dem Elektromotor beinahe überlegen, denn dieser 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 jedoch in Kauf genommen werden, wenn durch die Art des Brennstoffes und der Betriebsmaschine die durch die praktischen Verhältnisse gegebenen Gewichte nicht überschritten werden. Die elektrische Kraftübertragung gewinnt des weiteren eine Berechtigung, wenn die Antriebsmaschine keine oder nur eine mangelhafte Geschwindigkeitsregelung zuläßt und keine Anfahrzugkraft 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 Dampftrieb 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 mittlere Heizwerte von 10000 bis 10500 Kalorien aufweisen. Mit dem gleichen Brennstoffgewicht wird man beim Benzinmotor somit etwa eine 7fache, 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.

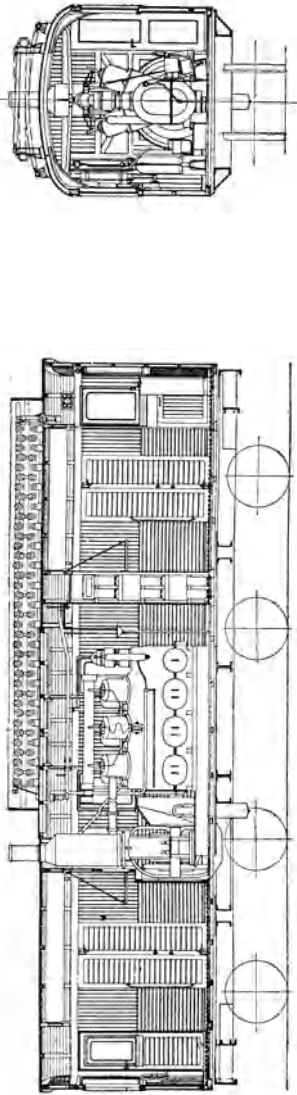


Abb. 575. Dieselelektrischer Triebwagen (DEVA) 2 A + 2 A.
 Spurweite 891 mm
 Leistung 120 PS
 Dienstgewicht 27,6 t
 Zuggewicht einschl. Triebwagen in 10‰ Steigung
 92 t bei 20 km/h

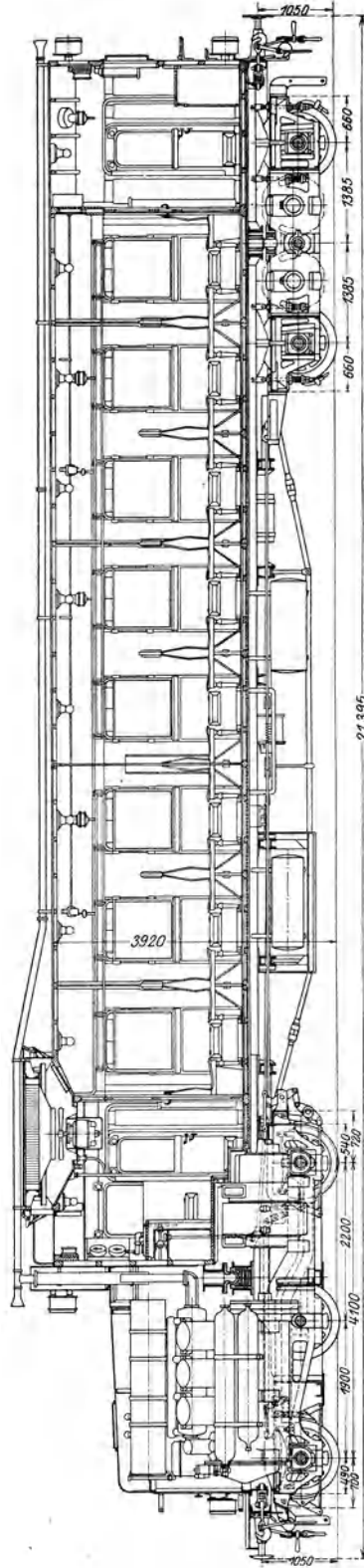
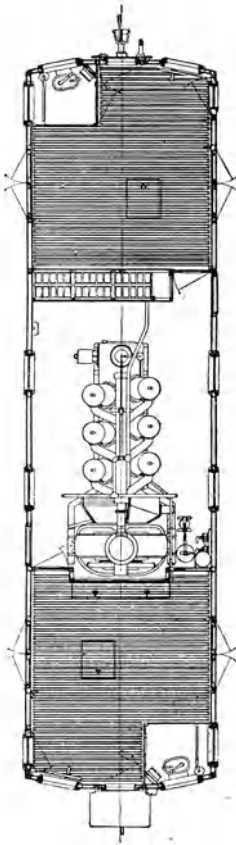


Abb. 576. Dieselelektrischer Triebwagen der sächsischen Staatsbahnen (Sulzer-BBC).
 Leistung der Triebmaschine 200 PS
 Umlaufzahl 400/min
 Leistung des Generators 190/140 kW
 Spannung 300 V
 Dienstgewicht leer 64 t
 Fahrgeschwindigkeit 40–70 km/h
 Länge über Puffer 21 385 mm
 Radstand fest 4 100 mm

Beide Maschinenarten sind praktisch an eine feste Drehzahl gebunden, wenn auch der Benzinmotor in diesem Belange den Dieselmotor übertrifft, indem die Drehzahl des ersteren 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 das gleiche spez. Gewicht ungünstige Verhältnisse, insbesondere eine mangelhafte Ausnützung des Treibgewichtes; es kommt der Diesel- oder benzinelektrische Betrieb, abgesehen davon, daß Motoren dieser Leistung noch nicht handelsfähig erzeugt werden, nicht in Frage.

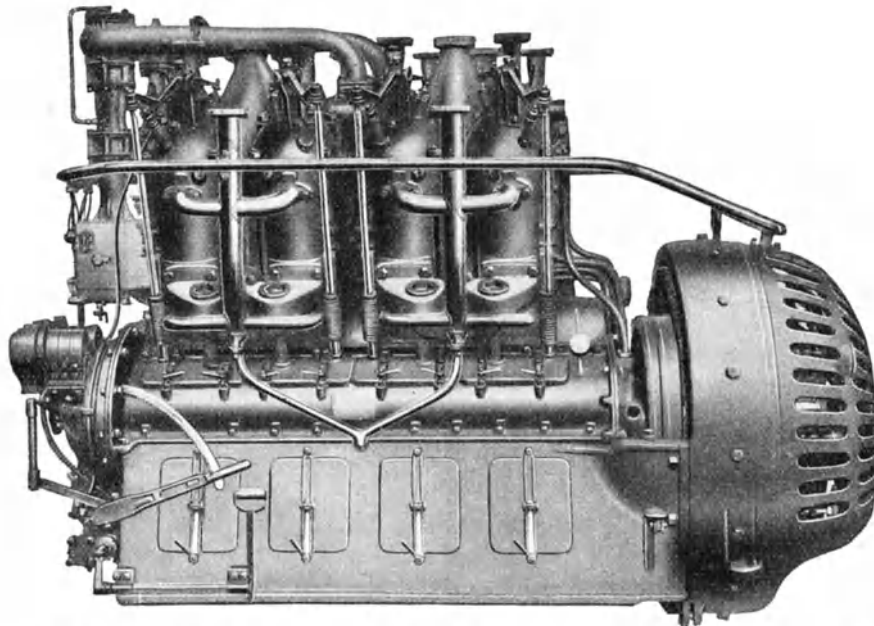


Abb. 577. Achtzylinder-benzinelektrische Gruppe für eine 55 t-Lokomotive (GEC).
Leistung 175 PS — 120 kw, 600 V max. 720 A max während 30 sek., Drehzahl 550/min.

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 Linie 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 Diesel-elektrische Triebwagen (Abb. 575) stehen in Schweden in Betrieb. Die sächsischen Staatsbahnen besitzen einen 200 PS-Triebwagen (Abb. 576).

Die Schwierigkeit der Umgestaltung der bewährten Bauformen der ortsfesten Maschinen darf nicht unterschätzt werden, indem der Übergang auf leichte schnellaufende 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 Automobilmotoren 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, wenn man

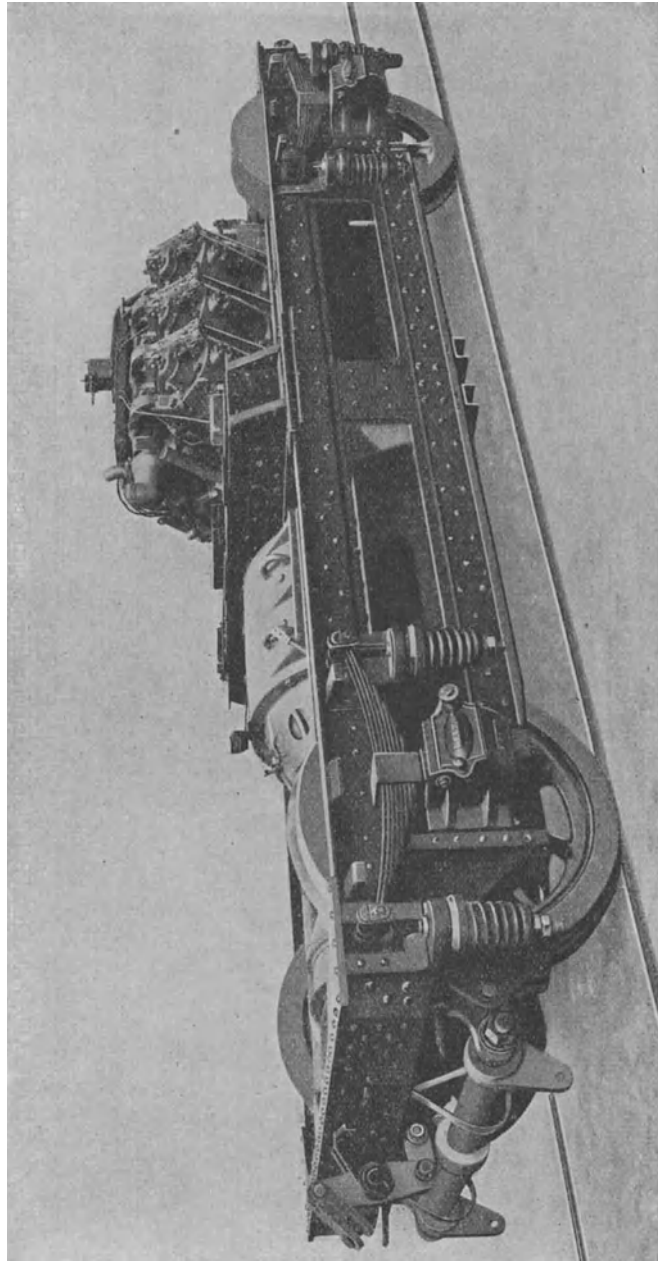


Abb. 578. Maschinengestell des benzinelektrischen Triebwagens der preuß. Staatsbahnen, 120 PS, 750 Uml./min (AEG).

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 20 bis 25 kg/PS Gewicht und nicht über 700 bis 800 Uml./min aufweisen.

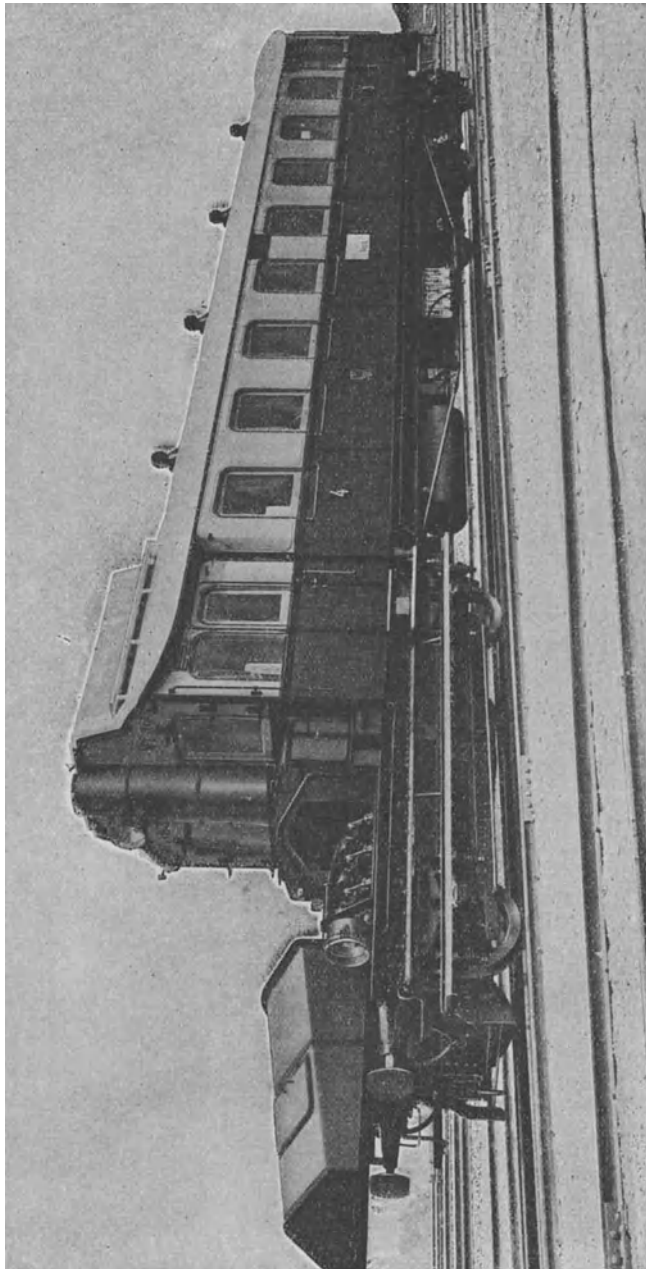


Abb. 579. 120 PS benzolelektrischer Triebwagen der preuß. Staatsbahnen (AEG).
 Fassungsraum 100 Personen Höchstgeschwindigkeit 60 km/h

Sorgfältige Auswuchtung, gute Kühlung und ein die Drehzahl selbsttätig festhaltender Fliehkraftregler sind für einen einwandfreien Betrieb unerlässlich (Abb. 577, 778).

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 dieser mit unveränderlicher Drehzahl läuft, ist es zwecklos, aus diesem Grunde die Zahl der Zylinder zu vermehren. Man wird Vier-

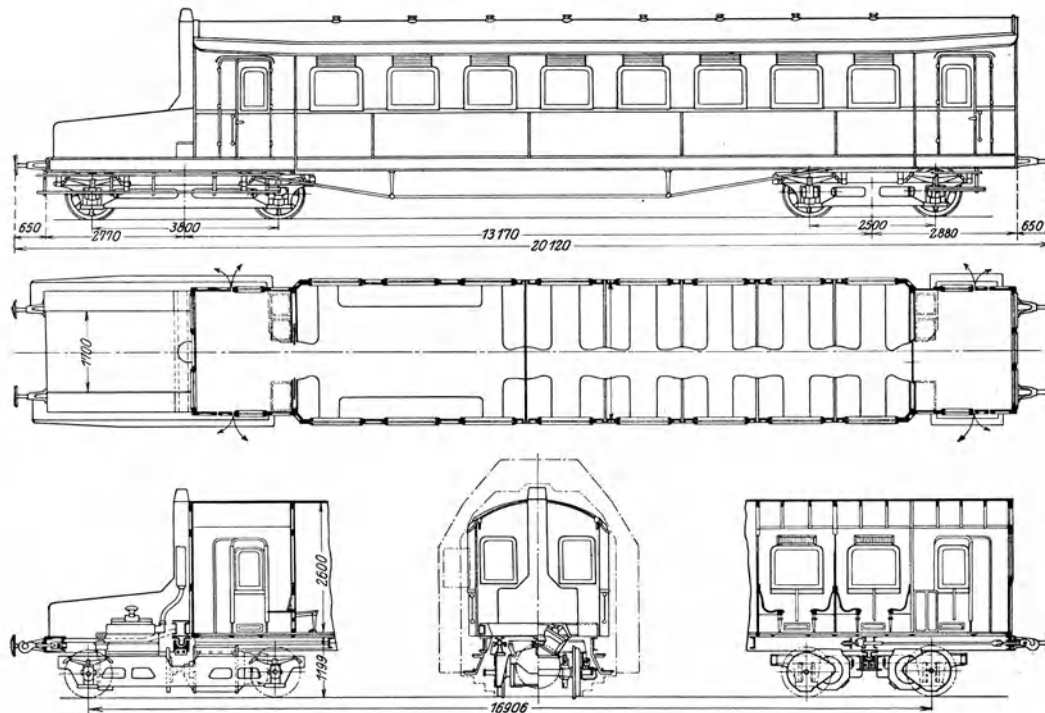


Abb. 580. 120 PS-Benzoelektrischer Triebwagen der preuß. Staatsbahnen (AEG—Deutz).

zylinder-Motoren bis zu jenen Leistungen wählen, die sich noch zweckmäßig bauen lassen. Die Verminderung der Anzahl aller einer Wartung bedürftigen 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.

Man verwendete schnellaufende, leichte Automotoren, regelte die Benzinzufuhr 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 in das Fahrzeug hineinzuzwängen, ohne auf bequeme Wartung und Instandhaltung Rücksicht zu nehmen.

Die nach dem Vorbild der Straßenautomobile ausgeführten Selbstfahrer (Abb. 579) 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. 578 bis 580) untergebracht, so daß nach Abnehmen des Deckels alle Einrichtungen leicht zugänglich sind.

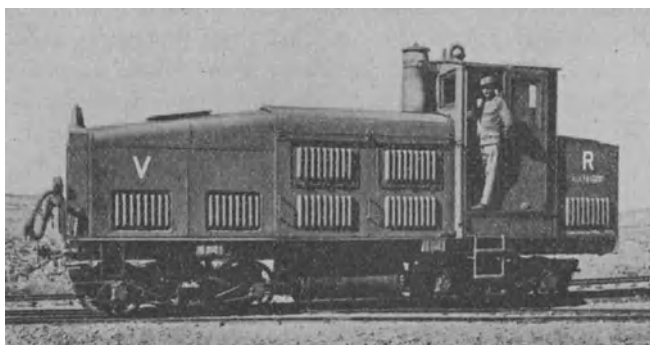


Abb. 581. Vierachsiger benzinelektrischer Generatorwagen für Schmalspur (AEGU).

Benzinmotor	120 PS	Betriebsspannung	0—600 V
Uml./min	750	Leistung	80 kW/h
Gewicht	14 t		

Einer zweckdienlichen Gewichtsverteilung entsprechend, befinden sich die Fahrzeugmotoren in einem zweiten Drehgestell.

Nach streng technisch-wissenschaftlichen Gesichtspunkten organisch aufgebaut ist die in der Abb. 581 dargestellte 120 PS-benzinelektrische Schmalspurlokomotive (AEGU).

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.



Abb. 582. Benzinelektrische Triebwagen für beschleunigten Überlandverkehr.

Das Schwungrad bildet zugleich die elastische Kupplung zwischen Dynamo und Benzinmotor. Dieser ist auf der einen Seite der Kupplung mit dem Wagengestell fest verschraubt; das andere Ende ruht in einem mit einer Kugelpfanne versehenen Schlitten und ist mit gefederten Stangen am Wagengestell verankert. Durch diese Anordnung sind schädliche Spannungen bei Erwärmung des Benzinmotors vermieden, ebenso wenig können die unvermeidlichen Verwindungen des Wagengestelles das Motorgehäuse beanspruchen.

Die hier für den benzintechnischen Teil der Selbstfahrer zum Ausdruck gebrachten Gesichtspunkte gelten sinngemäß auch für Diesel-elektrische 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 etwa auch für Nebenzwecke nötigen Batterie erfolgen. In diesem Falle ist beim Benzinmotor keine Druckluftanlage notwendig, die sonst zur Inbetriebsetzung nötig ist.

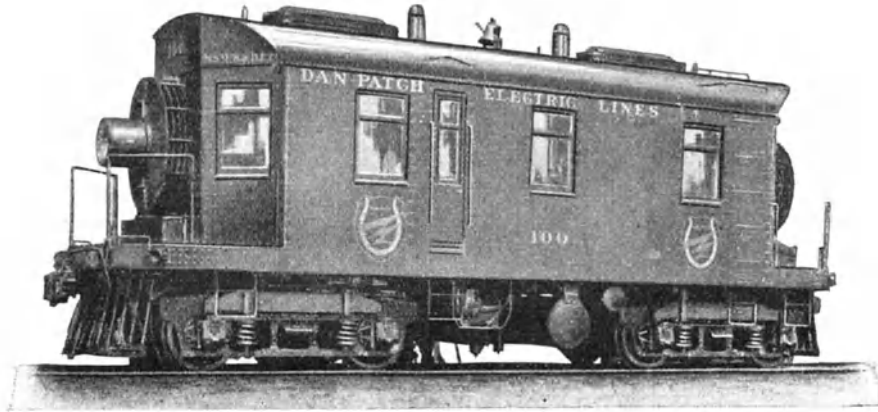


Abb. 583. Benzinelektrische Lokomotive.

Achsfolge	2 A + 2 A	Stromerzeuger	2 × 120 kw
Dienstgewicht	55 t	Motorleistung	4 × 100 PS
	Höchste Geschwindigkeit		60 km/h

Beim Dieselmotor war eine für hohen Druck gebaute Druckluftanlage bisher unerlässlich, weil der Brennstoff den Zylindern unter Druck zugeführt werden muß.

In Amerika sind vergleichsweise große Triebfahrzeuge (Abb. 582) und Lokomotiven (Abb. 583) dieses Systems gebaut worden.

6. Die elektrische Ausrüstung. Der elektrische Stromerzeuger und die Triebmotoren 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 Dieselmachine 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 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 hohen Dampfverbrauch aufweist.

Daß nur 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. 584).

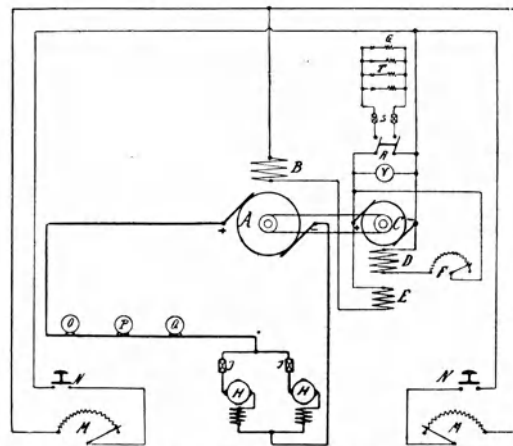


Abb. 584. Schaltbild eines benzinelektrischen Triebfahrzeuges.

Verfolgt man die Wirkungsweise des elektrischen Antriebes während einer Anfahrt, so gewinnt man Einblick in die diesbezüglichen Verhältnisse (Abb. 585).

Im allgemeinen wird das Triebfahrzeug zumindest zwei Triebmotoren erhalten: die Reihen-Nebeneinanderschaltung ist demnach auch hier anwendbar.

Mit Reihenschaltung beginnend, wird die Spannung, von Null ausgehend, im Schritt der Beschleunigung gesteigert, so daß diese und die Stromstärke festgehalten wird.

Die Grenze bildet die höchstzulässige 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

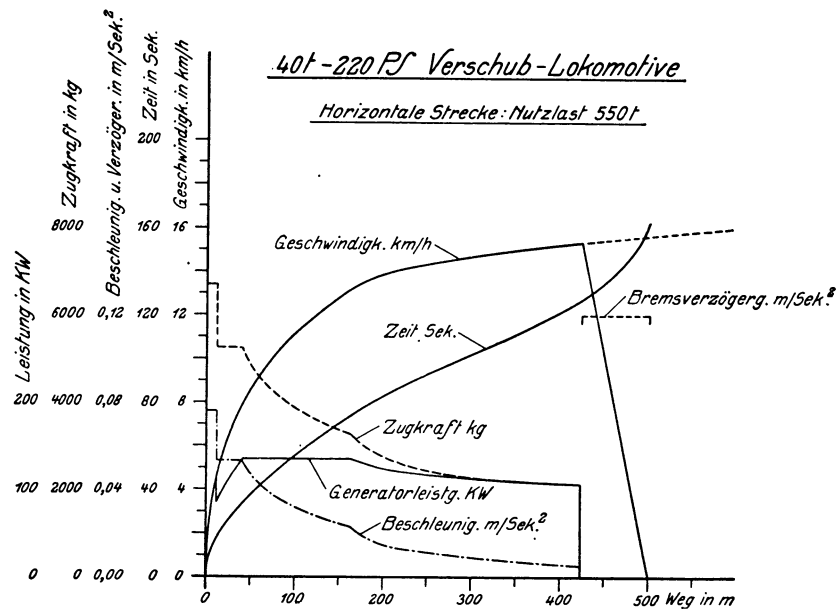


Abb. 585. Bewegungsbild einer benzinelektrischen Lokomotive.

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 vollen Leistung der Antriebsmaschine gesteigert.

Mit Abnahme der Stromstärke entsprechend der Eigencharakteristik der Triebmotoren wird die Spannung unter voller Ausnützung der Leistung weiter erhöht, bis schließlich die höchste Betriebsspannung erreicht ist und das Fahrzeug sich entsprechend der Eigencharakteristik der Triebmotoren weiter beschleunigt. Die Abb. 585 läßt die einschlägigen Verhältnisse einer 220 PS-Vershublokomotive erkennen.

Dank der wirtschaftlich regelbaren und von der Fahrgeschwindigkeit unabhängigen Spannung lassen sich diese Fahrzeuge bequem mittelbar elektrisch bremsen. Man braucht den Stromerzeuger nur 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 aus 26 vierachsigen Fahrzeugen mit 1 t Achsdruck und 52, durch 26 Motoren angetriebenen Achsen.

Für die österreichische Heeresverwaltung sind 120 PS-Fahrzeuge mit 4 Tonnen Achsdruck gebaut worden, die Strom für 20 Achsen, je angetrieben durch einen Motor von 10 PS Nennleistung (Abb. 581), 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 ausgenützt werden, wenn sie ebenfalls die gleiche Dauerleistung aufweisen. Diese ist bei Bahnmotoren ohne künstliche Kühlung nur etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{3}$ der Stundenleistung. 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.

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.

XVI. Umformerfahrzeuge (Lokomotiven).

- Adler: Neuer Einphasenmotor und Phasenumformer für Lokomotiven. EKB 1914, H. 2.
 Alexanderson: Die geteiltphasige Lokomotive. ETZ 1913, H. 49. — ERJ 1913, Bd. 42, Nr. 15.
 Amsler: Elektrische Zugförderung mit hochgespanntem Gleichstrom. ETZ 1914, H. 18.
 Heys: Das neue System elektrischer Zugförderung auf Vollbahnen (Ferrand). VTW 1907, Nr. 4. — Ref. ETZ 1907, H. 27.
 Koromzay-Auvert: Traction électrique par courant alternatif monophasé transformé sur la locomotive en courant continu. RGCT 1905, Nr. 10. — 1906, Nr. 2. — 1911, Nr. 6.
 Kummer: Elektrische Zugförderungseinrichtung mit fahrbarem Umformer. EKB 1906, H. 17. — Ref. ETZ 1908, H. 7.
 Müller: Quecksilberdampfgleichrichter im Vollbahnbetrieb. EKB 1914, H. 2.
 Sachs und Couvenhoven: Die Phasenumformerlokomotive und ihre Verwendungsmöglichkeit in Europa. Eu.M 1919, H. 39.
 Sachs: Eine neue Schaltung zur Umformung von Zweiphasenstrom in Dreiphasenwechselstrom. Eu.M 1920, H. 10.
 The mercury rectifier locomotive. ERJ 1914, Bd. 44, Nr. 25. — Ref. ZÖIAV 1914, H. 19.

Die Tatsache, daß sich für die Stromerzeugung und wirtschaftliche Fernübertragung vornehmlich das hochperiodige Drehstromsystem eignet, dagegen für den Antrieb von Fahrzeugen der 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 der Fahrleitung entnommenen Stromart in eine andere, für die Triebmaschine vorgezogene 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.

Bei dem bis jetzt angewendeten (3000 V) oder versuchten (5000 V) Gleichspannungen 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 Quecksilberdampf-Gleichrichter.

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 unempfindlich ist. Die Frage der betriebssicheren Wasserkühlung der Elektroden dürfte auf einem Fahrzeug auch seine Schwierigkeiten haben. Wesentlich ist auch der Umstand, daß die Umformung mittelst Gleichrichter bisher nur bei Drehstrom mit befriedigendem Erfolg durchgeführt wurde. Bei Einfach-Wechselstrom ist der erzeugte Gleichstrom pulsierend und scheint sich für den Betrieb gewöhnlicher Bahnmotoren nicht gezeigt zu haben.

Die Gleichstromausrüstung des Fahrzeuges stimmt sonst durchaus mit einer mit gleicher Spannung unmittelbar an der Fahrleitung liegenden Ausrüstung überein. Die Serienparallelschaltung und Widerstandsregelung ist ohne weiteres anwendbar, wie auch die Zugsteuerung.

Grundsätzlich möglich und an sich wirtschaftlich ist die Umformung mit Einanker-*maschinen*; sie setzt jedoch einen umständlichen Synchronisiervorgang voraus; auch besteht die Gefahr des Außertrittfallens bei ungewöhnlich hohem Spannungsabfall.

Die Umformung mittelst *Motorgenerators* krankt an diesem Ubelstand weniger;

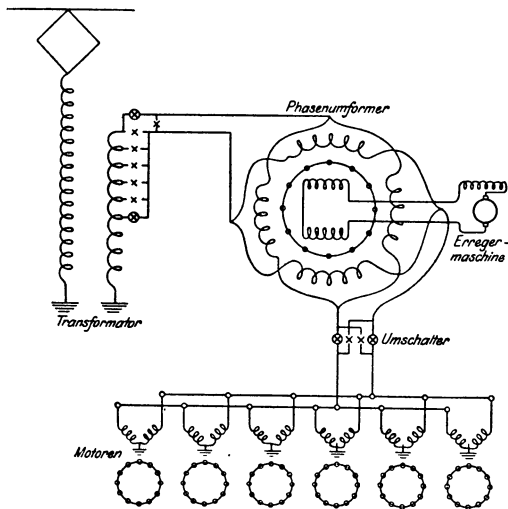


Abb. 586. Schaltbild der Umformer-Lokomotive der Norfolk-Western-Bahn. (Wechselstrom 11 000 V Zweiphasenstrom.)

dem steht jedoch der Nachteil eines schlechteren $\cos \varphi$ und des größeren Gewichtes gegenüber. Letzteres wird durch die äußerst wirtschaftliche, rein stufenlose Geschwindigkeitsregelung durch 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 war und die MFO auf der Seebach—Wettingener Strecke eine Umformerlokomotive erprobt hatte.

Die Lokomotiven der Pennsylvania- und Norfolk- und Westernbahn sind mit diesem System ausgeführt worden.

Der der einpoligen Fahrleitung entnommene Einfachwechselstrom — bei den angeführten Bahnen beträgt die Periodenzahl 25/sek, 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. 586).

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 besitzen die ausgeführten Lokomotiven in Anbetracht ihrer enormen Leistung sehr große spezifische Gewichte. 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.

Zur Verbesserung des $\cos \varphi$ hat Kandó die Anwendung von synchronen Spaltumformern vorgeschlagen.

XVII. Speicherfahrzeuge.

Christen: Der Aktionsradius der Akkumulatorenfahrzeuge. SBZ 1923, Bd. 81, Nr. 4.

Meixner-Wachlowski: Ergebnisse im Vershubdienst auf den Österreichischen Bundesbahnen. ETZ 1923, H. 33. — Ref. RGE. 1923, Bd. 13, Nr. 10.

Mitchell: Recent developments in accumulator electric trucks. El. 30. XII. 21.

Trautvetter: Förderbetrieb mit führerlosen Akkumulatorlokomotiven. Fu.F 1921, Nr. 23.

Die Fahrleitung ist ein unerwünschtes Beiwerk des elektrischen Bahnbetriebes. Bei geringer Verkehrsdichte 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 Dampftrieb 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 hoch 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. Dieser 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 Fernverkehrs.

Belebung des Personenverkehrs durch häufigere Fahrgelegenheit bei vollständiger Trennung vom Güterverkehr, für welchen sich größtmögliche, langsam fahrende Zugs-einheiten eignen.

Als besondere Eigenschaften dieser Betriebsart sind noch anzuführen: kein Arbeitsverbrauch bei Stillstand, dauernde Betriebsbereitschaft, große Überlastungsfähigkeit, Bedienung durch minderqualifiziertes Personal.

Gegenüber den benzinelektrischen Fahrzeugen tritt jedoch 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 das Eigengewicht der Batterie in t 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 Reichweite für den Zug:

$$L_z = \frac{1000}{aqn}$$

Für vollkommen ebene Strecken ist $a = 20$ bis 25 Wh/tkm, bei besonders günstigen Verhältnissen 15 Wh/tkm. Da Straßenbahnen und Gebirgsbahnen einen Verbrauch von 40 bis 60 Wh/tkm aufweisen, erscheint der Speicherbetrieb für diese ausgeschlossen, denn eine Reichweite von 30 bis 40 km kommt praktisch nicht in Betracht.

Meixner stellte für die Triebwagenzüge der ÖBB durch Versuchsfahrten auf der Strecke Salzburg—Hallein den an den Motorklemmen gemessenen Stromverbrauch zu 17 Wh/tkm fest; einschließlich der Verluste im Speicher steigt dieser Verbrauch auf $23,5$ Wh/tkm. Die größte Neigung der befahrenen Strecken beträgt $4,75\%$ bei einem Mittelwert von etwa $3,0\%$; der Rollwiderstand des Zuges wurde zu 3 bis 4 kg/t ermittelt.

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 angenäherte Orientierung über die erzielbaren Verkehrsleistungen; er ist jedoch 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; da 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 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 nicht sehr 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 Bleiakкумуляtor mit Masseplatten wiegt etwa 100 bis 120 kg/kWh; mit Gitterplatten nur etwa 45 kg. Dafür verträgt die 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 Bleiakкумуляtoren erzielten spezifischen Gewicht von 45 und 120 kg/kWh weist der Nickel-Eisen-Akkumulatorm nur etwa 40 kg/kWh Eigengewicht auf; die Beschaffungskosten sind jedoch beträchtlich höher.

Der Wirkungsgrad des Bleiakкумуляtors erreicht 75% , im praktischen Betriebe 70 bis 72% ; jener des Nickel-Eisen-Akkumulators wird mit etwa 60 bis 70% 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 Bleiakкумуляtor 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 V. 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 anfänglich 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 Neigung, während des Betriebes sich allmählich zusammenzuballen und eine festere

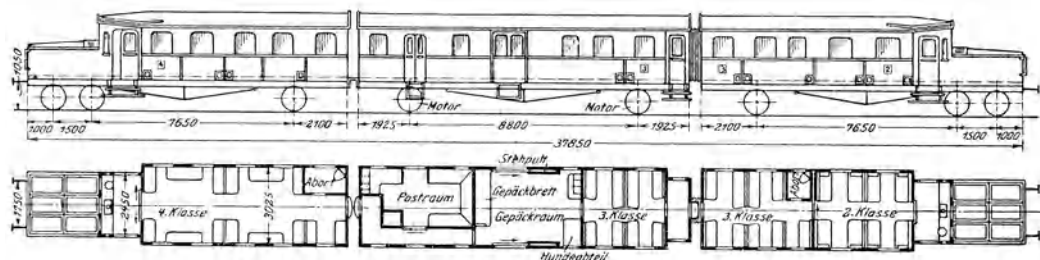


Abb. 587. Dreiteiliger Speicher-Triebwagen der preuß. Staatsbahnen.

Gewicht leer 85 t, besetzt 95 t. Elektrische Ausrüstung 2 Motoren je 85 bzw. 95 PS. Speicher: 168 Elemente 245 kWh, 24 t Gewicht, Reichweite 180 km. Geschwindigkeit (höchstens) 60 km.

Masse zu bilden. Hierdurch geht die Leistung der negativen Platte allmählich zurück. Um diesem Mangel vorzubeugen, setzt man der aktiven Masse chemisch indifferente, poröse 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 durchlöchernte 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

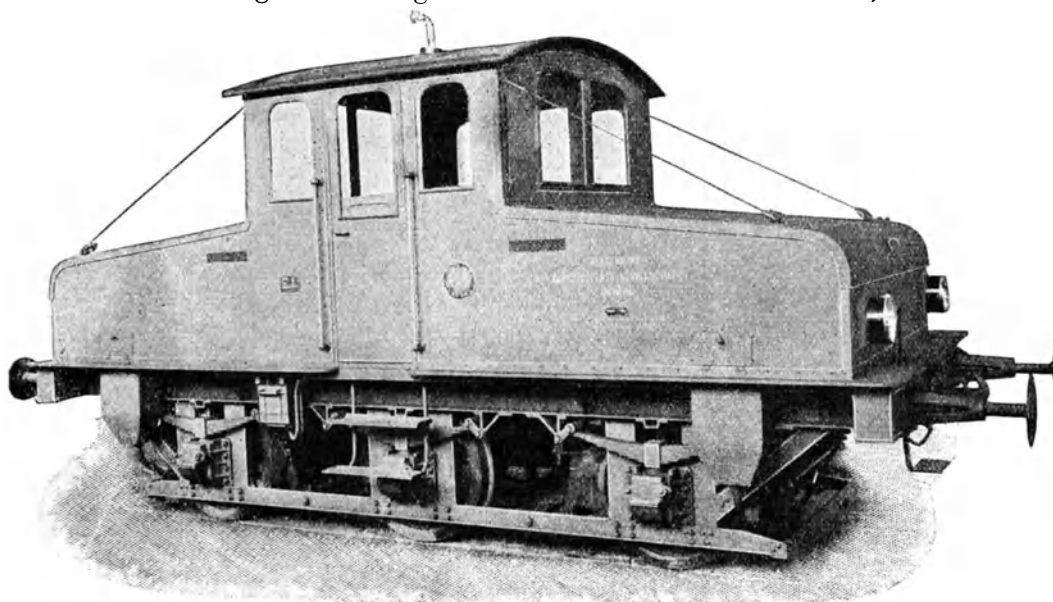


Abb. 588. 3 A-Speicher-Lokomotive für den Verschiebedienst der Eisenbahnwerkstätten Tempelhof (AEG).

Leistung	2 × 20 = 40 PS/h	Gewicht	34,3 t
Geschwindigkeit	12 km/h	Kapazität	235 Ah, 75,9 kWh
Betriebsspannung	300 V		

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 unzugänglichen Räumen und sorgt durch geeignete Vorrichtungen dafür, daß die einer Revision bedürftige Batterie bequem besichtigt werden (Abb. 587, 588) oder überhaupt betriebsmäßig mit einer Ersatzbatterie den Dienst wechseln kann.

Dieses System der abrollbaren (Abb. 589) oder abhebbaren Batterien (Abb. 590) birgt den weiteren Vorteil, daß das Fahrzeug während der Ladezeit nicht stillgelegt werden muß und daß weiters die Ladezeit auf einen vom Standpunkt der Stromerzeugung günstigen Zeitpunkt verlegt werden kann.

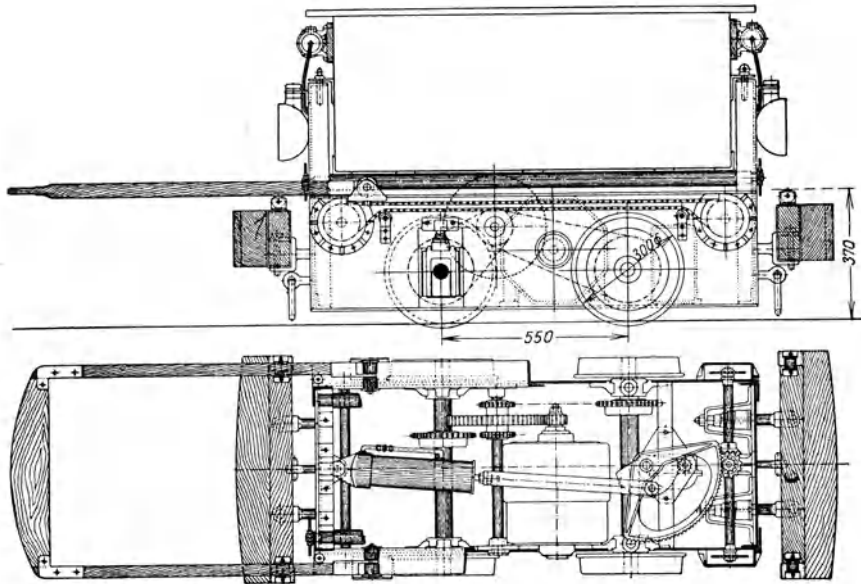


Abb. 589. Führerlose Akkumulatoren-Grubenlokomotive, Antrieb und Steuerung.

Bis Steigungen von etwa 5‰ ist es meist wirtschaftlich, den Speicher überhaupt auf einem selbständigen Fahrzeug, einem Tender, unterzubringen.

Diesbezüglich sei auf die Tatsache hingewiesen, daß in einer Steigung von 5‰ das angehängte Zugsgewicht etwa das 15fache des Reibungsgewichtes beträgt; wird das Gewicht des Tenders äußersten Fall gleichgroß dem Triebgewicht, so bedeutet dies nur eine Verringerung der zulässigen 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 bewerkstelligt, weil sich diese Schaltart als die einfachste erwiesen hat. Die Reihenparallelschaltung fehlt in keinem Falle. Ausführungen mit Verbundmotoren und Nutzbremmung 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 Zugseinheiten 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.

Die dreiteiligen Züge (Abb. 587) sind den zweiteiligen ähnlich, nur ist zwischen beide dreiachsigen Außenwagen ein dritter zweiachsiger Wagen geschaltet. Diese Zugs-

einheit ist 38950 mm lang bei einem Leergewicht von 85 t. Der Fassungsraum beträgt 118 Personen und ein Post- und Gepäckabteil. Die nutzbare Bodenfläche ca. 82 qm, somit das Totgewicht 1030 kg/qm.

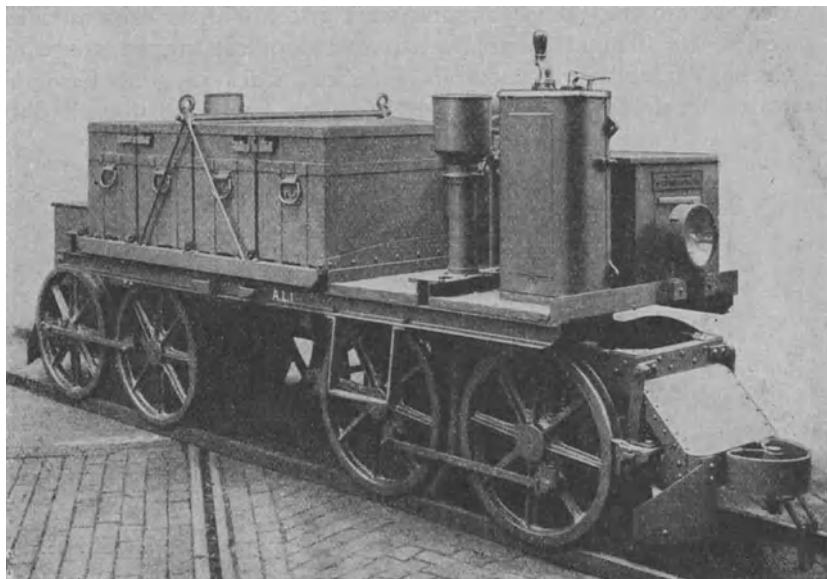


Abb. 590. B + B zweimotorige Feldbahnlokomotive (OSSW).

Regelleistung	2 × 8 PS	Batterie	35 kWh
Gewicht	4 t	Gewicht	1,75 t

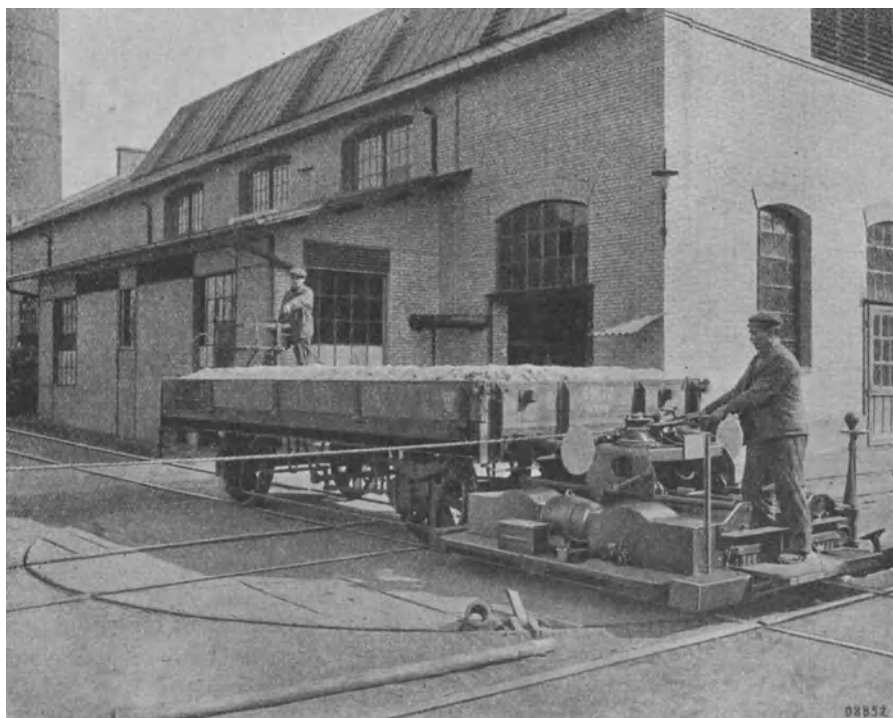


Abb. 591. Regelspuriges Speicher-Fahrzeug für Vershubdienst (BBC).

Die Ausnützung 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 auch für Untersuchungsfahrzeuge für Tunneln oder Hochspannungsoberleitungen vorgesehen.

Große Verbreitung haben in Fabriks-, Hütten- und Grubenbetrieben jeder Art Plattformwagen mit Speicher gefunden, weil sie überall dort hinfahren können,



Abb. 592. Vershublokomotive für Hütten- und Grubenbetrieb (GEC).

Spurweite	600 mm	Zugkraft am Haken	450 kg
Gewicht	3,6 t	Geschwindigkeit	5,5 km/h
Batterie	42 Elemente, 2,5 kWh		

wo die Fahrleitung z. B. wegen des Kranbetriebes nicht angebracht werden kann und Dampflokomotiven wegen Feuergefahr, Beschmutzung der Räume, ungenügende Höhe der Durchfahrt usw., nicht zugelassen werden können.

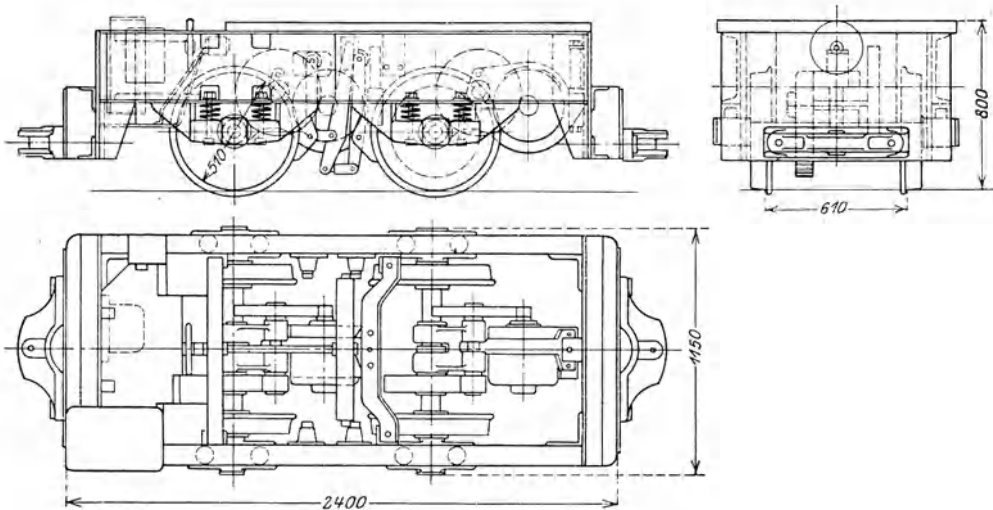


Abb. 593. Speicher-Grubenlokomotive mit geringer Bauhöhe (GEC).

Spurweite	610 mm	Gewicht	3,6 t
Zugkraft am Haken	450 kg	Geschwindigkeit	5,5 km/h
Batterie	42 Elemente, 2,5 kWh		

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 und einen Stromverbrauch von 25 Wh/tkm voraus, so können mit diesem Fahrzeug 14 tkm Nutzlast befördert werden. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 5 bis 7 km/h. Im Fahrzeug ist ein 1,5 PS-Motor eingebaut (Abb. 591).

Die Typen bis zu zweimal 10 PS, 4,5 bis 10 km/h, 15 t Tragkraft werden noch mit 75 V Betriebsspannung ausgeführt; für die nächste Reihe sind 150 V Betriebsspannung vorgesehen.

Diese Plattformwagen eignen sich dank ihres großen Gewichtes nicht nur zum Aufladen von Lasten, sondern auch zum Schieben von anderen Fahrzeugen (Abb. 592, 593).

Eine bemerkenswerte Anwendung der elektrischen Zugkraft stellen die führerlosen Lokomotiven dar (Abb. 589). Bei diesen ist der Führer 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 daher 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 mittels 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 diese Bewegung vermittelt eines Ketten- oder Zahnradgetriebes auf die Walze des Fahrschalters übertragen, die den Motor abschaltet und bremst. Der Zug eines durch Glycerin 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 angefahrene Personen nicht beschädigt werden können, zumal die Geschwindigkeit nur etwa 1 m/sek beträgt. Zur Einhaltung einer unveränderlichen Geschwindigkeit im Gefälle erhält der Motor eine Nebenschlußerregung.

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. 590 ist eine für das flüchtige Feldbahngleis mit nur 1 t Achsdruck gebaute 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.

Fünfter Teil.

Spezialbahnen

Zahnbahnen und Drahtseilbahnen.

Von Zivilingenieur H. H. Peter, Zürich.

Spezialbahnen.

I. Zahnbahnen.

Literatur (allgemein):

- Abt: Der Eisenbahnbau. VIII. Bd. Lokomotiv-Steilbahnen. Engelmann 1906.
Dolezalek: Eisenbahntechnik der Gegenwart. Die Zahnbahnen der Gegenwart. Wiesbaden: Kreidel 1905.
Fadda: Ferrovie con dentiera centrale. Torino.
Grüninger: Die Beschienung des Mount Washington. New York 1869.
Lévy Lambert: Chemins de fer à crémaillère. Paris: Gauthier-Villars 1908.
Röllsche Enzyklopädie des Eisenbahnwesens. Wien: Urban & Schwarzenberg. II. Aufl. „Elektrische Eisenbahnen“ und „Zahnbahnen“.
Strub: Bergbahnen der Schweiz bis 1900. II. Bd. Reine Zahnbahnen. Wiesbaden: Bergmann 1902.

1. Allgemeines. Bei Untersuchung der Zugkraft zwischen Rad und Schiene (IV. Teil, II. Kap.) wird aus der Grundbeziehung

$$Z = \mu G \dots \dots \dots (1)$$

diejenige größte Neigung errechnet, die praktisch im Reibungsbetriebe überwunden werden kann. Die Rechnung zeigt, daß das angehängte Zuggewicht mit der Steigung rasch sinkt. Für die Verhältnisse, wie sie bei Motorwagenbetrieb herrschen, wurde gefunden, daß rund 100⁰/₀₀ die praktische Grenze des Reibungsbetriebes bilden und daß bei einer Anfahrbeschleunigung von 0,5 m/sek² 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/sek², die Reibungsziffer zu 180 kg/t, die Steigung zu 30⁰/₀₀, den Zugwiderstand für die Lokomotive zu 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 40⁰/₀₀ sinkt diese Verhältniszahl auf das 2,5fache; dabei sind die Voraussetzungen durchaus günstig angenommen. Bei einer Reibungsziffer von nur 135 kg/t, die nicht selten vorkommen pflegt, sinkt die Anhängelast auf das etwa 2,2- bzw. 1,5fache des Triebgewichtes. Das bedeutet, daß von dem an sich verhältnismäßig hohen Kraftverbrauch der Zugförderung 31⁰/₀ bzw. 40⁰/₀ für das Totgewicht der Lokomotive aufgewendet werden müssen.

Die Förderung großer Zuglasten mittels Reibung wird demnach schon bei Steigungen von etwa 30⁰/₀₀ 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 einwandfreier und wirtschaftlicher Weise durch den Zahnbahnbetrieb.

Auf Vollbahnen mit Steigungen von mehr als 40‰, jedenfalls bei über 60‰, gelangt der Zahnbahnbetrieb zur Anwendung, wogegen bei straßenbahnartigen Transportaufgaben diese Grenze über 100‰ liegt.

Wenn die Unabhängigkeit der Zugkraft von der Reibungsziffer und dem Treibgewicht als Kennzeichen der 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 Radumfang nur insolange wirtschaftlich und sicher übertragen werden kann, als reines Rollen vorliegt. Ist der Raddruck vergleichsweise klein oder die Umfangskraft zu groß, so tritt Gleiten — Schleudern — ein, wobei nur verhältnismäßig sehr geringe Zugkräfte ausgeübt werden können.

Genau der gleiche 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 und der Triebachsbelastung 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 stets 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 Triebzahnäder entsprechend vermehrt wird.

Für die vorliegende Untersuchung wird jedoch angenommen, daß nur ein Zahn die ganze Last trägt.

Der Kräfteplan (Abb. 594) für den Zahntrieb kann auf Grund nachstehender Überlegung festgelegt werden.

Der Zahn nimmt die zur Fortbewegung des Zuges in der Bahnneigung wirkende Zugkraft auf.

Es bezeichnet:

P den Zahndruck in kg,

G das Zuggewicht in t,

Q das Lokomotivgewicht in t,

α den Neigungswinkel der Bahn,

w_q und w_g die Zugwiderstände in kg/t,

$\gamma = \frac{v^2}{2l}$ die Beschleunigung in m/sek²,

z den Bremsweg in m,

$\mu = \operatorname{tg} \varphi$ die Reibungsziffer,

φ den Reibungswinkel,

β den Winkel der Zahnflankenneigung,

Z_q die Zugkraft für die Bewegung der Lokomotive in kg,

Z_g die Zugkraft für die Bewegung des Zuges in kg,

Z die gesamte Zugkraft in Richtung der Bahnneigung in kg.

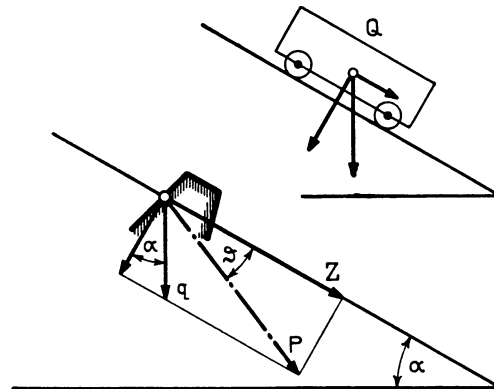


Abb. 594. Kräfteplan des Fahrzeuges in der Neigung, Teilkräfte des Zahndruckes.

Entsprechend Abb. 594 ist

$$Z_g = 1000 G \sin \alpha \pm G \cos \alpha w_g + \frac{1000 G \cdot v^2}{2 g l} \dots \dots \dots (2a)$$

und

$$Z_q = 1000 Q \sin \alpha + Q \cos \alpha w_q + \frac{1000 Q v^2}{2 g l} \dots \dots \dots (2b)$$

3. Der Zahndruck. Die Ebene der Zahnflanke kann nicht lotrecht sein, das Zahnrad trägt somit einen Teil des Lokomotivgewichtes $q = m Q$, wo $m < 1$ ist. Diese abwärts gerichtete Teilkraft ist für die Sicherung des Eingriffes notwendig, weil

$$Z = Z_g + Z_q \dots \dots (3)$$

eine nach oben gerichtete Teilkraft haben kann, welcher die Schwerkraftkomponente entgegenwirkt.

Richtung und Größe des Zahndruckes P ergeben sich aus der Zusammensetzung der beiden Teilkräfte Z und q , wobei von q die in die Richtung der Neigung fallende Teilkraft $q_1 = q \sin \alpha$ in Abzug zu bringen ist, da diese in $Q \sin \alpha$, bzw. Z_g bereits inbegriffen ist. Mit Z ist nur $q \cos \alpha$ zusammenzusetzen zu

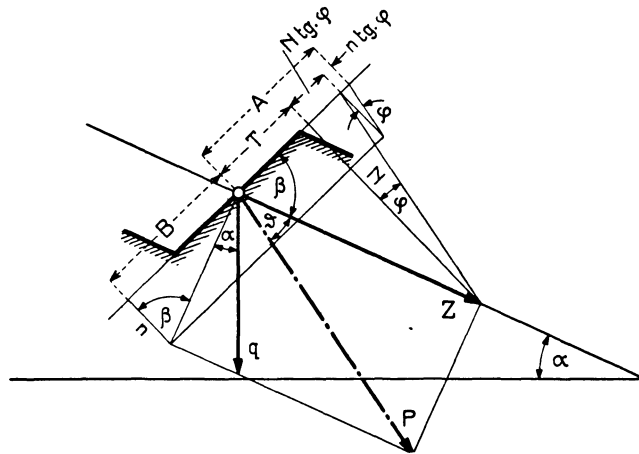


Abb. 595. Kräfteplan des Zahneingriffes unter Berücksichtigung der Zahnreibung.

$$P = \sqrt{Z^2 + (q \cos \alpha)^2} = \frac{Z}{\cos \vartheta} \dots \dots \dots (4)$$

hierbei ist nach Abb. 594

$$\text{tg } \vartheta = \frac{q \cos \alpha}{Z} \dots \dots \dots (5)$$

Aus Gründen des wirtschaftlichen Betriebes — geringe Abnutzung der Zahnstange und Zahnräder — soll die lineare Pressung per mm Zahnbreite

$$p = \frac{P}{b} \leq 100 \cong 60 \text{ kg/mm}$$

sein, wobei b die Zahnbreite in mm bedeutet. Da Zahnbreiten von 15 bis 100 mm, ausnahmsweise 140 mm, gebräuchlich sind, kann der Zahndruck bis 10000 kg erreichen; gewöhnlich ist man aus anderen Gründen nicht über 8000 kg per Triebad gegangen.

4. Der Auftrieb. Ein sicherer Zahneingriff und Betrieb kann nur erwartet werden, wenn die Belastung des Zahnrades den Auftrieb jederzeit übertrifft. Dies ist um so notwendiger, da 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.

Die gleiche Wirkung wird vermehrt durch die am Puffer der Lokomotive wirkende Stützkraft des geschobenen Zuges.

Die Summe dieser Momente darf selbst im ungünstigsten Belastungsfalle die Achsbelastung der bergseitigen Achse nicht aufheben, wenn keine Entgleisung eintreten soll.

Die erste Forderung setzt voraus, daß die Teilkraft der senkrechten Trieb-
 radbelastung in der Richtung der Zahnflanke

$$q \cos \alpha \sin \beta \geq A, \dots \dots \dots (6)$$

ist, wobei A den Auftrieb bezeichnet.

Die von der rechtwinklig zur Zahnflanke wirkenden Teilkraft erzeugte Reibungskraft
 wirkt in der Richtung der Zahnflanke und immer entgegen der Gleitbewegung, daher
 während des Eingriffes vom Kopfkreis der Zahnstange bis zum Zentralpunkt (C) im Sinne
 einer Entlastung (stemmend), unterhalb C im Sinne einer Belastung (streichend), weil
 in diesen beiden Eingriffsgebieten das Gleiten entgegengesetzt gerichtet ist.

Aus dem Kräfteplan Abb. 595 ergibt sich der Auftrieb zu

$$A = T + (N + n) \mu, \dots \dots \dots (7)$$

andererseits ist

$$A = Z \cos \beta + Z \sin \beta \operatorname{tg} \varphi + q \cos \alpha \cos \beta \operatorname{tg} \varphi. \dots \dots \dots (7a)$$

Für den Fall des Gleichgewichtes wird

$$q \cos \alpha \sin \beta = Z \cos \beta + Z \sin \beta \operatorname{tg} \varphi + q \cos \alpha \cos \beta \operatorname{tg} \varphi. \dots \dots \dots (8)$$

Hieraus findet man

$$q \cos \alpha = Z \cdot \operatorname{cotg}(\beta \mp \varphi). \dots \dots \dots (9)$$

Laut Gl. (5) gilt für den Winkel des Zahndruckes gegenüber der in der Richtung
 der Bahnneigung wirkenden Zugkraft des Fahrzeuges

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{q \cos \alpha}{Z}, \dots \dots \dots (5)$$

daher ist

$$\operatorname{tg} \vartheta = \operatorname{cotg}(\beta \mp \varphi), \dots \dots \dots (10)$$

und

$$\vartheta = 90 - (\beta \mp \varphi). \dots \dots \dots (11)$$

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.

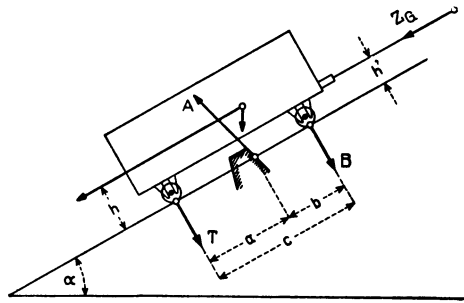
Es seien beispielsweise für die folgenden Reibungszahlen die entsprechenden Achs-
 lasten und Zahndrucke angegeben

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° 19'	8° 08'	5° 43'	2° 52'
$q \cos \alpha = \frac{Z}{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)}$	0,474 Z	0,407 Z	0,359 Z	0,304 Z
$P = \frac{Z}{\sin(\beta - \varphi)}$	1,11 Z	1,08 Z	1,06 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.

5. Die Standsicherheit. Mit dem auf diese Art berechneten Wert der Trieb-
 zahnradbelastung und bestimmter Annahmen bezüglich der Gewichtsverteilung des
 Fahrzeuges kann die Momentengleichung aller für die Stabilität der Lokomotive in
 Betracht kommenden Kräfte aufgestellt werden.

Entlastend wirkt die Schwerkraftkomponente in der Richtung der Bahnneigung mit dem Hebelarm der Schwerpunkthöhe, zuzüglich eventueller Bremskräfte, abzüglich der Zugwiderstände, (Abb. 596)



$$Z_q \frac{h}{c}$$

und der Pufferdruck

$$Z_g \frac{h'}{c}.$$

Für den sicheren Eingriff muß somit die Belastung B der bergseitigen Achse größer als die Entlastungskraft E sein, d. h.:

$$B \geq E = A \frac{a}{c} + Z_q \frac{h}{c} + Z_g \frac{h'}{c};$$

Abb. 596. Kräfteplan der Standsicherheit eines Fahrzeuges mit Zahnradantrieb.

daraus folgt nach Substitution von A gemäß Gleichung (7 a):

$$B \geq \frac{1}{c} \underbrace{[(Z \cos \beta + Z \sin \beta \operatorname{tg} \varphi + q \cos \alpha \cos \beta \mu) a + Z_q h + Z_g h']}_E. \dots (12)$$

Die Gefahr des Aufsteigens ist bei der bergseitigen Tragachse größer als bei der talseitigen; daher strebt man eine entsprechende Gewichtsverteilung dahin an, daß jene stärker belastet wird. Je nach dem wünschenswerten Grad der Sicherheit gegen Aufsteigen des Zahnrades auf der Zahnstange

$$\sigma = \frac{B}{E}$$

wird

$$B = m \cdot 1000 \cdot Q \dots (13)$$

gewählt, wobei

$$1 > m > 0,5 \text{ ist.}$$

Je größer $\sigma = \frac{B}{E}$ wird, desto größer ist die Sicherheit gegen Aufsteigen, doch sind dem Wert von σ praktische Grenzen gesetzt, da es unzulässig ist, die Talachse zu sehr zu entlasten und da aus naheliegenden Gründen Q überhaupt klein zu halten ist.

Die Entlastungskraft der bergseitigen Achse wird

$$E = \frac{1000 m \cdot Q}{\sigma} = \frac{[1000 \sin \alpha \pm w + 100 \gamma]}{H} \left\{ (Q + G) \frac{a}{c} \cdot (\cos \beta + \sin \beta \operatorname{tg} \varphi + \cos \beta \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi) + G \frac{h'}{c} + Q \frac{h}{c} \right\} \dots (14)$$

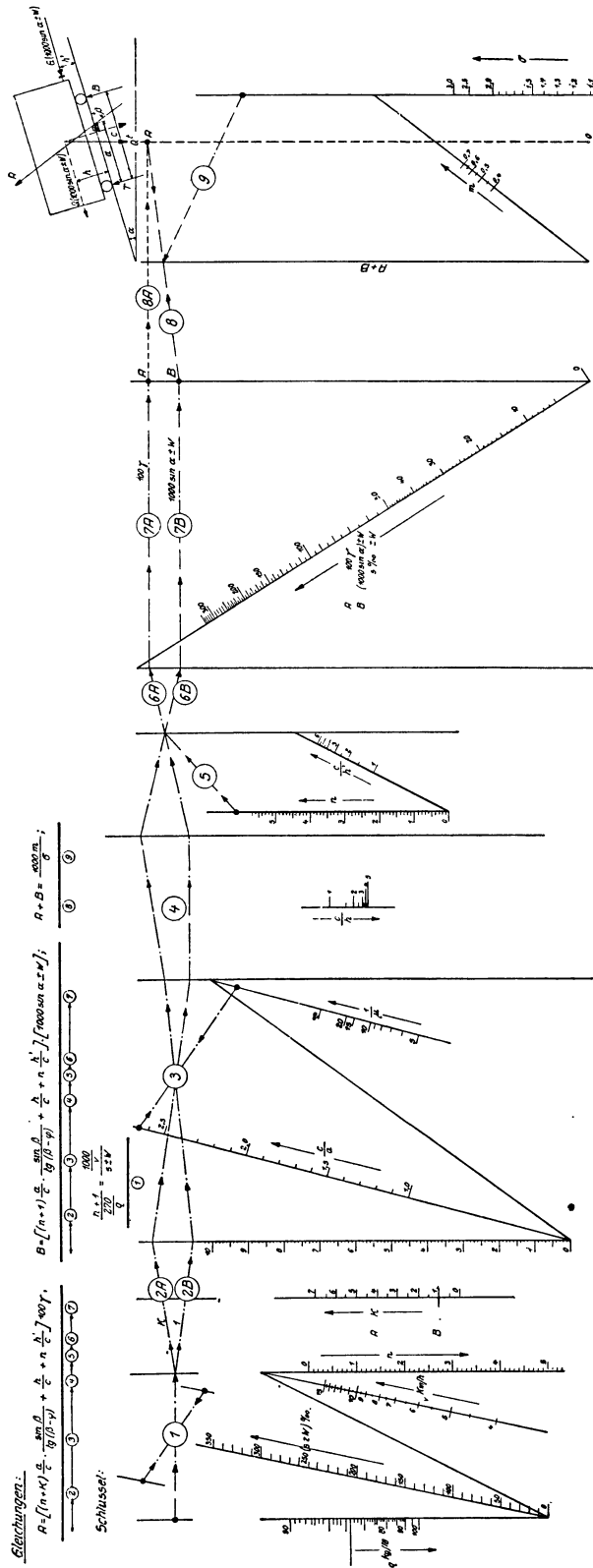
Setzt man

$$G = Q n, \dots (15)$$

so ergibt sich die Gleichung

$$\frac{m 1000}{H \sigma} = \frac{a}{c} (n + 1) \frac{\sin \beta}{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)} + \frac{h}{c} + \frac{h'}{c} n, \dots (16)$$

welche den Zusammenhang der Linienführung der Strecke bzw. des Längsprofils derselben mit der Konstruktion der Lokomotive gibt, wobei auch die dynamischen Verhältnisse berücksichtigt sind, indem der Einfluß der Geschwindigkeit und der Reibung zum Ausdruck gelangt.



Symbole:

- Q Lokomotivgewicht in t
- G = n · Q geschobene Last in t
- G_{rot} = (K - β) · Q Gewicht der auf den Teilkreis des Triebzahn-
- rades reduzierten, rotierenden Massen in t
- B = m · 1000 Q Achsdruck bergseitig in kg
- T Achsdruck talseitig in kg
- A = Antrieb
- α = Bahneigung
- s Steigung in ‰
- v Geschwindigkeit in km/h
- μ = tg φ Reibungszahl
- c Achsstand in m
- h' Pufferhöhe in m
- h Höhe des Lokomotiv-Schwerpunktes in m
- a Abstand des Eingriffpunktes von der talseitigen Achse in m
- γ Verzögerung resp. Beschleunigung in m/sek²
- ω Zugwiderstand in kg/t oder ‰
- q Lokomotivgewicht in kg/PS
- β Zahnflankenkeilung

Abb. 597. Rechentafel zur Bestimmung der Standsicherheit einer Zahnradlokomotive.

Erstere ist im Ausdruck für die Beschleunigung bzw. Verzögerung berücksichtigt .

$$100 \gamma = \frac{v^2 100}{2l}.$$

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 Zahnbahnlokomotive in ihren bau- und maschinentechnischen Beziehungen eignet sich zur nomographischen Darstellung (Abb. 597), wobei an Stelle der Größen $\mu = \operatorname{tg} \varphi$, $n + 1$ und $\sin \alpha$ unmittelbar die interessierenden unabhängigen Veränderlichen

$$\varphi, n \text{ und } s$$

aufgetragen sind bzw. direkt abgelesen werden können.

Diese Rechentafel gibt Aufschluß darüber, für welche größten Zugsgewichte eine etwa vorhandene Fahrzeugtype in gegebenen Steigungen und unter bestimmten Reibungsverhältnissen verwendbar ist. Sie läßt bequem ermitteln, wie weit z. B. die Steigung dort zu ermäßigen ist, wo wegen etwa in der Nähe befindlicher staubiger Landstraßen mit größerer Reibung zu rechnen ist, oder wo wegen Störungen des Verkehrs im Betrieb heftige Bremsungen die Regel sein können.

Man erkennt auch, wie durch Tieferlegung des Schwerpunktes und des Puffermittels der in Aussicht genommene Entwurf zu verbessern ist und welche Tragweite diese Verbesserungen auf die Leistung im Betriebe haben können.

Das Nomogramm (Abb. 597) kann weiters mit den für Leistung und Eigengewicht bestehenden Beziehungen in Verbindung gebracht werden.

Die solcherart ermittelten 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 führte zu dem Ergebnis, daß vom Standpunkt der Beschleunigungs- und Verzögerungskraft die Wirkung der umlaufenden Massen einer Vermehrung der geradlinig bewegten Massen auf das Mehrfache gleichkommt.

Der Zahlenwert dieses Zuschlages kann durch Auslaufversuche oder durch Rechnung aus den bekannten Gewichten und Abmessungen der umlaufenden Bestandteile bestimmt werden.

Zur Berechnung dieser Massenwirkung dient die Grundgleichung der lebendigen Kraft eines Körpers, der außer geradlinig bewegten auch umlaufende Massen aufweist. Die lebendige Kraft (mkg) ist

$$E = m \frac{v^2}{2} + J \frac{\omega^2}{2},$$

wo m die Masse des Körpers von G kg Gewicht,
 v die lineare Geschwindigkeit in m/sek,
 ω die Winkelgeschwindigkeit in m und
 J das Trägheitsmoment bezeichnet.

Bremst man das Fahrzeug mit einer Kraft P kg entsprechend einer gleichmäßigen Verzögerung von γ m/sek² und einem Bremsweg von s m ab, so gilt

$$P = \frac{E}{s}.$$

Die geradlinige Geschwindigkeit bzw. die Winkelgeschwindigkeit ist bestimmt durch die Gleichung

$$v = r \omega,$$

wenn $d = 2r$ den Triebraddurchmesser bedeutet.

Dann ist die auf diesen Halbmesser bezogene umlaufende Masse

$$m_1 = \frac{J}{r^2}.$$

Damit wird die Bremskraft

$$P = \frac{v^2}{2s} (m + m_1) = \gamma (m + m_1) = \gamma \kappa m,$$

wo

$$\kappa = 1 + \frac{m_1}{m} = 1 + \delta \text{ ist.}$$

Das Trägheitsmoment pflegt man zweckmäßig durch das Schwungmoment auszudrücken. Für dieses gilt

$$J = \frac{Q_r}{g} \cdot \frac{D_t^2}{4} \simeq \frac{Q_r D_t^2}{40}.$$

Hier ist Q_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 Touren laufenden Triebbestandteile und mit n_2 die Drehzahl des Triebzahnrades, auf dessen Teilkreis bezogen die Umfangskraft ermittelt werden soll, so gilt

$$m_1 = \frac{J}{r^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = \frac{Q_r D_t^2}{40 r^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = \frac{Q_r D_t^2}{10 d^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = (\kappa - 1) m = (\kappa - 1) \frac{Q}{10}$$

und, da $Q = 10 m$ ist, folgt

$$\kappa (\kappa - 1) Q = \frac{Q_r D_t^2}{d^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2,$$

schließlich

$$\kappa = \frac{Q_r}{Q} \cdot \frac{D_t^2}{d^2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 + 1.$$

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 die Stabilität 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

$$\frac{1000 m}{\sigma} = \left[\frac{\sin \beta}{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)} \frac{a}{c} (1 + n) + \frac{h}{c} + n \frac{h'}{c} \right] [1000 \sin \alpha \pm w] + \left[\frac{\sin \beta}{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)} \frac{a}{c} (\kappa + n) + \frac{h}{c} + n \frac{h'}{c} \right] 100 \gamma,$$

wobei

$$Z_q = Q (1000 \sin \alpha \pm w_q + 100 \gamma \kappa)$$

$$Z_g = n Q (1000 \sin \alpha \pm w_g + 100 \gamma)$$

$$Z = Q [(1 + n)(1000 \sin \alpha \pm w_g) + 100 \gamma (\kappa + n)] \text{ ist.}$$

Dieser Gleichung entspricht die Rechentafel Abb. 597.

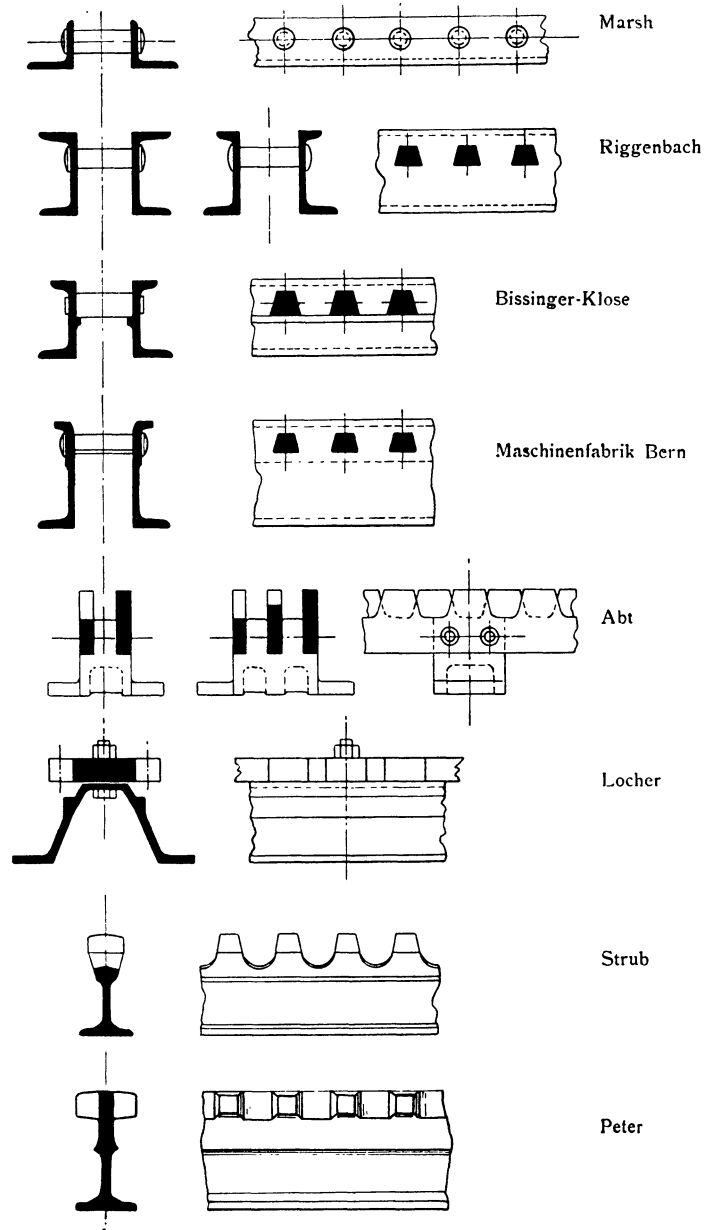


Abb. 598. Zahnstangenbauarten.

6. Zahnstangensysteme. Abb. 598. 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 den gestellten Anforderungen entsprechen. Nichtsdestoweniger sind für vertikalen Zahneingriff meist die Systeme von Riggenbach, Abt und Strub angewandt worden, wogegen ältere Anordnungen wie Klose, Bissinger usw. der Geschichte angehören.

Was die Oberbaukonstruktion anbelangt, so stimmen alle diese Typen grundsätzlich insoweit überein, als Zahnteilungen von 100 bis 120 mm vorgesehen werden, die Evolventenverzahnung zur Anwendung gelangt und der Zahnflankenanzug mit 14° , entsprechend $\cos \beta = 0,242$, hergestellt wird.

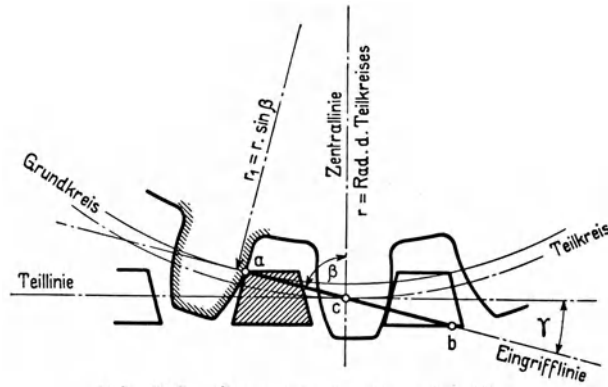


Abb. 599. Geometrie des Zahneingriffes.

Damit ist auch die Lage der Eingriffslinie gegeben.

Aus den trigonometrischen Beziehungen (Abb. 599) zwischen

- dem Teilkreishalbmesser r ,
- dem Grundkreishalbmesser r_1 ,
- der Eingriffsstrecke $e = a b$,
- der Teilung i und
- der Eingriffsdauer ε

folgt, daß

$$e = 2 r \cos \beta,$$

$$t = e \sin \beta,$$

$$r_1 = r \sin \beta;$$

daher wird

$$\varepsilon = \frac{e}{t} \cdot \frac{r_1}{r} = \frac{2 r_1^2 \cos \beta \sin \beta}{r t}.$$

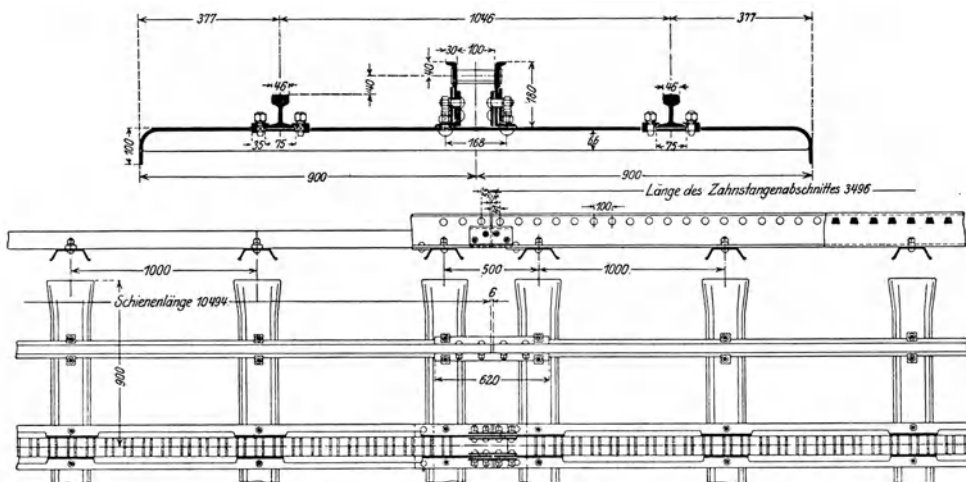


Abb. 600. Leiterzahnstange der Stansstad-Engelbergbahn.

$2r=d$ und $\cos \beta$ sind feste Zahlen, ferner ist $r \cong r_1$; daher gilt angenähert für $\beta=75^\circ 58'$

$$\varepsilon = \frac{0,235 d}{t}.$$

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 ist.

7. Die Leiterzahnstange. Abb. 600, 602. Die Riggenbach-Zahnstange besteht aus zwei senkrecht angeordneten U-Eisenwangen, zwischen welche gewalzte Zähne von trapezförmigem Querschnitt kalt eingienietet sind.

Die ursprüngliche Zahnstange ist nur 120 mm hoch, und da die Laufschiene auch nahezu 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 Wangen-

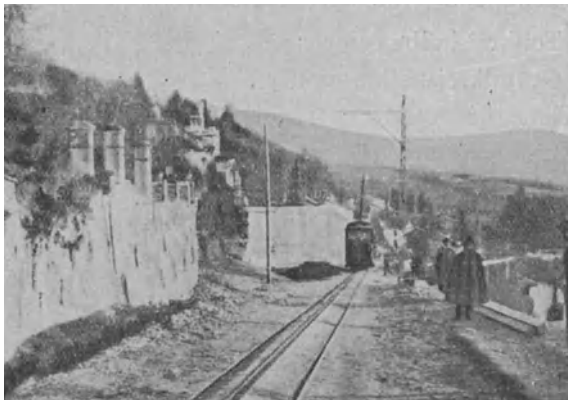


Abb. 601. Zahnbahn Alhambra—Granada (Spanien),
Leiterzahnstange in das Schotterbett verlegt.

höhen bis 220 mm ab (Brünigbahn). Eine erstmals bei der Wengernalp- und Schynige Platte-Bahn verwendete, entsprechend verbesserte Konstruktion der Riggenbach-Zahnstange rührt 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 Riggenbach-Zahnstange, die erstmals am Rigi zur Anwendung gelangte, zeichnet sich durch sehr große Widerstandsfähigkeit aus. Ein Nachteil liegt darin, daß Weichen und Kreuzungen schwierig herzustellen sind. Riggenbach 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 Zahnbahnen, daß sie in Anlehnung an das Gelände in kürzester Strecke große Höhenüberwindung gestatten,

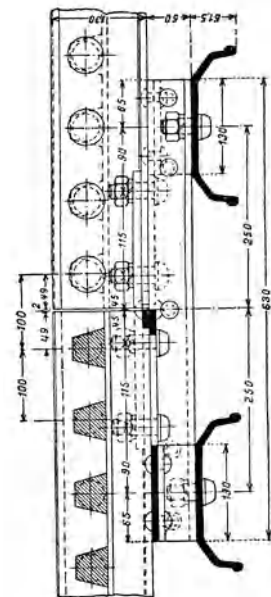
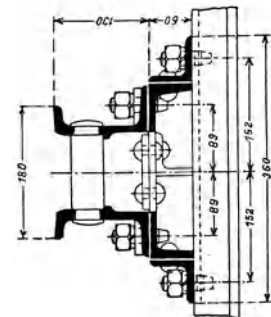
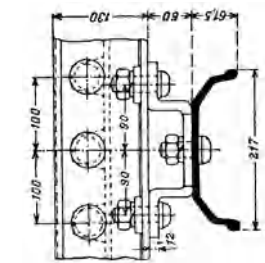
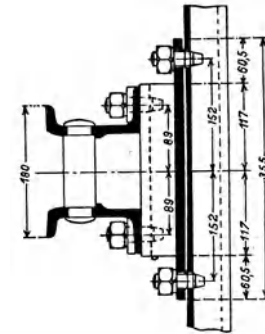


Abb. 602. Leiterzahnstange der Wengernalpbahn.

wird dadurch beeinträchtigt. Die Herstellung dieser Zahnstange wird durch die besondere Konstruktion für die verschiedenen Radien verteuert, sie ermöglicht aber eine ordentliche Fahrzeugverankerung.

Eine weitere Abänderung weist die neue Zahnstange der Wengernalpbahn auf, die auf Sätteln montiert ist, um Schnee und Eis freien Austritt zu lassen (Abb. 602). Die Wangenlöcher sind gebohrt statt gestanzt, die trapezförmigen Zähne liegen auf Nasen, die an die Wangen angewalzt sind, auf. Die Zähne haben 52 t Bruchfestigkeit. Durch Reduktion der Stoßlücken von 4 mm auf 2 mm, wie solche der Verfasser bereits 1902 beim Zahnstangenoberbau der Jungfraubahn durchführte, wurden die Differenzen in der Zahnteilung, die sich namentlich beim elektrischen Betrieb unangenehm fühlbar machen, wesentlich herabgemindert, ebenso das Wandern des Oberbaues.

8. Zahnstange Bauart Abt. (Abb. 603). Diese besteht aus 2, ausnahmsweise 3 gezahnten Lamellen, deren Breite je nach Bedarf mit 15 bis 32 mm bemessen wird.

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 einseitigem Zahntrieb; gewöhnlich wird sie mit 120 mm ausgeführt.

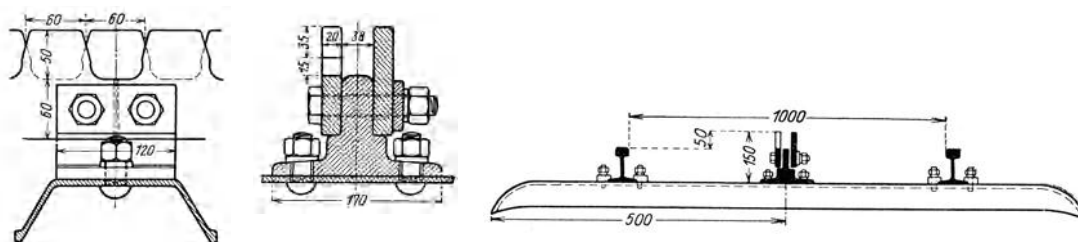


Abb. 603. Zweilamelliger Zahnstangenoberbau Abt.

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 Gang zu erzielen, indem die Stemmwirkung der mit versetzter Teilung in die Zahnstange eingreifenden Zahnräder sich gegenseitig aufheben soll. Bei dem unausgebalancierten Gang der Dampflokotiven war diese Eigenschaft besonders erstrebenswert; tatsächlich sind auf Strecken mit Abtscher Stange die verhältnismäßig höchsten Geschwindigkeiten erzielt worden. Die Stahllamellen haben 48—50 kg/mm² Festigkeit bei 20—18% Dehnung.

Die Abtsche Zahnstange 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, ausgedehnte Anwendung gefunden. Sie verlangt jedoch gefederte Zahnkränze für die Triebzahnräder, um eine gleichmäßige Aufteilung des Zahndruckes auf beide Lamellen zu erreichen.

9. Zahnstange Bauart Strub. Konstruktiv weitgehenden Anforderungen entspricht die aus einem Stück hergestellte Zahnstange Strub. (Abb. 604.)

Sie ist für die Jungfraubahn entworfen worden und 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 Zahnrad und die Zange bei Kreuzungen über die Schienen hinwegkommen. Die Laufschienen sind daher nicht zu unterbrechen.

Die Zähne werden unterfräst, die Zahnücke erhält einen keilförmigen Querschnitt, die Teilung beträgt 100 mm.

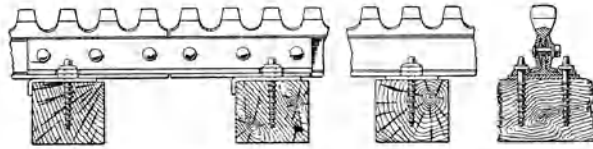


Abb. 604. Zahnstange Strub, auf Holzschwellen verlegt.

Die Stange wird aus weichem Stahl von 5000 bis 5700 kg/cm² Festigkeit bei 16% Dehnung hergestellt. Sie läßt sich verhältnismäßig leicht biegen; sie kann daher auch in Krümmungen bis zu 60 m Radius verwendet werden.

10. Einfache Lamellenzahnstange. Da die Erfahrungen mit den Sicherheitszangen nicht eindeutig sind, es sich auch als notwendig erwiesen hat, Einrichtungen zu treffen, um übertriebene Bremswirkungen zu vermeiden, hat Seefehlner für den Erzberg eine 50 mm breite, einfache Abt-Lamelle als Zahnstange verwendet, bei welcher die Zange durch Führungsscheiben für die Triebzahnräder ersetzt ist.

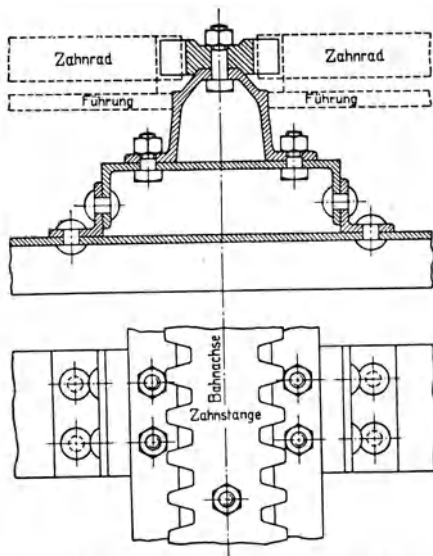


Abb. 605. Oberbau, System Locher (Pilatusbahn) mit wagerechtem Zahneingriff.

Diese Zahnstange hat die Befestigung nach Abt und ist für Zahndrücke bis etwa 5000 kg ausreichend. Die Triebzahnräder sind durch ein Kurbelgetriebe gekuppelt, wobei die Zähne um eine halbe Teilung versetzt sind.

Die Erzeugung und Verlegung der einlamelligen Zahnstange gestaltet sich einfach. Solche Zahnstrecken finden sich auch auf kürzeren Strecken mit geringerer Steigung bei verschiedenen Zahnbahnen. Eine mehrteilige Lamelle weist die Telfener-Zahnstange der St. Ellero-Saltino-Bahn auf.

Alle diese Zahnstangen werden auf Eisen- oder Holzschwellen verlegt.

11. Zahnstange Bauart Locher. Bei den betrachteten Zahnstangensystemen erfolgt der Zahneingriff in einer lotrechten Ebene, die Zahnflanken haben stets eine Neigung von 1:4 gegen die Bahnneigung. Eine Auftriebskomponente ist daher stets vorhanden; aus dieser Ursache und wegen des Kippmomentes der gestützten Last werden

Steigungen von mehr als 26% nicht mehr angewendet. (Corcovadobahn 30%, Mt. Washington 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 in der Schweiz erstmalig die für die Pilatusbahn (Höchststeigung 48%) nach Angaben von Oberst Locher gebaute, sog. Fischgrätenzahnstange (Abb. 605) ausgeführt worden.

Diese Zahnstange fand aus verschiedenen Gründen keine weitere Verbreitung.

12. Zahnstange Bauart Peter. Die gleiche Aufgabe hat neuerdings der Verfasser mit seiner aus einem Stück durchgebildeten Kletterzahnstange Peter (Abb. 606 bis 608) mit einem Gewichte von rd. 50 kg/m gelöst und dabei auch für die Zahnstangen-Einfahrten einwandfreie neue Konstruktionen vorgeschlagen. Die Ausweichungen werden bei diesem, ins-

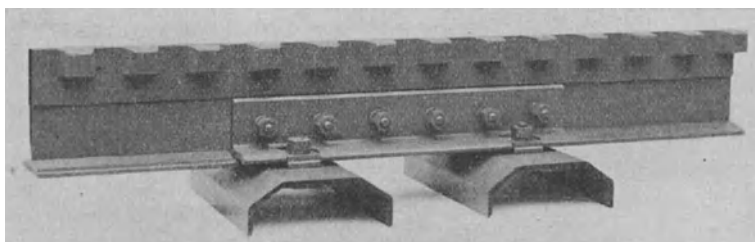


Abb. 606. Kletterzahnstange Peter auf Eisenschwellen.

besondere auch für gemischte Bahnen ausgebildeten System in Reibungsstrecken verlegt oder als Dreh- oder Schiebebühnen ausgeführt. (Dreikreuzberg Karlsbad.) Das ist aber kein besonderer Übelstand dieses Typs, da für alle Zahnstangen-Weichen die Tatsache gilt, daß ein geringfügiger Mangel derselben genügt, um eine Entgleisung des Zahnrades und damit schwere Gefahren herbeizuführen.

Auf diesen Umstand, im Zusammenhange 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 wagrecht oder in geringe Neigungen und richtet die Triebfahrzeuge so ein, daß sie für Zahnstangen- und Reibungsbetrieb geeignet sind. Abt hat nach diesem Grundsatz seine Dampflokomotiven mit getrenntem Reibungs- und Zahnantrieb eingerichtet.

Das für die Kletterzahnstange dienende Zahnschienenprofil Peter von rd. 100 t Bruchfestigkeit kann auch für vertikalen Zahn-eingriff (Abb. 607) bearbeitet werden. Diese Zahnstange gestattet eine zuverlässige Verankerung der Fahrzeuge.

Nach den neueren schweizerischen Vorschriften muß die Konstruktion einer Zahnstange derart sein, daß die Zahnräder niemals gänzlich den Eingriff mit der Zahnstange verlieren können.

Die Zahnstangen Locher und Peter sind die einzigen, welche eine sichere Verankerung der Fahrzeuge, d. h. vollständige Sicherheit gegen Entgleisen bieten. Bei gemischten Bahnen ist auf die gute Ausbildung und Disposition der Zahnstangeneinfahrten besonderes Gewicht zu legen.

13. Arten der Zahnbahnen. Auf Grund der Gestaltung des Längenprofils, welches von maßgebendem Einfluß auf die Wahl des Betriebssystems und der Fahrzeugbauarten ist, können zwei Hauptgruppen mit besonderen Kennzeichen unterschieden werden:

- I. Reine Zahnbahnen, d. s. solche, die durchwegs Oberbau mit Zahnstange aufweisen; die Triebfahrzeuge dieser Bahnen benötigen keinerlei Einrichtung für Reibungsbetrieb. (Abb. 609, I.)
- II. Gemischte Bahnen. Diese Bahnen haben als gemeinsames Merkmal den gemischten Betrieb. Sie unterscheiden sich in der Hauptsache in bezug auf den verhältnismäßigen Umfang und die Anordnung der Reibungs- und Zahnstangenstrecken. (Abb. 609, II bis VI.)

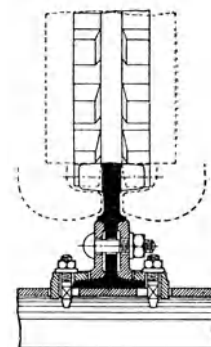


Abb. 607. Zahnstange Peter für senkrechten Eingriff.

In dieser Gruppe bilden eine besondere Type Bahnen für große Zugleistungen mit Steigungen bis etwa maximal 80‰ , auf denen Züge bestehend aus gewöhnlichen Eisen-

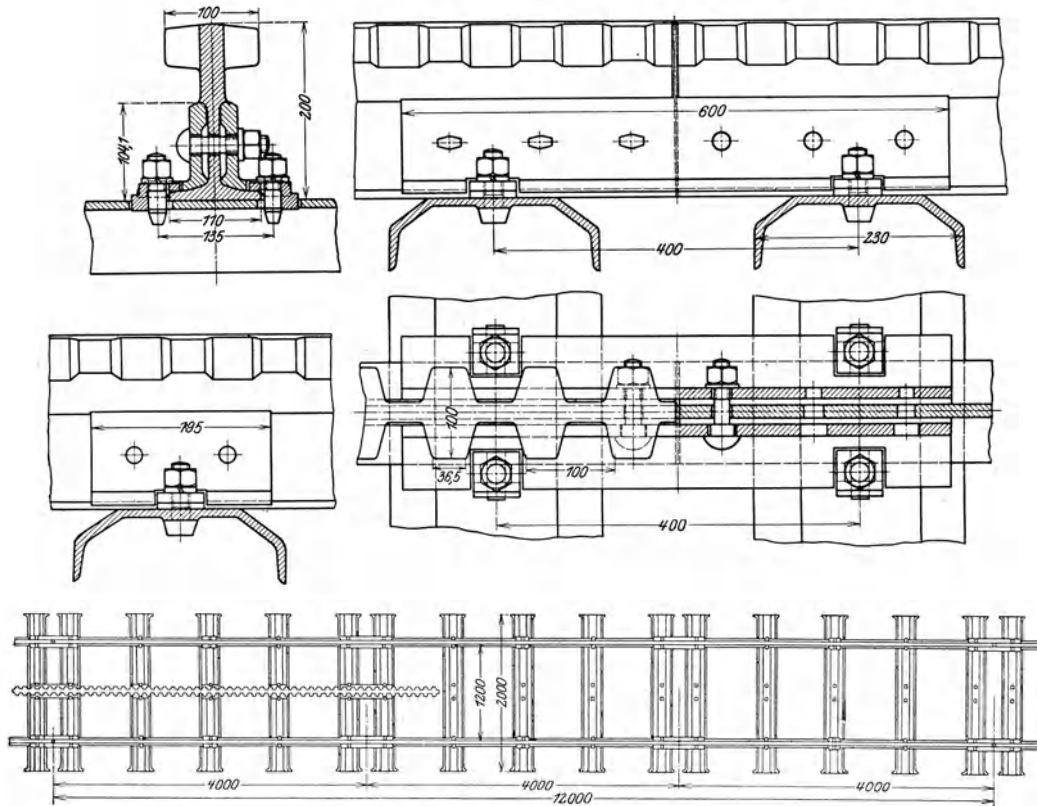


Abb. 608. Kletterzahnstangen-Oberbau, System Peter.

bahnfahrzeugen, die nur mit Reibungskraft gebremst werden, gefördert werden. Diese Bahnen könnten Reibungsbahnen mit Zahnradbetrieb genannt werden; ihre Triebfahrzeuge sind so eingerichtet, daß etwa die halbe Zugkraft durch Ausnützung der Reibung des Triebgewichtes erzeugt wird.

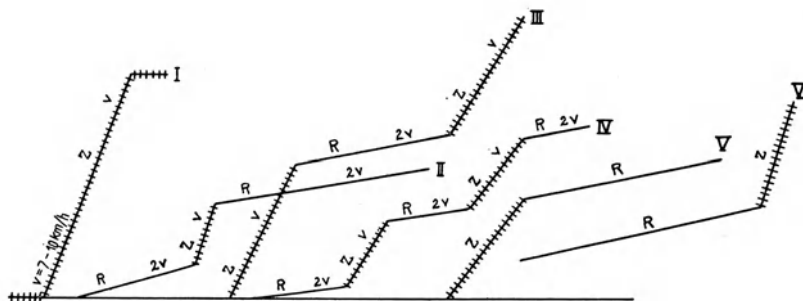


Abb. 609. Schema der Zahnbahnarten.

I. Reine Zahnbahn; II. Reibungsbahn mit einer Steilrampe; III. Zahnbahn mit zwischenliegender Reibungsstrecke; IV. Zahnbahn mit mehreren Reibungsstrecken; V. u. VI. Zahnbahn mit nur einer Reibungs- und Zahnstrecke.

14. Arten der Triebfahrzeuge. In allen Fällen kann die gestellte Transportaufgabe mit Lokomotiven oder Motorwagen gelöst werden; tatsächlich weisen beide Bahnkategorien beiderlei Ausführungen auf.

Für reine Zahnbahnen bieten Motorwagen Gewichtsvorteile, wie die vorhandenen Ausführungen beweisen; deren mechanische und elektrische Ausrüstung erfordern aber meist gedrängte Bauart.

Im gemischten Betrieb lassen sich durch Fahrzeuge, welche ohneweiters die ganze Strecke durchfahren können, in der Anschaffung und in den Personalkosten im Betrieb namentlich dann nennenswerte Ersparnisse erzielen, wenn die in die Reibungsstrecken wiederholt eingeschalteten Steilrampen sonst die Indienstellung mehrerer Schiebelokomotiven verlangen würden.

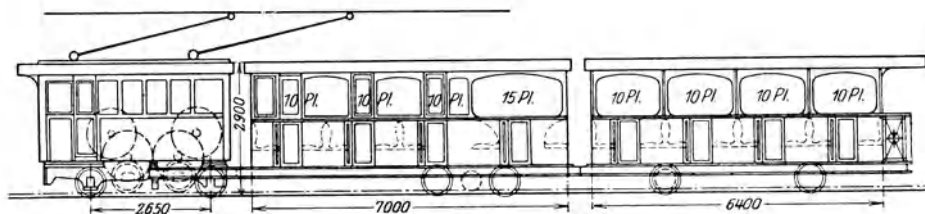


Abb. 610. Zugbildung für Zahnbahnen mit Lokomotive, Gliederwagen und Vorsetzer, sog. Rowan-Komposition.

Mit Rücksicht auf die obige Einteilung der Zahnbahnen in zwei Gruppen lassen sich folgende Triebfahrzeugarten unterscheiden:

I. Reine Zahnradtriebfahrzeuge, nur geeignet für reine Zahnbahnen.

Bei dieser Betriebsart werden für große Zugsleistungen im allgemeinen Lokomotiven oder Gliederwagen (Abb. 611, 610) den Motorwagen vorgezogen.

II. Für Bahnen mit gemischtem Betrieb eignen sich Triebfahrzeuge mit gemischtem Antrieb und nur einer oder mehreren Fahrgeschwindigkeiten.

Handelt es sich um die Förderung schwerer Lasten in verhältnismäßig geringen Steigungen (50 bis 70 ‰), also Reibungsbahnen mit Zahnradbetrieb, wobei die Reibungszugkraft noch einen namhaften Anteil der gesamten Zugkraft darstellt, so sind zweckmäßig Lokomotiven vorzusehen.

Von den Fahrzeugen für gemischte Bahnen mit längeren Reibungsstrecken werden in den letztern verhältnismäßig größere Geschwindigkeiten als auf den Zahnstrecken verlangt, worauf bei deren Konstruktion Rücksicht zu nehmen ist.

Die Triebfahrzeuge verschiedener gemischter elektrischer Bahnen sind auch so ausgerüstet, daß auf der Zahnstrecke die Reibungstriebäder einen Teil der Zugkraft hergeben und nur die restliche Zugkraft durch die Triebzahnäder zu leisten ist.

Bei mehreren älteren gemischten Bahnen mit je einer Zahnstrecke werden Schiebelokomotiven verwendet, die den auf der Reibungsstrecke selbständig verkehrenden Motorwagen über die Zahnstangenstrecke führen (Vesuv, Stansstad—Engelberg, Triest—Opčina, Bex—Gryon—Villars, Bozen—Ritten).

Die neueren gemischten Bahnen verwenden Zugkompositionen, die ohneweiters die ganze Strecke durchfahren können; einzelne derselben haben mit Rücksicht auf die besonderen Verhältnisse Betrieb mit gemischten Lokomotiven (Jungfraubahn, Berner-Oberland-Bahnen, Blonay—Pleiades, Schöllenenbahn), die Großzahl derselben erhielten gemischte Motorwagen (Monthey—Champéry, Martigny—Châtelard, Stresa—Mottarone, Altstätten—Gais, Leuk—Leukerbad).

An die Zahnbahnlokomotiven werden im allgemeinen, soweit zutreffende Verhältnisse bestehen, die gleichen Anforderungen gestellt, wie an Reibungslokomotiven; außerdem muß dafür gesorgt werden, daß auch bei unebenem Geleise eine richtige Radlastverteilung gewährleistet ist. Die Zahnbahnlokomotiven sollen nach den in der Schweiz üblichen Vorschriften in der Regel folgende Bremseinrichtungen erhalten:

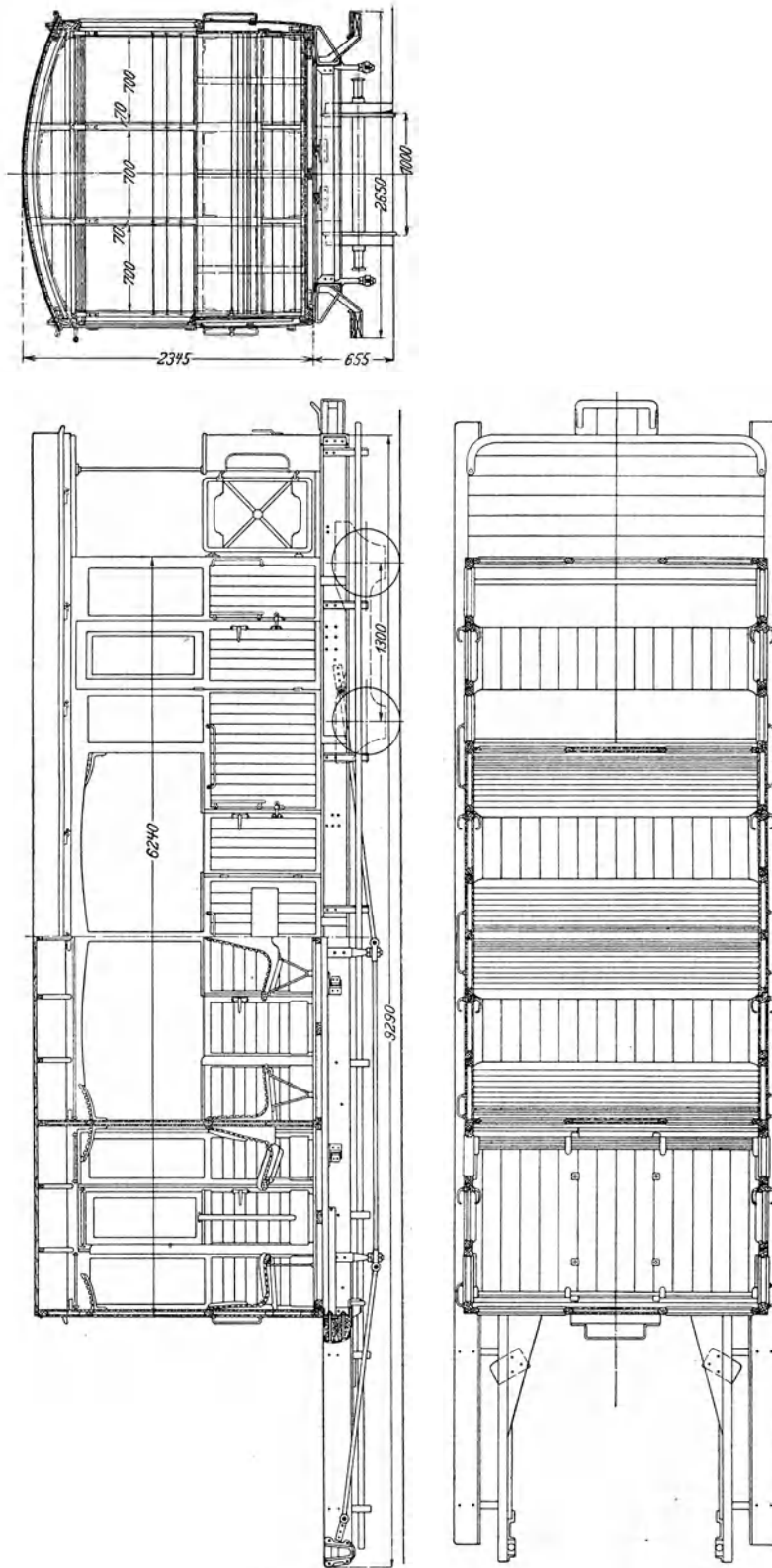


Abb. 611. Gliederwagen (sog. Kuppelwagen) der Zahnbahn Brunnen—Morschach. Fassungsraum 45 Sitzplätze, Leergewicht 4,5 t.

1. Eine Regulierbremse (Luftkompressions- oder elektrische Bremse).
2. Zwei voneinander unabhängige Zahnradbremsen (Klotz- oder Bandbremsen), von denen jede für sich allein den vollen Zug auf dem Maximalgefälle anhalten kann.
3. In Gefällen über 13‰ eine Einrichtung, welche, auf eine der beiden Zahnradbremsen wirkend, das Überschreiten der maximal zulässigen Fahrgeschwindigkeit selbsttätig verhütet, und
4. Die Einrichtung für eine durchgehende automatische Bremse, wenn die Lokomotive bei der Bergfahrt an der Spitze des Zuges steht.

Diese Bremse muß auf die Reibungs- und Zahnräder sämtlicher Wagen wirken.

Jeder Wagen der reinen Zahnbahnen muß mindestens mit einer Zahnradbremse, bei gemischtem (Reibungs- und Zahnrad-)Betrieb mit einer Reibungs- und einer Zahnradbremse versehen sein.

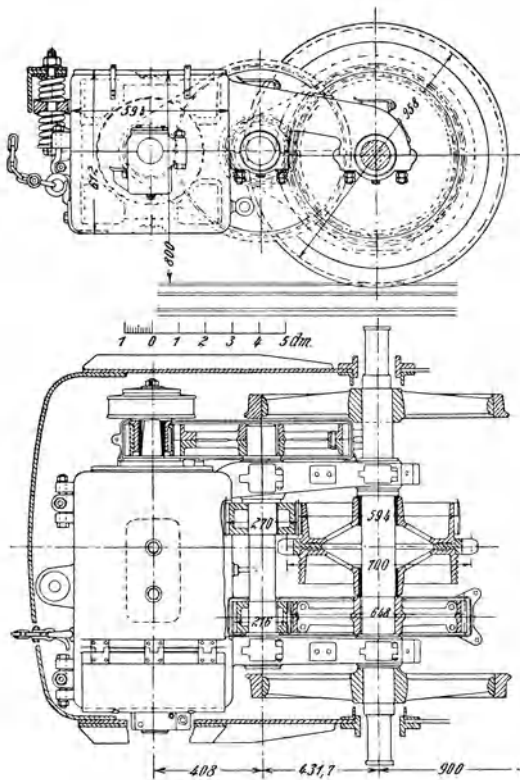


Abb. 612. Triebwagen der Bahn Martigny—Châtelard. Anordnung eines Untergestellmotors für Reibungs- und Zahnstangenbetrieb, beides mit der gleichen Fahrgeschwindigkeit.

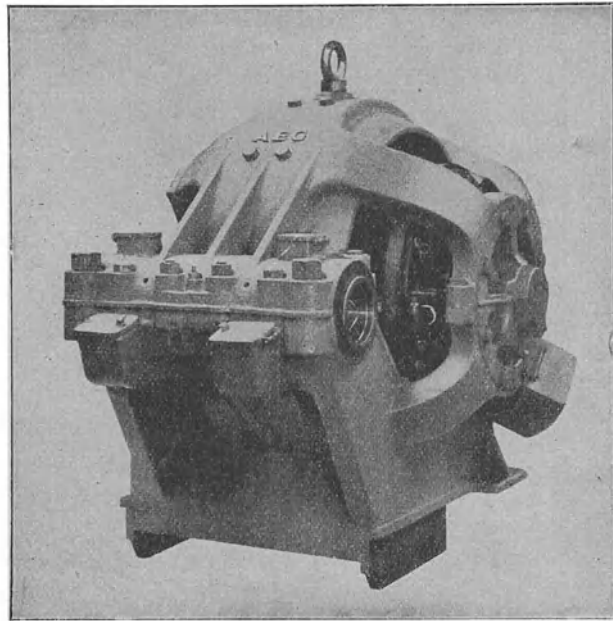


Abb. 613. Gestellmotor der Lokomotive der Zahnradbahn Usui—Toge.

Leistung 350 PS/h, Drehzahl 650/min, Übersetzung 1 : 6,4 f. d. Zahnstange, 1 : 5,9 f. d. Reibungsantrieb. Gleichstrom 650 V.

15. Antriebsmotoren und Getriebe. Die ersten reinen Zahnbahnen wurden regelspurig angelegt. Diese Bauart befriedigte nicht, weil insbesondere die Unterbaukosten zu hoch waren, da die Linie sich meist nicht genügend dem Gelände anschmiegen ließ. Spätere Ausführungen wählten, zu weit in der entgegengesetzten Richtung gehend, die 80 cm-Spur. Seit Erstellung der Brünigbahn ist für Neuanlagen von reinen und gemischten Zahnbahnen die Meterspur die Regel, die sich für gemischte Fahrzeuge auch aus konstruktiven Gründen ergibt.

Die schmale Spur und die verhältnismäßig geringe Fahrgeschwindigkeit 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 einer 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 Übersetzungen lassen sich nur mit doppeltem Vorgelege ausführen.

Die Unterbringung dieses Vorgeleges ist an sich schon schwierig, insbesondere bei Untergestellmotoren (Abb. 612); Lokomotiven werden daher ausschließlich mit Gestellmotoren, und zwar mit den Bauformen von Stabilmaschinen, ausgerüstet (Abb. 613, 618, 619).

Die für den Bahnbetrieb stets als nachteilig erkannte Starrheit im Getriebe ist hier gegenüber dem Reibungsbetrieb im erhöhten Maße vorhanden, weil die sonst nachgiebige Übertragung zwischen Rad und Schiene durch das zwangsläufige Getriebe von Zahnrad und Zahnstange ersetzt ist, somit fehlt. Nachteilig tritt auch das verhältnismäßig große Trägheitsmoment der mit hoher Drehzahl umlaufenden Massen und das geschlossene Getriebe in Erscheinung.

Jede Unregelmäßigkeit der Zahn-

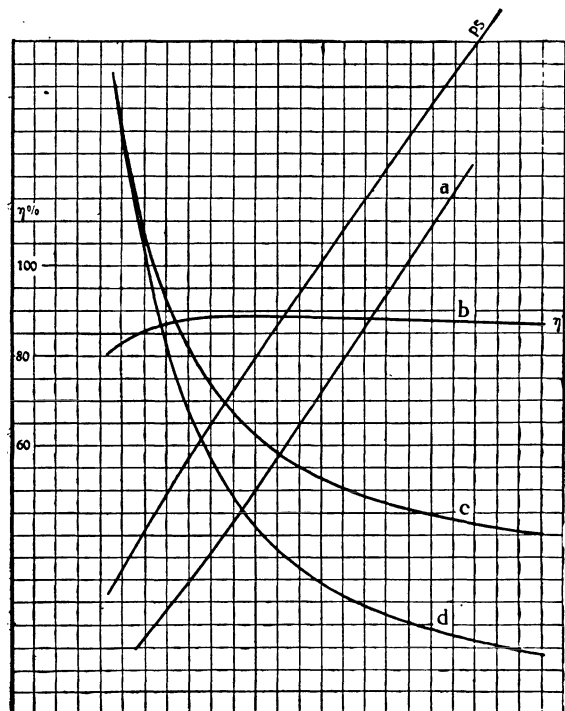


Abb. 614. Kennlinien der Lokomotive der Usui-Togebahn, Zahnrad- und Reibungsbetrieb. a: Zugkraft, b: Wirkungsgrad einschl. Zahnradübersetzung, c: Umlaufzeit je min, d: Geschwindigkeit km/h.

lücken unvermeidlich ist, verursacht eine stoßartige Geschwindigkeitsänderung. Dieser Umstand ist von um so größerer Bedeutung, als die umlaufenden Massen nach durchgeführt Versuchen bei Zahnradlokomotiven die lebendige Kraft der linear bewegten Massen oft vervielfachen.

Meistens sind beide Übersetzungen gekapselt, zumindest aber die erste.

16. 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. 615), einzubauen.

Diese wird stets auf der Ankerwelle angeordnet, da hier das kleinste Drehmoment zu übertragen ist; daher bleiben Maße und Gewicht in mäßigen Grenzen.

Die Rutschkupplung besteht aus zwei Ringsystemen verschiedenen Materials, die mittels regulierbarer Federn zusammengedrückt werden und einerseits mit dem Ritzel, andererseits mit der Ankerwelle verbunden sind. Die Federn dieser Lamellenkupplung werden so angezogen, daß nur die Übertragung der höchstzulässigen Zugkraft möglich ist. Ein Maß hierfür bildet die Ankerstromstärke.

Zum Zahndruckausgleich sind auch gefederte Zahnkränze oder Ausgleichkupplungen zwischen den Triebzahnradern (Wengernalp) angewendet worden.

17. Die Handbremse. Am Triebzahnrad sitzen bei Lokomotiven stets zweiseitig die gerillten Bremsscheiben, die bei älteren Ausführungen mit Bronzebändern

gebremst wurden, die sich jedoch gerne festbrannten; neuerdings verwendet man gußeiserne Bremsklötze. Die auf das Triebzahnrad wirkende, von Hand betätigte Bremse arbeitet mittels 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 talseitigen (hinteren) Laufachse an.

Die Trieb- und Bremszahnäder versieht man bei den Abt- und Strub-Zahnstangen mit Sicherheitsflanschen von etwas größerem Durchmesser als die Triebzahnäder, um das Zahnrad so weit als möglich am Entgleisen zu verhindern.

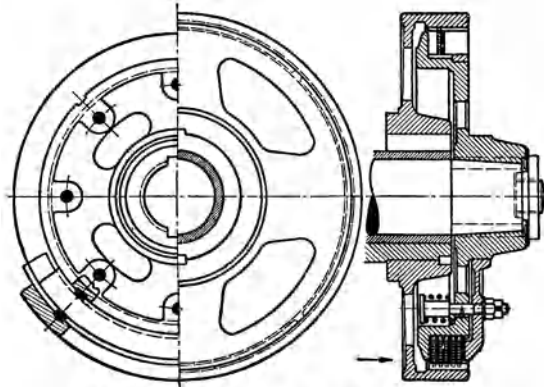


Abb. 615. Rutschkupplung für 350 PS.

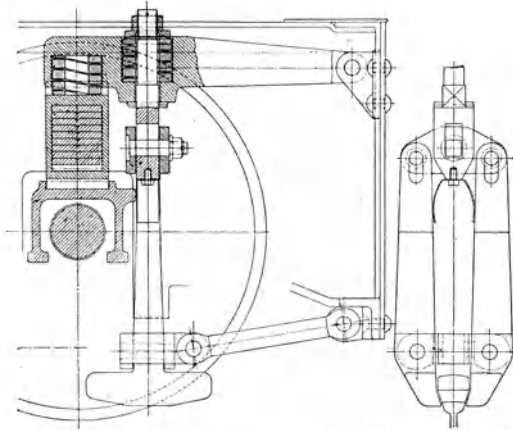


Abb. 616. Sicherheitszange mit gefederter Aufhängung für die Strub-Zahnstange (SLFW).

18. Die Zange. (Abb. 616.) Dem gleichen Zwecke dient die bei der Leiterzahnstange und 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 soll. In der Praxis hat sich erwiesen, daß man auch die Zange federnd aufhängen muß, um zu verhindern, daß dieselbe durch die heftigen Stoßwirkungen

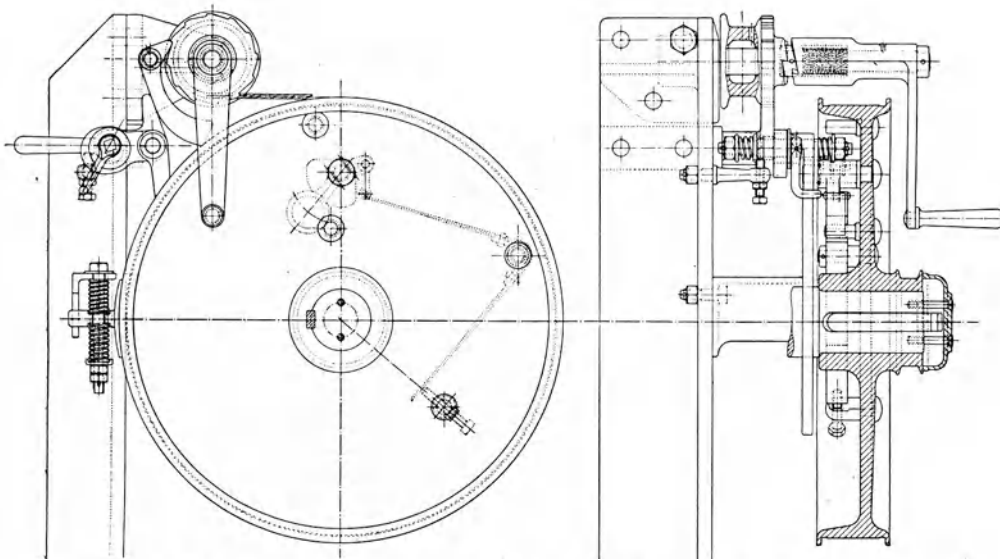


Abb. 617. Geschwindigkeitsbremse mit Fliehkraftauslösung (Zentrifugalbremse).

aufgeht oder sonst ein Bestandteil der Aufhängung Schaden erleidet. Als Bremsmittel hat sich die Zange nicht bewährt.

19. Die selbsttätige Bremse. (Abb. 617.) Außer der Handbremse sieht man bei elektrischen Zahnradlokomotiven stets noch eine selbsttätige Bremse vor, die bei Überschreitung der erlaubten Geschwindigkeit in Tätigkeit tritt. Die betreffenden Bremscheiben sitzen auf den Motorwellen und werden mittels kupfer- oder chekko-gefüllter Stahlbänder, die durch Federkraft angezogen werden, gebremst. Die Auslösung dieser Bremse erfolgt durch Fliehkraft oder auch von Hand aus. Zur Milderung der Bremswirkung wird ein zu rasches Einsetzen der Feder durch einen Katarakt verhindert.

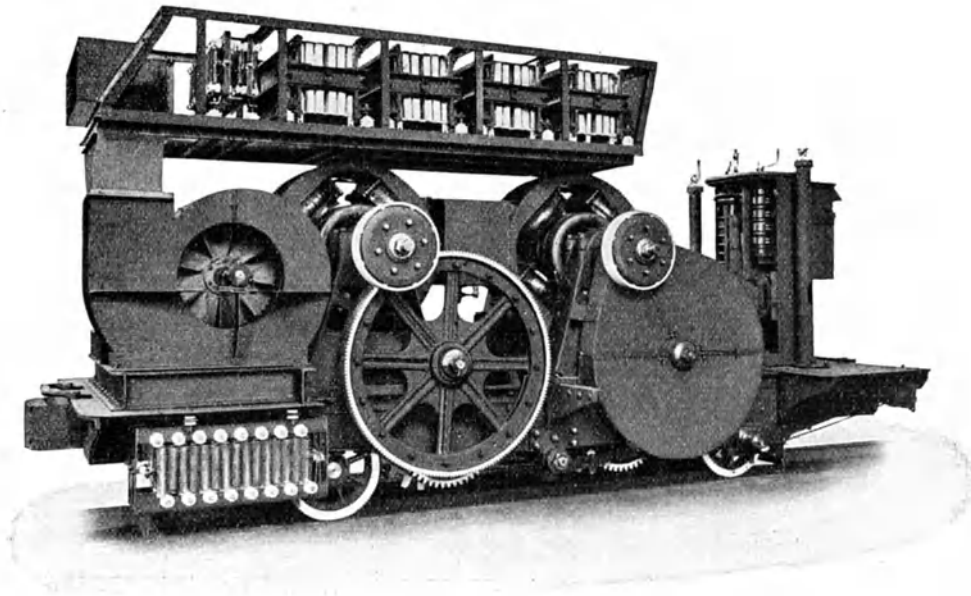


Abb. 618. Lokomotive der Wengernalpbahn, Reihe 51—54 (Kasten abgehoben, Bremswiderstände und Rutschkupplungen sichtbar, Alioth & SLFW).

Achsfolge	2/2a	Drehzahl	750/min	Dienst-Gewicht	16,15 t
Leistung (dauernd) .	2×150 PS	Geschwindigkeit . . .	8 km/h	Gewicht der elektr. Ausrüstung	8,1 t

20. Das Gestell. (Abb. 618, 619.) Die Bauformen des Rahmens der Zahnradlokomotiven für Steilbahnen mit Steigungen über 100‰ werden in der Hauptsache von dem Gesichtspunkt beeinflusst, daß die Kippmomente in unbedenklichen Grenzen gehalten werden müssen. Lokomotiven für die Beförderung von schweren Zügen auf Strecken mit 50 bis 70‰ weisen Bauformen auf, die sich den Reibungsmaschinen nähern.

Da das Aufsteigen bei Zahnbahnen mit vertikalem Zahneingriff an sich niemals absolut ausgeschlossen werden kann, müssen zum Schutze gegen diese Gefahr stets die bereits behandelten Einrichtungen vorgesehen werden. Die enormen Kräfte, denen die Rahmen in solchen Fällen ausgesetzt sind, verlangen eine sehr widerstandsfähige Bauart, die auch schon wegen der an sich großen Zugkräfte nötig ist. Im Hinblick auf die Anordnung der Triebzahnräder und der Zange, sowie auf die zweckmäßige Mehrbelastung der bergseitigen Achse können die Gestelle stets nur in einer Lage benützt werden. Bei Überschreitung des Bahnscheitels müssen Lokomotiven für Steilbahnen verwendet werden.

21. Lokomotiven für reine Zahnbahnen. Reine Zahnradlokomotiven (Abb. 620) sind vom Standpunkt der Bekämpfung der Kippmomente gegenüber solchen für gemischten

Betrieb insofern im Vorteil, als die Laufraddurchmesser in praktischen Grenzen beliebig klein gehalten werden können, wogegen Maschinen für gemischten Betrieb Reibungstriebäder erhalten müssen, die — sofern eine direkte Kupplung gewählt wird — den gleichen Durchmesser haben müssen wie die Triebzahnräder.

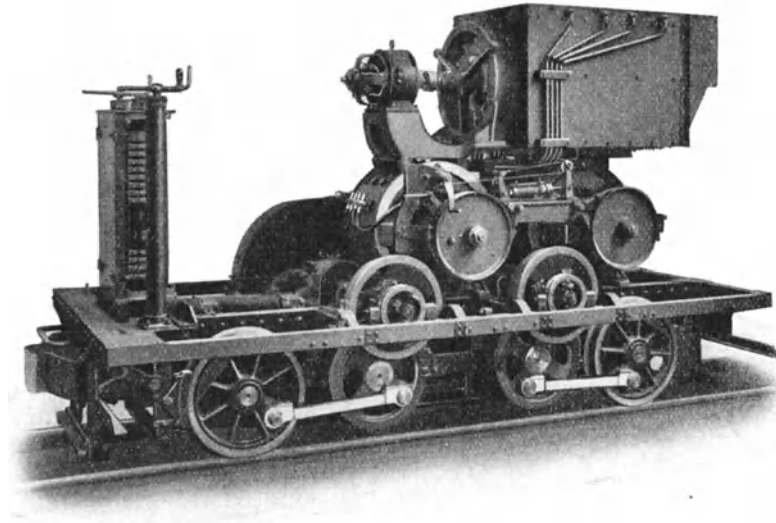


Abb. 619. 2A/2a. Zahnradlokomotive der Montreux—Glion-Bahn. Anordnung und Betätigung der selbsttätigen Bremsen (MFO & SLFW).

Zur Verminderung des Kippmomentes sollen die Motoren sowie alle sonstigen schweren Einrichtungen möglichst niedrig angeordnet und insbesondere die Puffer so tief als möglich gesetzt werden. Bei älteren Bahnen sind die Puffer nicht gefedert; diese Anordnung ist zum Teil verlassen worden und es erhalten dann die geschobenen Fahrzeuge eine Federung.

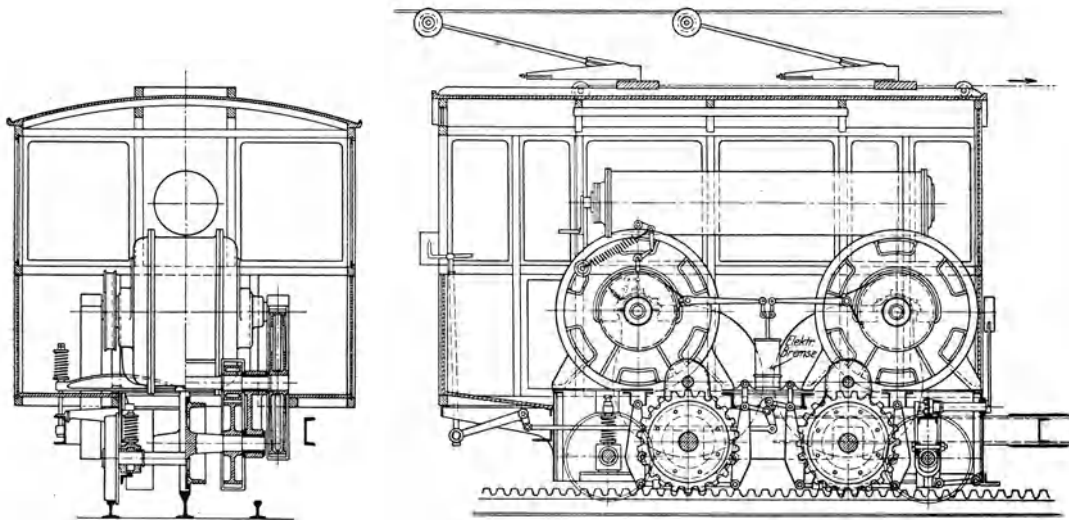


Abb. 620. Lokomotive der Jungfraubahn, Reihe 1 bis 8, für reinen Zahnbetrieb. (BBC, MFO & SLFW).

Achsfolge	2/2a	Triebzahnräder-Durchmesser	700 mm
Leistung	2 × 125 PS, 800 Touren/min	Dienstgewicht	13 t bis 16 t
Fahrgeschwindigkeit	8,5 km/h	Zahnstange Strub	
Größte Steigung	250‰		

Der ordnungsgemäße Zahneingriff verlangt, daß die Tragfedern ganz entfallen, bzw. daß 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 Kurven Rechnung zu tragen. Gewöhnlich wird die vordere (bergseitige) Achse in einer gefederten Wiege gelagert, die gleichzeitig die gefederte Zange trägt.

Fahrzeuge für gemischten Betrieb und größere Geschwindigkeiten in den Reibungsstrecken erhalten zwei Rahmen. Der innere Rahmen 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.

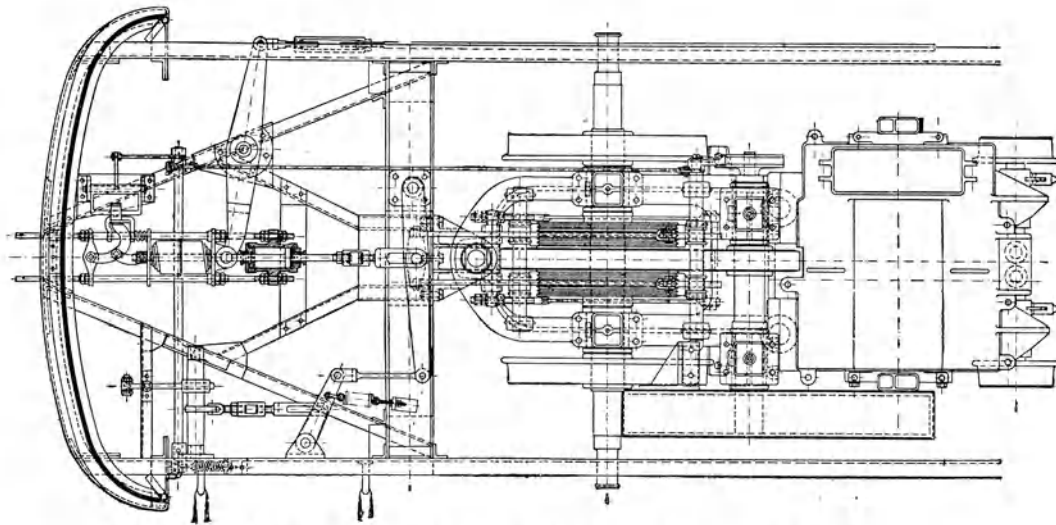


Abb. 621. Triebgestell der Motorwagen der Filderbahn, reiner Zahnbahnbetrieb.

Leistung des Motors	150 PS/h	Übersetzung	1:9,2
Uml./min	550	Triebzahnradurchmesser	455 mm
Gewicht	5 t.		

22. Motorwagen für reine Zahnbahnen. Es gibt nur vereinzelte reine Zahnbahnen mit reinem Motorwagenbetrieb; für einige derselben kam es zu Erstlingsausführungen, die sich als minderwertig erwiesen haben.

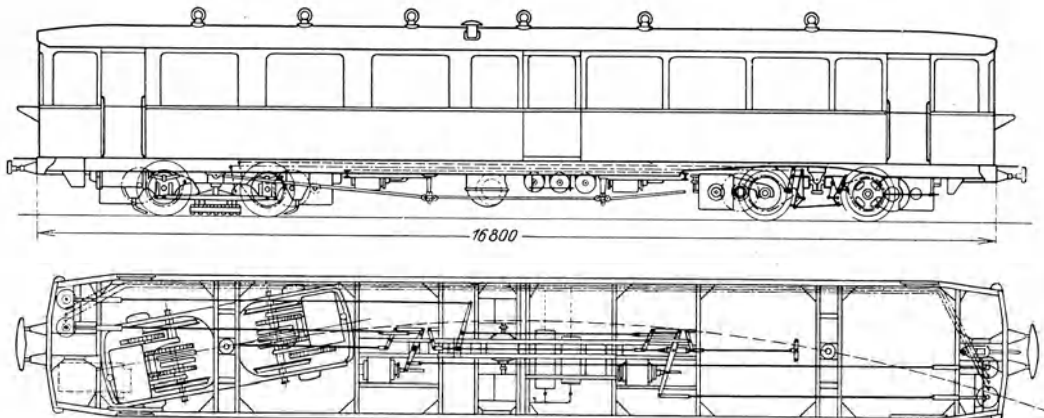


Abb. 622. Lokalbahn Martigny—Châtelard, Gemischter Betrieb (Reibung und Zahnrad), Meterspur, viermotoriger Triebwagen.

Bei den Motorwagen der Filderbahn (Abb. 621) ist z. B. eine wirtschaftliche elektrische Nutzbremse durch Nebenschlußmotoren vorgesehen, dagegen fehlt die Rutschkupplung. Dabei ist das Gewicht von 662 kg per m² Wagenfläche keineswegs geringer als das gesamte Totgewicht bei anderen reinen Zahnradbahnen mit Lokomotiv- bzw. Gliederwagenbetrieb. An dieser 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.

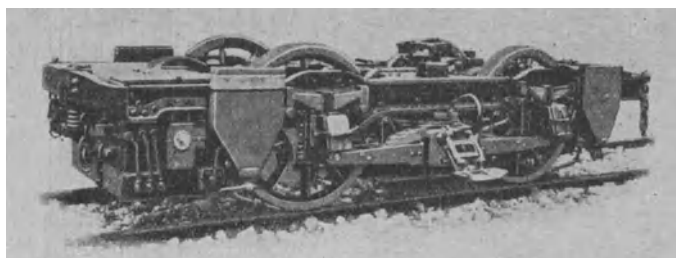


Abb. 623. Ansicht des Drehgestelles von Abb. 622 (SLFW).

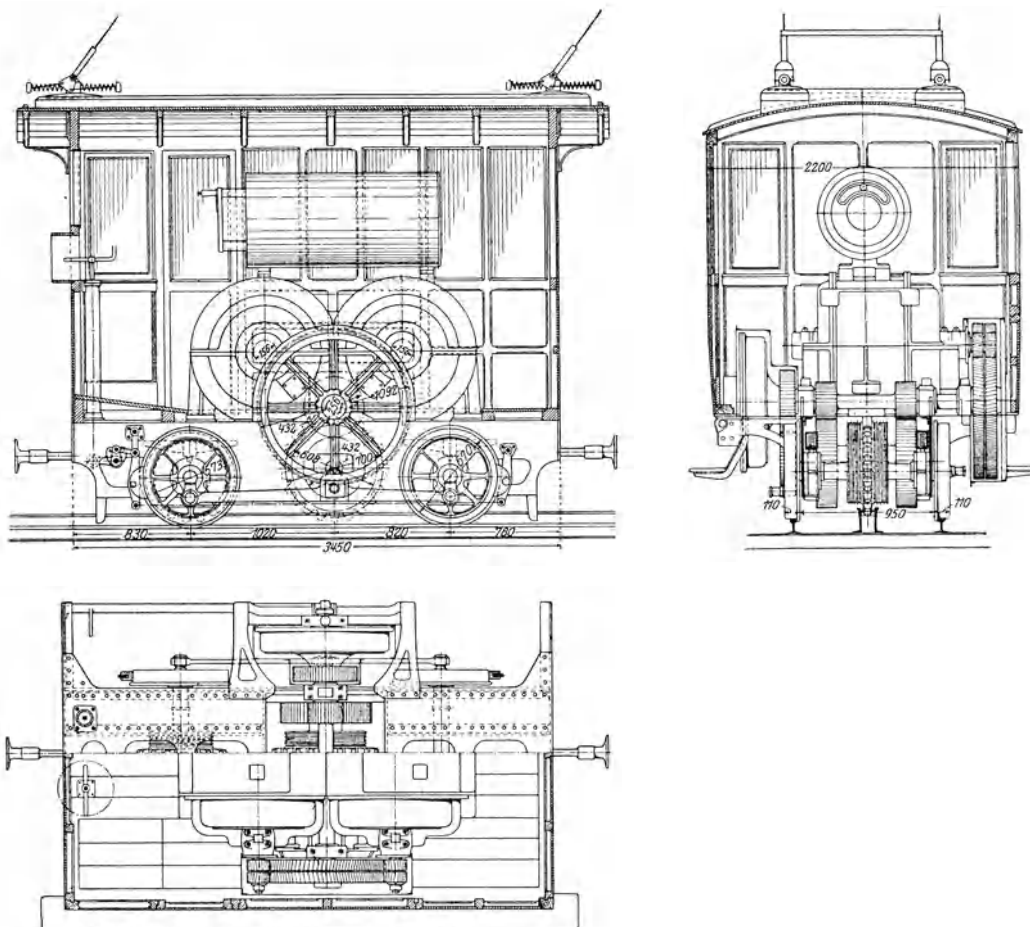


Abb. 624. B/a-Lokomotive der Zahnbahn Stansstad—Engelberg (BBC & SLFW).

Leistung	2 × 130 PS	Dienstgewicht	12 t
Geschwindigkeit	5,0 und 11,5 km/h	Stromart DS	750 V

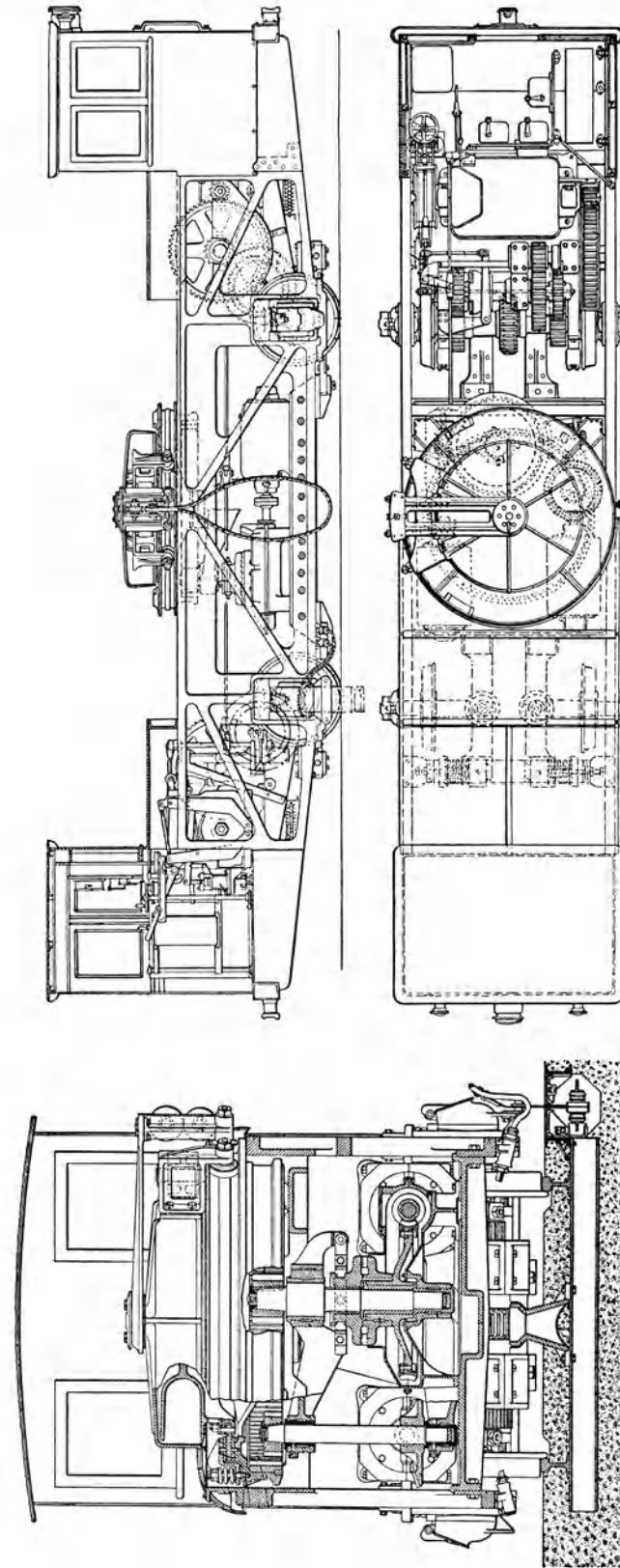


Abb. 625. Treiblokomotive mit Zahnstangen- und Reibungsbetrieb für den Panamakanal, 2A/2a.

Leistung	150 PS
Geschwindigkeit	3,2/7,5 km/h
Dienstgewicht	33 t
Steigung	40%
Stromart DS	220 V 55 ~

(Den Seitenzug der Seiltrosse nehmen die wagerechten an den schrägen Zahnstangenflanken geführten Räder auf.)

23. Triebfahrzeuge für gemischte Bahnen. (Abb. 622 bis 625.) 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 Teilkreisdurchmesser der Triebzahnäder gleich dem Laufkreisdurchmesser der Reibungsräder ist. (Abb. 624.) Praktisch läßt sich dies wegen der Abnützung der Radreifen nicht vollkommen erreichen. Man gibt daher den Laufrädern in neuem Zustande z. B. bei 700 mm Triebzahnrad Durchmesser einen um 5 bis 7 mm größeren Durchmesser und läßt eine Abnützung auf äußerst 695 mm zu. Im Neuzustand eilen die Reibungsräder also vor, später nach; der Arbeitsverlust ist hierbei jedoch gering.

Bei den neuen 400 pferdigen Trakteurs (Motorwagen) der Martigny—Châtelard-Bahn (Abb. 626) mit fest gekuppelten Reibungs- und Zahnrädern ist eine totale Abnützung der Laufraddurchmesser von 24 mm vorgesehen. Diese Wagen befördern auf 70‰ Reibungs- bzw. 200‰ Zahnbahnsteigung ein Bruttozugsgewicht von 77 t. Bei der Talfahrt wird zur Schonung der Radbandagen auf allen Gefällen nur die elektrische Kurzschlußbremse angewendet. Die direkt auf die Motorwellen wirkende Schnell-schlußbremse System Löw arbeitet unabhängig von der von Hand oder durch Druckluft zu betätigenden reinen Adhäsionsbremse und der kombinierten Reibungs- und Zahnradbremse, sowie der automatischen, auf die Zahntriebräder wirkenden Geschwindigkeitsbremse. Die elektromagnetische Schienenbremse dient als Notbremse.

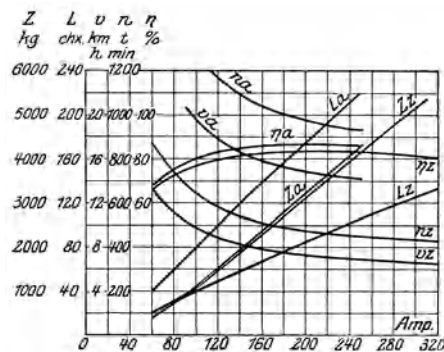


Abb. 626. Kennlinien des 100 PS-Motors der Martigny—Châtelard-Bahn.

Für die Rittnerbahn-Lokomotiven, die 16,5 t wiegen und mit 2 m/sek fahren, beträgt dieser Verlust bei einem Reibungskoeffizienten $\mu = 0,1$ höchstens 4,4 PS, d. s. 1,5‰ der Lokomotivleistung. Wäre der Verlust größer, so würde sich an den Radreifen eine hohe Abnützung einstellen, was nach langjähriger Betriebserfahrung nicht der Fall ist.

Um diesen Umstand zu vermeiden, kann man in den Antrieb der Reibungsachsen eine lösbare Kupplung einschalten und auf diese Weise in Zahnstangenstrecken die Reibung mitbenützen oder auf sie 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 gesamte vorhandene Motorleistung in beiden Betriebsbereichen voll ausgenützt werden kann. Einen Mangel bildet bei einigen Bahnen der

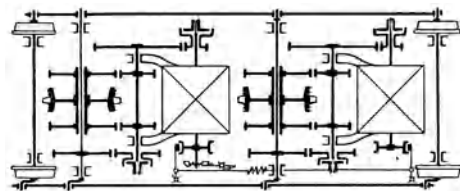


Abb. 627. Schema des Getriebes der Jungfraubahn. Lokomotiven Nr. 8 bis 10, Achsfolge B/b. Gemischter Betrieb mit zwei Geschwindigkeiten (BBC).

Umstand, daß in den Reibungsstrecken die höhere Geschwindigkeit nur in geringem Maße, etwa durch Feldschwächung, erzielt wird. (Granada, Barmen.)

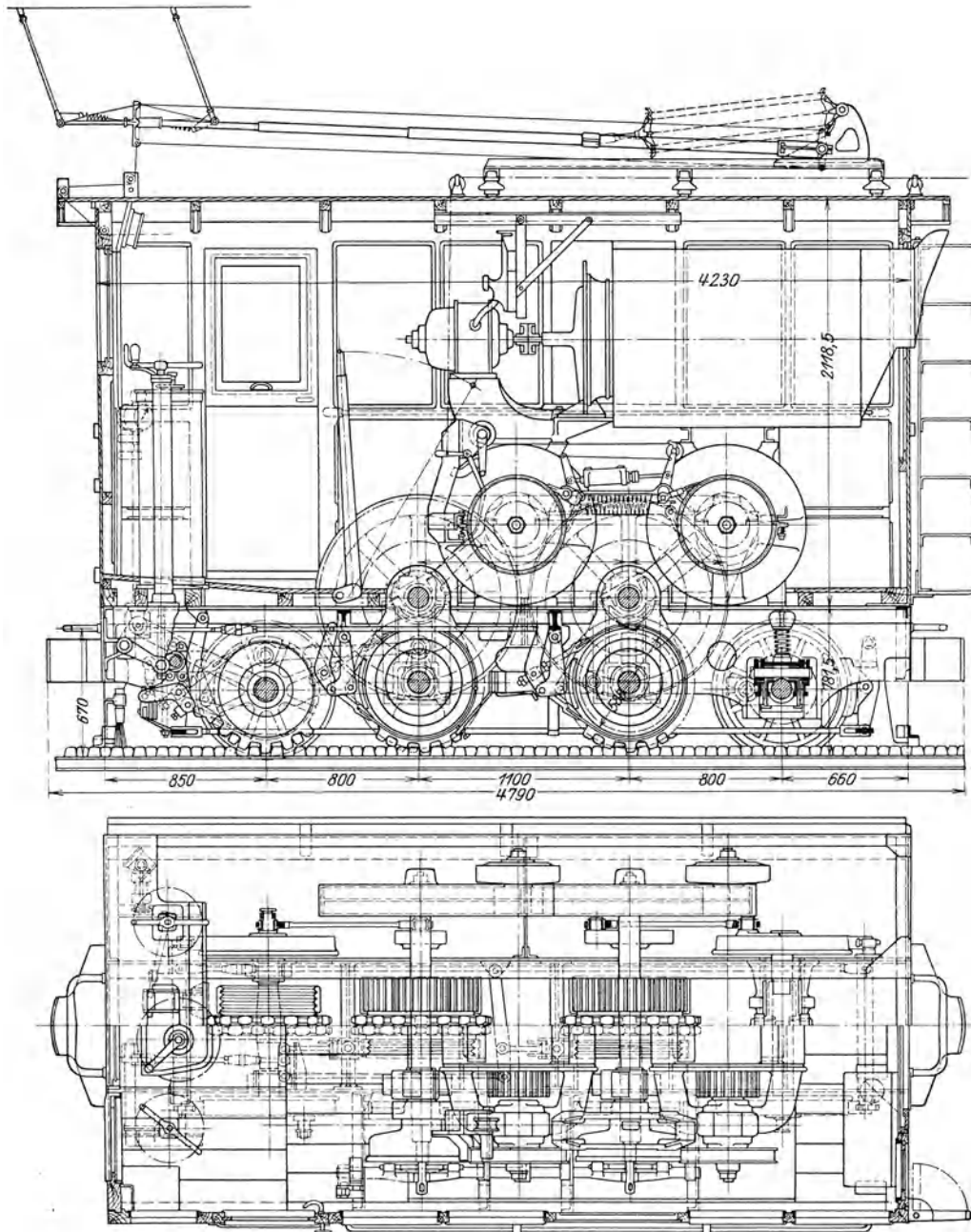


Abb. 628. Lokomotive der Zahnbahn Montreux—Glion. Gemischter Betrieb (MFO & SLMF).
 Achsfolge 2 A/2 a Leistung 2 × 110 PS
 Stromart GS 800 V Dienstgewicht 14,2 t

24. Bei Lokomotiven für gemischte Bahnen werden zur Erzielung eines zweckmäßigen zweiten Geschwindigkeitsbereiches die Reibungsachsen mit einer andern Übersetzung angetrieben als die Zahntriebachsen; auf der Zahnstrecke muß dieses Getriebe durch eine lösbare Kupplung abgeschaltet werden (Abb. 627, 628). 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.

Die Motorwagen mit zwei Geschwindigkeitsgebieten für Bahnen mit gemischtem Betrieb erhalten zwei voneinander unabhängige Motorgruppen.

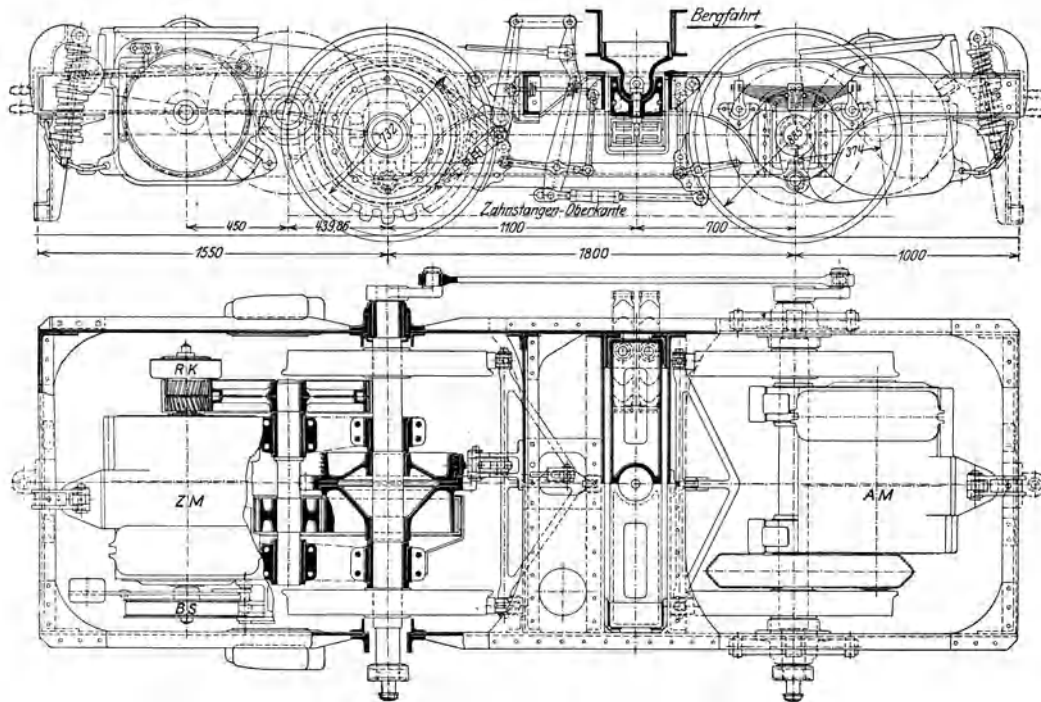


Abb. 629. Drehgestell, Achsfolge B/a des Triebwagens der Monthey—Champéry-Bahn (Alioth—SLFW).
 Leistung der Triebmaschinen 2 × 75 = 150 PS Fahrgeschwindigkeit auf den Reibungsstrecken 20 km/h
 Uml./min 500 Fahrgeschwindigkeit auf den Zahnstangenstrecken 10 km/h
 Größte Steigung 136‰

Die eine arbeitet mittels Rutschkupplung und doppelter Übersetzung auf das Triebzahnrad. Das Triebzahnrad sitzt einschließlich Bremsscheibe freilaufend auf einer Reibungsachse.

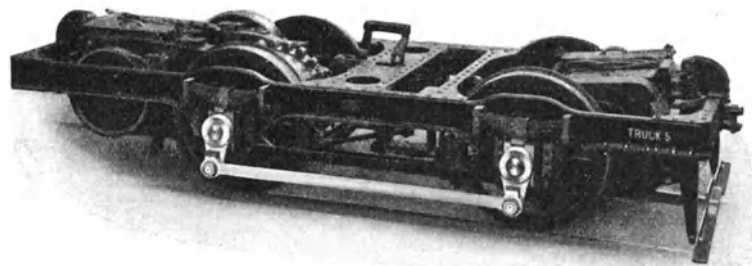


Abb. 630. Triebgestell B/a des Triebwagens der Monthey—Champéry-Bahn.

Die zweite Achse desselben Drehgestelles wird von einem zweiten Motor mit einfachem Vorgelege angetrieben. Da Bahnen im gebirgigen Gelände zweckmäßigerweise auch in den Reibungsstrecken die Neigungsgrenze ausnützen, wird diese Reibungsachse mit der anderen mechanisch gekuppelt (Abb. 629, 630).

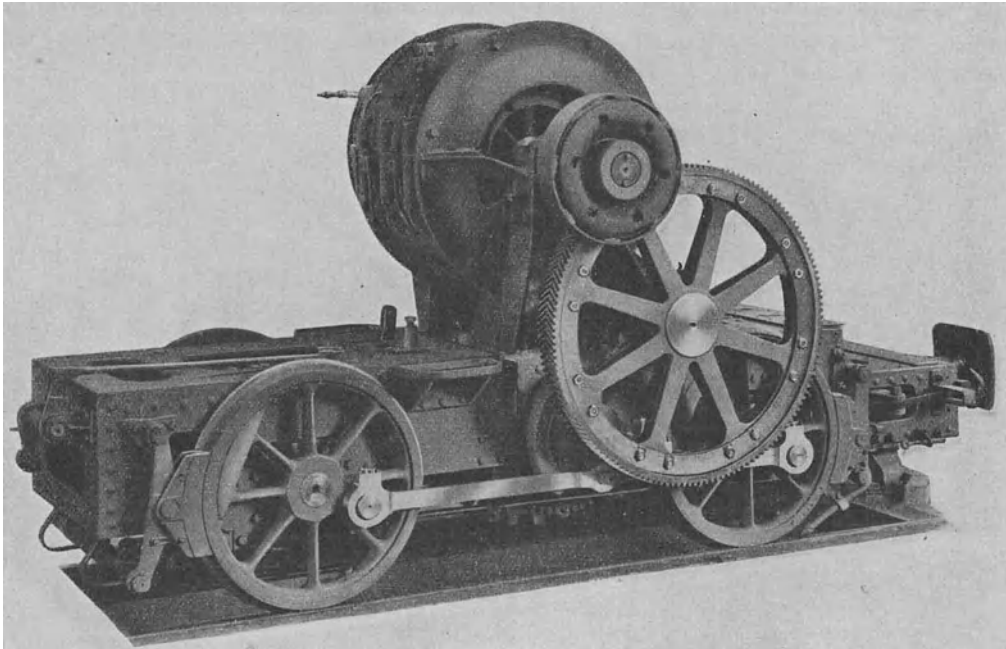


Abb. 631. Triebgestell der Leukerbad-Wagen (BBC).

Diese Anordnung leidet an dem Übelstand, daß die elektrische Ausrüstung verhältnismäßig schwer ist, indem gerade dort, wo die größte Leistung benötigt wird, die Reibungsmotoren nicht oder nicht ganz ausgenützt werden können.

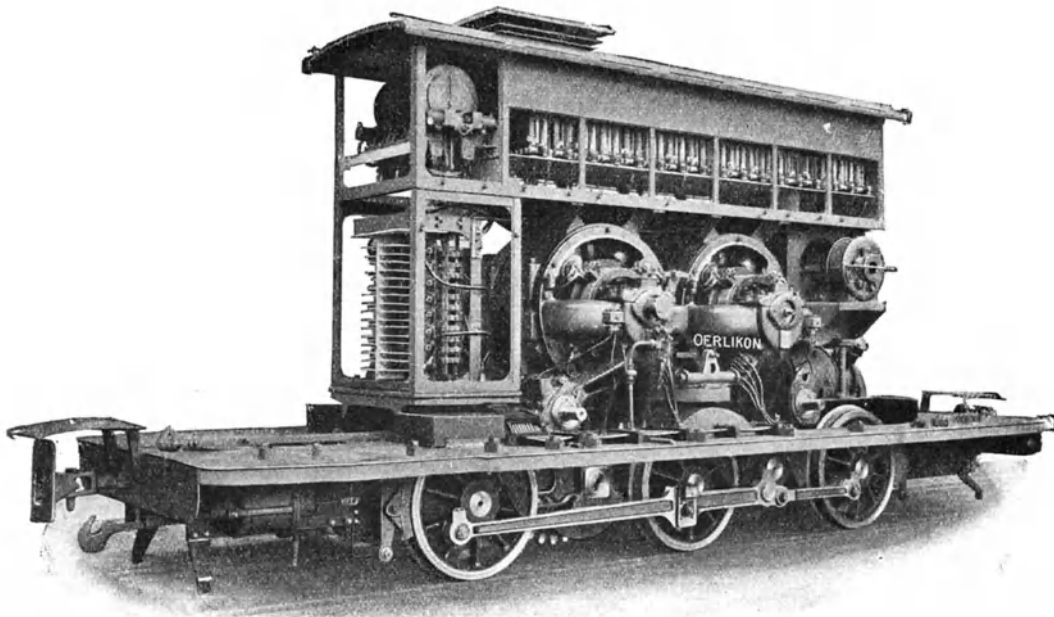


Abb. 632. Zahnrad-Lokomotive für gemischten Betrieb, Berner Oberland-Bahn (MFO).

Achsfolge	C/b	Leistung	2 × 400/250 PS
Spannung			1500 V

1915 in Betrieb gekommenen, gemischten Triebwagen der Leukerbad-Bahn haben die Zweckmäßigkeit der Anordnung von Gestellmotoren bei Motorwagen auch für den konstruktiv einfacheren, vertikalen Zahneingriff dargetan. Der seitliche Zahneingriff bietet indes auch bei hohen Steigungen volle Sicherheit gegen Entgleisen bei heftigen Bremsungen usw.; gleichzeitig besitzt dieses System gegenüber demjenigen mit vertikalem Zahneingriff eine weitaus größere Anpassungsfähigkeit an schwieriges Gelände; hierdurch läßt sich außer kürzerer Linie und entsprechend geringeren Landerwerbs-, Unter- und Oberbau- und Leitungskosten auch noch eine Herabminderung der kilometrischen Unterbaukosten erzielen. Zufolge der geringeren Tara der Triebfahrzeuge wird ferner allgemein der Stromverbrauch für den Betrieb und insbesondere die Spitzenbelastung des Werkes herabgesetzt.

25. Vollbahnverkehr. Für den Güterverkehr auf Vollbahnstrecken mit Steigungen, die noch die Verwendung von Fahrzeugen normaler Bauart gestatten (50 bis 70 ‰, äußerst 85 ‰), kommen nur Zahnbahnlokomotiven in Frage, deren Reibungsgewicht zur Ausübung der Zugkraft herangezogen wird. Sie sind für gemischten Betrieb ein-

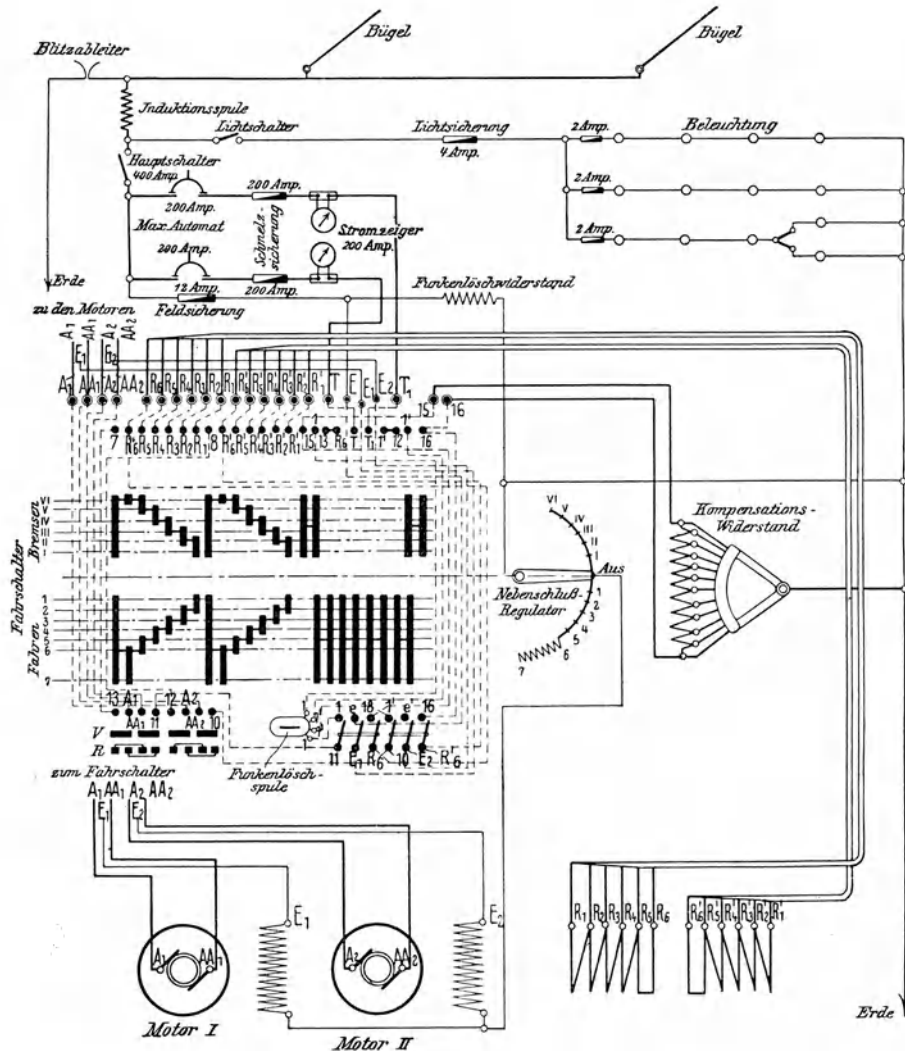


Abb. 634. Schaltbild einer Zahnbahn-Lokomotive der Rittnerbahn mit zwei nebeneinander geschalteten Nebenschlußmotoren. 2×150 PS, 750 Volt, unmittelbare Steuerung mit Ausgleichwiderstand (AEGU).

zurichten, da die Reibungskraft noch einen hohen Prozentsatz der gesamten Zugkraft ausmacht und werden, ähnlich wie bei den Dampflokomotiven, für jede Betriebsart mit einer von der anderen unabhängigen Antriebsmaschine ausgerüstet.

Beispiele hierfür bilden die schweren dreiachsigen Lokomotiven der Bahn Usui-Toge (Abb. 529) und der Berner Oberlandbahnen, Achsfolge C/b (Abb. 632).

Einer der beiden 350 PS-Hauptschlußmotoren der ersteren treibt mittels doppelter Übersetzung, senkrechter Triebstange und Kuppelstangen die drei Reibungsachsen an, der andere die beiden miteinander gekuppelten Triebzahnräder.

Diese Lokomotiven wiegen 42 t und entwickeln eine Zugkraft von insgesamt 10000 kg

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 Nutzbremung während der Talfahrt von Wert, weil sie die Mitnahme schwerer Widerstände, die meist auch noch künstlich gekühlt werden müssen, entbehrlich macht.

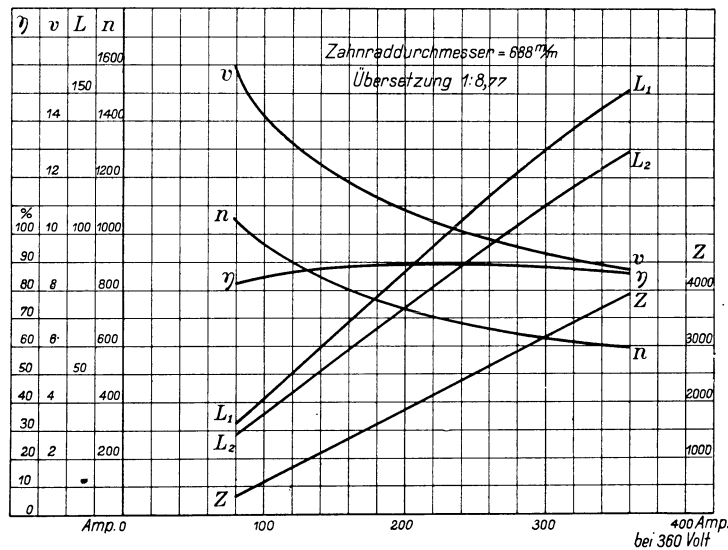


Abb. 635. Kennlinien des 110 PS-Reihenschlußmotors der Lokomotiven der Zahnbahn Montreux—Glion.

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, daß die für den Auftrieb zulässigen Verzögerungen nicht überschritten werden. Kurze Bremswege sind zu vermeiden.

Für Gleichstrom spricht der Umstand, daß durch Heranziehung einer Batterie der zurückgelieferte Strom stets Aufnahme finden kann.

Bei Drehstrom kann, wenn sich kein bergfahrender Zug auf der Strecke befindet, die ins Netz zurückgelieferte Energie talfahrender Züge im Kraftwerk große Tourenüberschreitungen der Turbinen oder Durchgehen derselben veranlassen. Es wurden deshalb s. Z. die Lokomotiven der Jungfraubahn mit Kurzschlußbremsung eingerichtet. Die Drehstrommotoren werden zu diesem Zwecke durch einen kleinen Gleichstromgenerator erregt.

Im Gleichstrombetrieb werden bei Spannungen bis 850 V Motoren und Felder parallel geschaltet (Abb. 634). 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 Entladespannung der Feldwicklung ist die magnetische Funkenlöschung unwirksam, der Feldstrom kann nicht im Kontroller geschaltet werden, sondern es ist hierfür ein eigener Hauptschalter mit Funkenzieher 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 schadhafte Motor dem anderen vorgeschaltet wird.

Auf die allgemeine Vorliebe für Reihenschlußmotoren ist es zurückzuführen, wenn trotz der Einfachheit der Nebenschlußschaltung vielfach Serienmotoren (Abb. 635) zur Anwendung gelangten, insbesondere bei höheren Betriebsspannungen (Abb. 636).

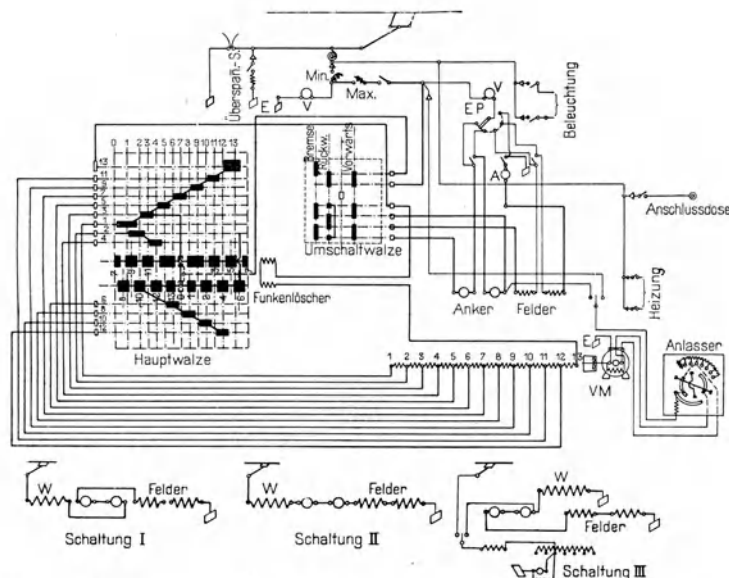


Abb. 636. Schaltplan der Zahnbahn-Lokomotive der Montreux-Glion-Bahn. Reihenschlußmotoren, dauernd zu zweit in Reihe geschaltet, Kurzschlußbremsung.

Die Talfahrt erfolgt dann mit Kurzschlußbremsung, wenn auch nach den neueren Ausführungen 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.

Diese Schwierigkeit wird vermieden, wenn man im Nebenschlußfeld eine Fremderregung mit abfallender Charakteristik anwendet.

Nach diesem Grundsatz sind die Lokomotiven für den Erzberg (Steiermark) gebaut worden (Abb. 184).

27. Elektrische Nebeneinrichtungen. Zur Steuerung der Motoren dienen die auch sonst gebräuchlichen Fahrschalter, Widerstände usw. Bei einigen Bahnen erfolgt die Steuerung der Hauptschaltapparate und die Betätigung der Bremsen wahlweise auch durch Druckluft. Zur Stromabnahme verwendet man meist Bügel, Pantographen, Löffel und Schuhe, ausnahmsweise auch dritte Schiene (Vernayaz—Châtelard).

Es wird meist nur ein Führerstand vorgesehen, der, da er einen verhältnismäßig wenig belasteten Teil der Lokomotive bildet, am talseitigen Ende angeordnet wird.

Der Aufbau hat fast überall eine reine Kastenform erhalten.

28. Vorausberechnung der Lokomotivleistung und der Lokomotivgewichte. Das Eigengewicht der Lokomotive erreicht insbesondere bei steilen Zahnbahnen einen beträchtlichen Anteil des Zugsgewichtes; es ist somit für die Hebung dieses Totgewichtes ein verhältnismäßig großer Aufwand an Arbeit nötig, wenn auch die ausgeführten Lokomotiven im allgemeinen eine gute Baustoffwirtschaft aufweisen.

Drehstromlokomotiven für reine Zahnbahnen sind verhältnismäßig am leichtesten; sie haben ein Gewicht von $q = 45$ bis 67 kg/PS (dauernd), im Mittel 59 kg/PS.

Gleichstrommaschinen, insbesondere für Hochspannung (1000 V), sind schwerer, $q = 54$ bis 67 kg/PS, im Mittel $65,0$ kg.

An Hand dieser Hilfwerte läßt sich die Leistung L PS, für welche eine Zahnbahnlokomotive bei gegebenem Zugsgewicht G t, v km/h Fahrgeschwindigkeit und einem Eigengewicht Q t auszulegen ist, berechnen.

Die Leistung ist

$$L = \frac{Zv}{270} \text{ PS.}$$

Die zulässige Fahrgeschwindigkeit in m/sek ist bei Meterspurbahnen angenähert

$$v = 12 - 0,1 s$$

für Reibungstrecken, und

$$v = \frac{500}{s}$$

für Zahnstrecken, wobei s die Bahnneigung in ‰ bezeichnet.

Im Beharrungszustand ist die der Dauerleistung entsprechende 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 folgt

$$L = \frac{G(w_z + s)}{\frac{270}{v} - \frac{q}{1000}(w_L + s)}.$$

Es kommen hier verhältnismäßig hohe Werte von s gegenüber w in Betracht; da weiters 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

$$w_L + s \cong w_z + s$$

zu setzen. Das Lokomotivgewicht kann wie früher durch die geschobene Zuglast ausgedrückt werden:

$$n = \frac{G}{Q}.$$

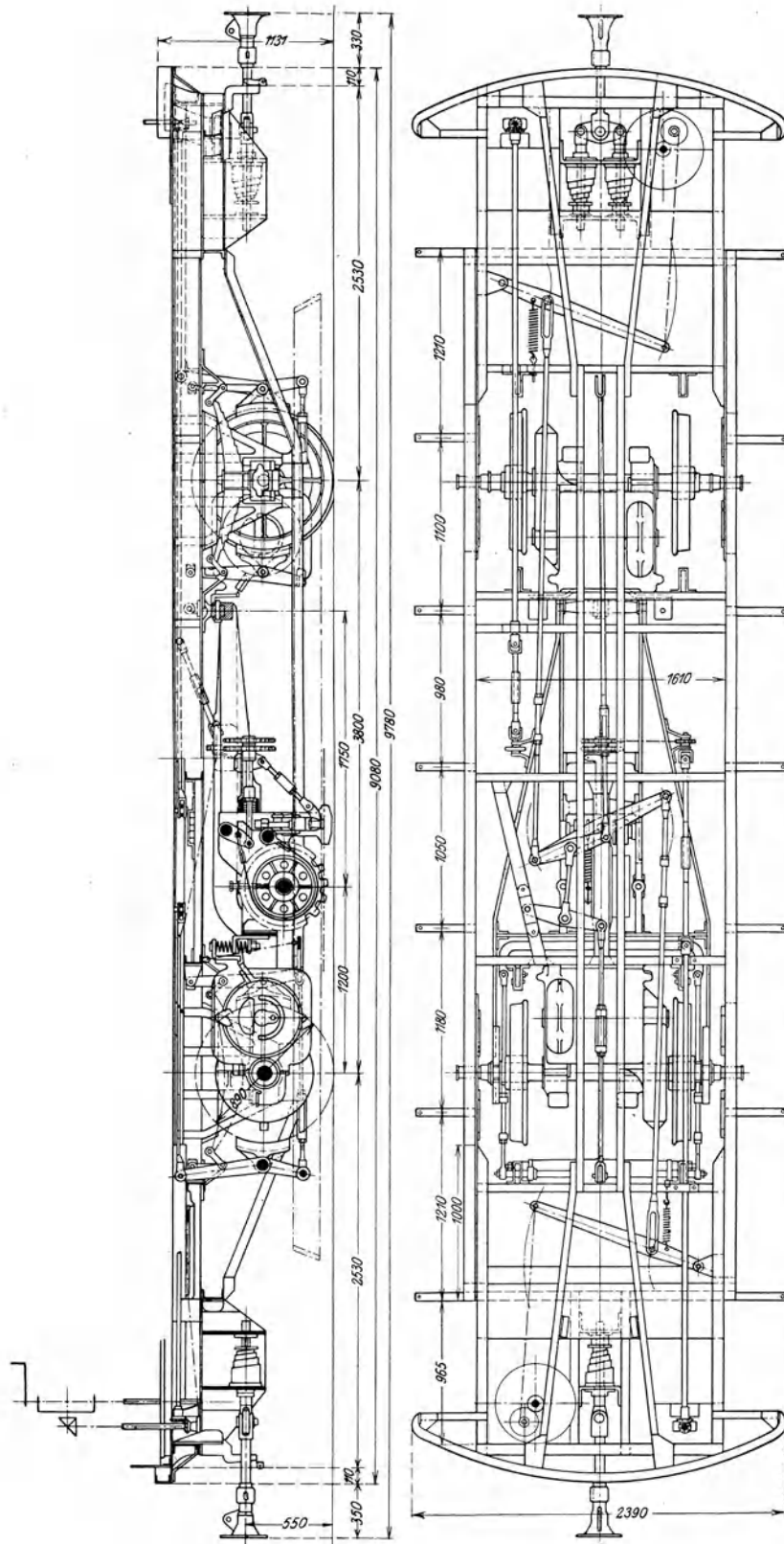


Abb. 637. Untergestell eines zweiachsigen Triebwagens mit Lenkachsen der Zahnbahn auf den Ritten (Bozen—Oberbozen, AEGU).

Substituiert man hierin die aus obigen Beziehungen folgenden Werte von G und Q , so wird

$$n = \frac{270 \cdot 1000}{q v (s + w)} - 1.$$

In die zur nomographischen Darstellung geeignete Form

$$\frac{n + 1}{\frac{270}{q}} = \frac{1000}{v (s + w)}$$

überführt, kann dieses Ergebnis zugleich in dem für die Standsicherheit einer Zahnradlokomotive erstellten Nomogramm (Abb. 597) zur Darstellung gelangen.

Durch diese Ergänzung findet die sich aus dem erforderlichen Materialaufwand ergebende Einschränkung Berücksichtigung.

Für $s = 250\%$, $w_L = 15$, $w_z = 5$, $v = 7,5$ und $q = 60$ kg/PS findet man z. B., 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.

Bei den gemischten Lokomotiven der Jungfraubahn sind die bergseitigen Puffer so abgeschrägt, daß der sich auf den Puffer abstützende Zug eine Mehrbelastung der bergseitigen Lokomotivachse ergibt.

Da des weiteren für Steilbahnen allgemein der Grundsatz angenommen ist, die einzelnen Fahrzeuge nicht miteinander 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 mit gemischtem Betrieb.

Sind die Motorwagen vierachsig, so kann in jedem Drehgestell eine Achse mit einem freilaufenden Bremszahnrad, die zweite mit je einem Motor ausgerüstet werden. Braucht man das Reibungsgewicht aller Achsen, so kann man die beiden Achsen eines Gestelles kuppeln (Martigny—Châtelard).

Bei den zweiachsigen Motorwagen für gemischten Betrieb der Triest—Opčina- und Rittnerbahn (Abb. 637) hat man sich so geholfen, daß man das Bremszahnrad in einem gabelartigen Rahmen in der Nähe der unteren Achse lagerte. Der Gabelrahmen ruht bergseitig ungefedert auf der Achse, talseitig gefedert auf dem Gestellrahmen. Zur Begrenzung des Auftriebes trägt dieser Rahmen eine in unmittelbarer Nähe des Bremsrades angeordnete Zange. Hierdurch wird die durch den Auftrieb verursachte Entlastung möglichst auf die mehrbelastete Talachse verlegt.

Bei Gliederwagen, die mit der Lokomotive ein untrennbares Ganzes bilden, kann eine besondere Bremse am Kuppelwagen entbehrt werden; hierdurch werden diese Fahrzeuge betriebswirtschaftlich vorteilhaft.

II. Standseilbahnen.

Abt: Seilbahnen. Bd. 8, V. Teil. Hb. der Ingenieurwissenschaften Leipzig: Engelmann 1906.

Dolezalek: Seilbahnen. Rölls Enzyklopädie. 2. Aufl.

Fadda: Tramvie e ferrovie funicolari. Torino.

Lévy-Lambert: Chemins de fer funiculaires. Transports aériens. Paris: Gauthier Villars 1910.

Strub: Bergbahnen der Schweiz bis 1900. I. Drahtseilbahnen. Wiesbaden: Bergmann 1900.

Walloth: Die Drahtseilbahnen der Schweiz. Wiesbaden: Kreidel 1893.

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 wagrechtem Längsschnitt vor Augen hält. Die letztere weist betriebstechnisch die denkbar größte Freizügigkeit auf, indem die Zuglasten und Geschwindigkeiten verhältnismäßig am weitesten geändert werden können. Die Hin- und Rückfahrten der Züge sind voneinander vollständig unabhängig, der Kraftaufwand in beiden Richtungen gleich groß.

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

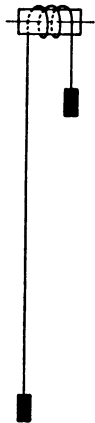


Abb. 638. Schema einer Drahtseilbahn mit Pendelbetrieb und offenem Seil.

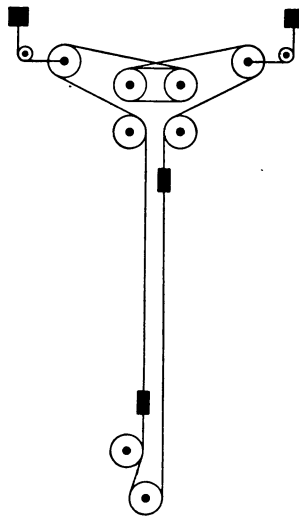


Abb. 639. Seilführung für eine Seilbahn mit Pendelbetrieb, mit geschlossenem Zugseil (Vesuv).

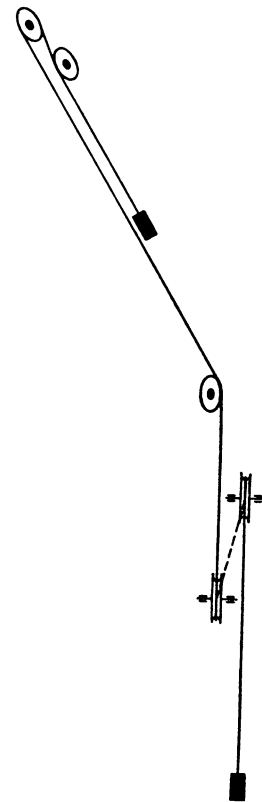


Abb. 640. Seilführung für eine Drahtseilbahn mit zwei Teilstrecken und in der Bahnmitte angeordnetem Windwerk (Salvatore).

Triebzahnades, wie dies bei Zahnbahnen der Fall ist. Mit dieser Betriebsart können die verhältnismäßig größten Steigungen — ausgeführt bis 878‰ — überwunden werden. Der Betrieb ist so wirtschaftlich als irgend möglich, indem die Arbeit des zu Tale fahrenden Zuges zur Hebung des bergfahrenden ausgenützt 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, so 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 Pendel- oder Doppelbetrieb und offenem Seil voraus, bei welchen die beiden gegenläufigen Fahrzeuge an je einem Seilende befestigt sind. Das Seil ist über eine

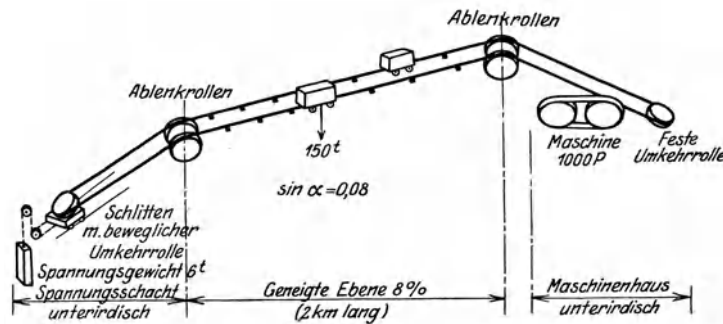


Abb. 641. Schema der Seilführung der Serrabahn, Brasilien.

am oberen Bahnende befindliche Winde geführt, die heute meist durch einen Elektromotor angetrieben wird (Abb. 638). Ist es aus örtlichen Gründen nicht möglich oder nicht erwünscht, das Windwerk am oberen Ende anzuordnen, so kann dasselbe auch am unteren Ende (Vesuv) (Abb. 639) oder in der Mitte (M. Salvatore) (Abb. 640) angeordnet werden, in welchen Fällen für eine entsprechende Seilführung und evtl. Nachspannung des Seiles zu sorgen ist, letzteres dann, wenn der Seiltrieb ein geschlossener ist.

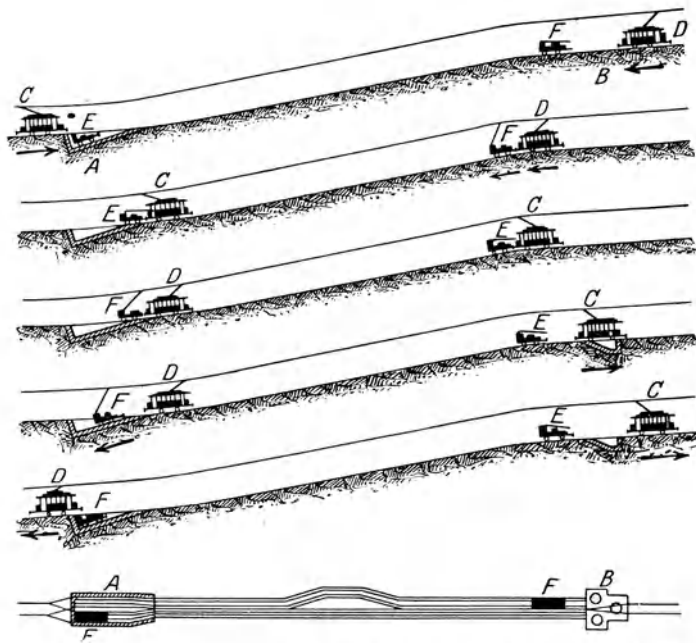


Abb. 642. Betriebsschema der Seilrampe Palermo—Monreale.

Ein Beispiel für Pendelbetrieb mit geschlossenem Seil stellt die Serrabahn in Brasilien dar. (Abb. 641.) Bei dieser werden in vier 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, wo er an das ruhende Drahtseil gekuppelt wird. Sobald dies an beiden Enden einer Seiltriebstrasse erfolgt ist, wird die Antriebsmaschine des Windwerkes in Bewegung gesetzt. Die Serrabahn hat Dampftrieb, doch könnte dieses System auch für elektrischen Betrieb vorgesehen werden.

Weiters kann der Motorantrieb auf einem oder, wechselweise betätigt, auf beiden Fahrzeugen angeordnet werden, wie bei der Seilbahn Palermo—Monreale (Abb. 642). 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 passendenfalls 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 hinaufschoben.

3. Wasserballast- und motorischer Antrieb. Bei dem grundsätzlichen Anteil der Schwerkraft an der Zugbewegung ist die Gestaltung des Längenprofils für den Kraftbedarf, richtiger die Größe 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 und mit bloß einer Umlenkrolle am oberen Bahnende wird zur Einleitung der Bewegung dem talwärtsfahrenden Wagen ein Übergewicht durch Wasserballast erteilt.

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 gleich langer Seilstücke gleich sind, nachgewiesen, daß die Längenprofilkurve für unveränderliche Zugkraft eine Parabel sein muß. Hauer, de la Goupillière, Reckenschuß u. a. leiteten unter gleichen Bedingungen die Zykloide als theoretisches Profil ab. Die vorhandene Bodengestaltung wird allerdings in den meisten Fällen nicht gestatten, das theoretische Längenprofil streng einzuhalten.

Wasserballastbahnen müssen stets eine den durchschnittlichen Bedarf übersteigende Wasserüberlast 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 gegen Seilbruch vorgesorgt werden muß, werden die Wasserballastbahnen stets mit einer Zahnstange ausgerüstet, in welche ein Bremszahnrad eingreift. Die selbsttätigen Wagenbremsen für Wasserballastbahnen sind insbesondere von Pauli und Ruprecht ausgebildet worden.

Bei dieser Betriebsart wird die Fahrt von dem jeweils talfährenden Wagen aus geregelt, zum Unterschied von motorisch angetriebenen Bahnen, deren Steuerung im allgemeinen durch den Windwerkantrieb erfolgt.

4. Linienführung und Betriebssystem. Dieser grundsätzliche Unterschied zwischen Wasserballast- und Motorantrieb ist auf die zulässige Gestaltung des Längenprofils,

des Unter- und Oberbaues der Seilbahnen beider Betriebsarten von entscheidendem Einfluß.

Je länger die Strecke, um so 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 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 Bruttogewicht von 17 t, d. s. 340 kg je Sitzplatz, das ist etwa das doppelte Gewicht, das die Wagen von Motorbahnen bei gleichem Fassungsraum aufweisen. Motorbahnen sind mit Betriebslängen bis zu 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 der Bahnlänge und der erforderlichen Leistung unterteilt man die zu bewältigende Strecke in mehrere Teilstücke, die dann meist als selbständige Seilbahnen, jede mit eigenem Windwerk, betrieben werden.

Letzteres kann vermieden werden, indem beispielsweise eine Verdoppelung der Leistung in der Weise erzielt wird, daß am Zugseil in der Entfernung der halben Bahnlänge je ein Wagen, insgesamt also deren vier, angehängt werden, die nur über die halbe Strecke pendeln (Abb. 643). Es sind dann drei Ausweichen vorzusehen; in der Bahnmitte wird umgestiegen. Diese Lösung gestattet, das Seil entsprechend den Höchstbeanspruchungen in den zwei Teilstrecken mit verschiedenen Gewichten auszuführen. Die Seilbefestigung an den Wagen ist so eingerichtet, 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 an Baukosten steht der geringfügige Nachteil gegenüber, daß die Wagen in der Wechselstation nicht in der gleichen Höhe halten. Seefehlner wendet diese Konstruktion für eine Arbeitertransportbahn am Erzberg an.

Die Anwendung der Bremszahnstange bei Wasserballastwagen zwingt nicht zur Vermeidung von Gleisekreuzungen. Bahnen dieser Betriebsart wurden aber oft in zwei voneinander unabhängigen Fahrbahnen in der vier- und dreischiebigen Anordnung ausgeführt. Verschiedentlich legte man die Gleise unterhalb der Ausweiche zusammen.

Die ersten Bahnen waren vierschiebig (Abb. 644 *b*), später mit einer Verschlingung der Gleisachsen in der unteren Bahnhälfte, um an Unterbaubreite zu sparen (*d*).

Die dreischiebige Anordnung (*e*) ist den beiden ersteren vorzuziehen, weil die Anordnung der Zahnstange eine günstigere ist. Einen weiteren Schritt bildete die Verschlingung der Gleisachsen in der untern und obren Bahnhälfte (*f*).

Hierauf folgt die erste zweischiebige Gießbach-Wasserlastbahn mit automatischer Ausweichung nach Abt und die erste elektrisch betriebene, zweischiebige Bürgenstockbahn (*c c*).

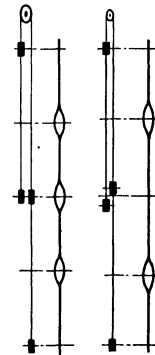


Abb. 643. Schemata von Seilbahnen für Pendelbetrieb mit vier Wagen in zwei Teilstrecken und einem Windwerk.

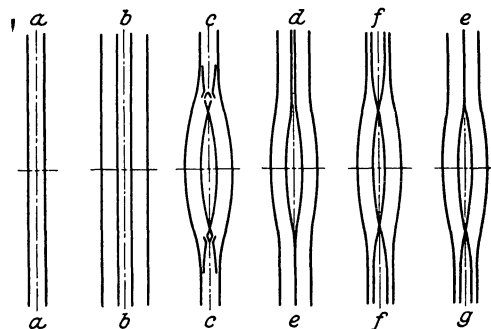


Abb. 644. Schema der Gleisführung.

Zur Zeit findet für Motorwagen fast ausschließlich der eingeleisige Bahnkörper (a) mit selbsttätiger Ausweiche (c) ohne Zahnstange Verwendung, wobei der keilförmig gestaltete Schienenkopf nach Bucher durch eine Bremszange gefaßt wird. Diese Ausweiche setzt voraus, daß die beiden äußeren, nicht unterbrochenen Schienenstränge 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 in der Ausweiche stoßfrei überfahren zu können.

5. Oberbausysteme. Seit Erbauung der Stanserhornbahn hat für motorische Drahtseilbahnen fast nur mehr die neuere Keilkopfschiene (Abb. 645) der Rollschen

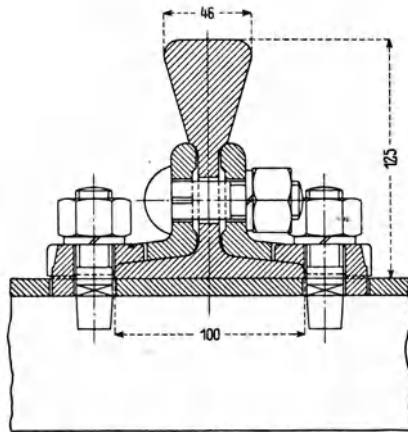


Abb. 645. Keilkopfschiene für Zangenbremsung.

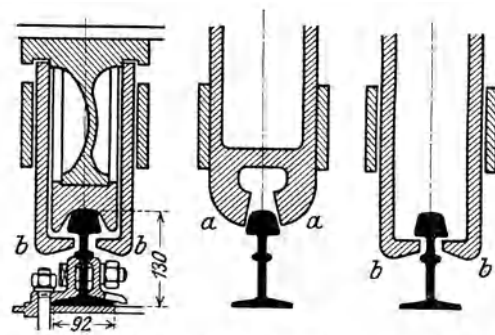


Abb. 646. Druckkopf-Seilbahnschiene und -Zange, Bauart Esslingen.

Eisenwerke in Bern Verwendung gefunden. Diese ist 26,8 kg/m schwer, 125 mm hoch und zur Bremsung mittels Zange geeignet.

Für leichtere Bahnen entspricht diesem Zweck auch eine gewöhnliche Vignolschiene mit vertikalen oder etwas schräge liegenden Flanken (Drahtseilbahn Tarajka, Asakumayama, Erzberg, Fürigen).

In Italien hat u. a. für die Seilbahnen Palermo—Monreale und Capri die sogenannte Eßlinger-Schiene Anwendung gefunden (Abb. 646).

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.

6. Das Längenprofil (Höhenplan). Der Bewegungsvorgang bei Bahnen mit Wasserballastbetrieb wird von der Gestaltung des Höhenplanes bestimmt.

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 (Gleichgewichtsprofil).

Die zu leistende Arbeit ist bei gegebenem Höhenunterschied theoretisch in allen Fällen die gleichen, der eventuelle Mehraufwand an Reibungsarbeit auf einer längeren Strecke kommt bei den geringen Längenunterschieden nicht in Betracht — ein Mehr-

verbrauch 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.

Deshalb lohnt es sich oft nicht, beim Bau von Motorbahnen etwa durch kostspielige Kunstbauten den theoretischen Höhenplan zu verwirklichen. Da diesem jedoch die günstigsten Betriebsverhältnisse 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 der Linienführung anzustreben ist.

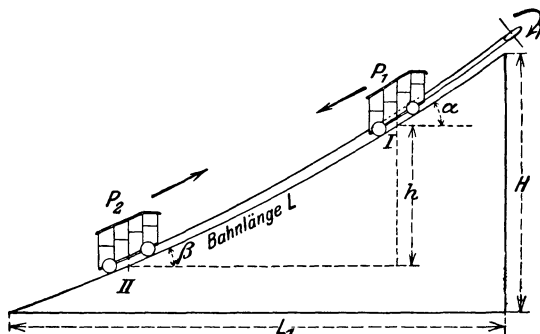


Abb. 647. Korrespondierende Wagenstellungen.

7. Das theoretische Längenprofil für unveränderliche Zugkraft. Das theoretische Profil für unveränderliche Zugkraft und, da die Geschwindigkeit konstant ist, für unveränderliche Leistung, läßt sich auf Grund des Gleichgewichtszustandes für einen bestimmten Belastungsfall wohl am einfachsten nach folgender, vom Verfasser aufgestellten Ableitung berechnen:

Es sei:

- P_1 das Gewicht des talwärts fahrenden Wagens in kg,
- P_2 das Gewicht des bergwärts fahrenden Wagens in kg,
- p das Gewicht des Zugseils in kg/m,
- h der Höhenunterschied der Wagenstellungen I und II in m,
- l der in der Neigung gemessene Abstand der Wagen in m,
- l_1 der in der Horizontalen gemessene Abstand der Wagen in m,
- H der Höhenunterschied der Bahnenden in m,
- L die in der Neigung gemessene ganze Bahnlänge in m,
- L_1 die in der Horizontalen gemessene ganze Bahnlänge in m,
- α die Bahnneigung am oberen Wagen,
- β die Bahnneigung am unteren Wagen,
- r der Rollwiderstandskoeffizient der Wagen (0,003 bis 0,008),
- R der Seilleitungswiderstand in kg,
- γ die Bahnneigung in der Ausweichmitte,
- τ die Bahnneigung in einem allgemeinen Punkt mit den Koordinaten x, y ,
- K die am Seiltriebrad wirkende Kraft in kg,
- $W = (P_1 + P_2)r + R$ der gesamte Bahnwiderstand, der genügend genau als konstant angenommen werden kann,

dann gilt bei Bergfahrt des Wagens P_2 vom unteren Bahnende (Abb. 647, II)

$$P_2 \sin \beta - P_1 \sin \alpha + p h = K - W, \dots \dots \dots (1)$$

für die korrespondierende Wagenstellung I

$$P_2 \sin \alpha - P_1 \sin \beta - p h = K - W \dots \dots \dots (2)$$

und für die Wagenkreuzungsstelle in der Ausweichmitte

$$(P_2 - P_1) \sin \gamma = K - W. \quad \dots \quad (3)$$

Hieraus folgt

$$(P_2 - P_1)(\sin \alpha + \sin \beta) = 2(K - W) \quad \dots \quad (4)$$

$$(P_2 + P_1)(\sin \alpha - \sin \beta) = 2 p h \quad \dots \quad (5)$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{2(K - W)}{P_2 - P_1} = 2 \sin \gamma \quad \dots \quad (4')$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = \frac{2 p h}{P_2 + P_1} \quad \dots \quad (5')$$

Die Multiplikation der Gl. (4) und (5) liefert

$$h = \frac{P_2^2 - P_1^2}{4 p (K - W)} (\sin^2 \alpha - \sin^2 \beta) = p (y_1 - y_2), \quad \dots \quad (6)$$

woraus als allgemeine Gleichung des Bahnprofils folgt

$$\boxed{y = \frac{P_2^2 - P_1^2}{4 p (K - W)} \sin^2 \tau}, \quad \dots \quad (7)$$

Die durch diese Gleichung bestimmte Kurve ist eine Zykloide mit dem Rollkreisdurchmesser

$$c = \frac{P_2^2 - P_1^2}{4 p (K - W)} = \frac{P_2 + P_1}{4 p \sin \gamma} \quad \dots \quad (8)$$

Für diese folgt, wenn man die Integrationskonstante gleich Null werden läßt,

$$x = \int \cos \tau ds = 2 c \int \cos^2 \tau d\tau = c(\tau + \sin \tau \cos \tau) \quad \dots \quad (9)$$

ferner die Bogenlänge ab Scheitel

$$s = \int \frac{dy}{\sin \tau} = 2 c \int \cos \tau d\tau = 2 c \sin \tau \quad \dots \quad (10)$$

und der Krümmungsradius

$$\rho = \frac{ds}{d\tau} = 2 c \cos \tau \quad \dots \quad (11)$$

Aus Gl. (4') und (5') ergibt sich, wenn nun die Endneigungen der Bahn mit α und β bezeichnet werden,

$$\sin \alpha = \frac{K - W}{P_2 - P_1} + \frac{p H}{P_2 + P_1} \quad \dots \quad (12)$$

$$\sin \beta = \frac{K - W}{P_2 - P_1} - \frac{p H}{P_2 + P_1} \quad \dots \quad (13)$$

Für die in der Neigung gemessene Bahnlänge L folgt aus Gl. (7), (9) und (4')

$$L = \frac{H}{\sin \gamma} = \frac{2 H}{\sin \alpha + \sin \beta} = H \cdot \frac{P_2 - P_1}{K - W} = 2 c \cdot \frac{p H}{P_2 - P_1} \quad \dots \quad (14)$$

und

$$\frac{H}{L_1} = \frac{\sin^2 \alpha - \sin^2 \beta}{\alpha - \beta + \sin \alpha \cos \alpha - \sin \beta \cos \beta} = \frac{\cos^2 \beta - \cos^2 \alpha}{2\alpha - 2\beta + \sin 2\alpha - \sin 2\beta} \quad \dots (15)$$

Führt man

$$W = (P_2 + P_1)r + R$$

ein, so erhält man aus Gl. (3)

$$(P_2 - P_1) \sin \gamma = (P_2 - P_1) \frac{H}{L} = K - [(P_2 + P_1)r + R]$$

oder

$$P_2 = \frac{P_1(\sin \gamma - r) + (K - R)}{\sin \gamma + r}$$

bzw.

$$P_1 = \frac{P_2(\sin \gamma + r) - (K - R)}{\sin \gamma - r}$$

und durch Einsetzen in Gl. (5')

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2pH \frac{\sin \gamma - r}{2P_2 \sin \gamma - (K - R)} = 2pH \frac{\sin \gamma - r}{2P_1 \sin \gamma + (K - R)} \quad \dots (14')$$

Die genaue Bestimmung aller Unbekannten erfordert demnach bei gegebener horizontaler Bahnlänge L_1 und Höhenüberwindung H Näherungsrechnungen. Diese können für alle praktischen Zwecke umgangen werden, wenn man berücksichtigt, daß die Neigung γ in der Mitte der schiefen Bahnlänge (Ausweichmitte) sehr nahe gleich ist der Neigung der Verbindungslinie der beiden Bahndpunkte.

Der Rechnungsvorgang sei an einem Beispiel dargestellt.

Es sei

- $P_1 = 7000$ kg das Gewicht des leer talwärts fahrenden Wagens,
- $P_2 = 11500$ kg das Gewicht des belastet bergwärts fahrenden Wagens,
- $W = 410$ kg die gesamten Bahnwiderstände,
- $L = 800$ m horizontale Bahnlänge,
- $H = 360$ m Höhenüberwindung,
- $p = 3,5$ kg/m Seilgewicht,

dann folgt:

$$\operatorname{tg} \gamma \cong \frac{H}{L_1} \cong \frac{360}{800} \cong 0,45^1),$$

somit

$$\sin \gamma \cong 0,410;$$

ferner nach Gl. (3) die Zugkraft des Windwerkmotors am Seilscheibenumfang

$$K = W + (P_2 - P_1) \sin \gamma = 410 + 4500 \cdot 0,410 = 2255 \text{ kg,}$$

$$c = \frac{(P_2 - P_1)(P_2 + P_1)}{4p(K - W)} = \frac{4500 \cdot 18500}{14 \cdot 1845} = 3223 \text{ m Rollkreisdurchmesser der Zykloide,}$$

$$\sin \alpha = \sin \gamma + \frac{pH}{P_2 + P_1} = 0,410 = \frac{3,5 \cdot 360}{18500} = 0,41 + 0,0681 = 0,4781,$$

$$\sin \beta = \sin \gamma - \frac{pH}{P_2 + P_1} = 0,410 - 0,0681 = 0,3419,$$

¹⁾ Bei der Zykloide ist in Bahnmitte genau $\operatorname{tg} \gamma = 0,4497$.

hieraus folgt

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,544,$$

$$\operatorname{tg} \beta = 0,364,$$

und als Gleichung des Zykloidenprofiles

$$y = c \sin^2 \tau = 3223 \sin^2 \tau.$$

Für $v = 1,80$ m/sek ergibt sich als Leistung des Windwerkmotors

$$N_{\text{PS}} = \frac{K \cdot v}{75} = \frac{2255 \cdot 1,8}{75} = 54,12 \text{ PS.}$$

Soll im allgemeinen Fall mit der Bahngleichung

$$y = \frac{P_2^2 - P_1^2}{4 p (K - W)} \sin^2 \tau = c \sin^2 \tau$$

die Motorkraft $K = 0$ sein, so folgt als Bedingung

$$P_2 - P_1 = \frac{W}{\sin \gamma};$$

in diesem Fall wird die Bahngleichung

$$y = \frac{P_2^2 - P_1^2}{4 p W} \sin^2 \tau. \dots \dots \dots (7')$$

Wenn die Motorkraft K gerade gleich den Bahnwiderständen W ist, muß nach Gl. (3) sein

$$P_1 = P_2 = P,$$

daraus ergibt sich nach Gl. (1)

$$P(\sin \alpha - \sin \beta) = p H = p (y_1 - y_2);$$

welcher Bedingung auch die Bahnkurve

$$y = \frac{P}{p} \sin^2 \tau = c_2 \sin^2 \tau, \dots \dots \dots (16)$$

also eine Traktrix mit der konstanten Tangentenlänge

$$c_2 = \frac{P}{p}$$

entspricht. Die weiteren Parametergleichungen dieser Kurve sind

$$x = \int \cos \tau ds = c_2 \int \frac{\cos^2 \tau}{\sin \tau} d\tau = c_2 \left(\cos \tau + \operatorname{lg} \operatorname{tg} \frac{\tau}{2} \right)$$

$$s = \int \frac{dy}{\sin \tau} = c_2 \int \operatorname{cotg} \tau d\tau = c_2 \operatorname{lg} \sin \tau$$

$$\varrho = \frac{ds}{d\tau} = c_2 \operatorname{cotg} \tau.$$

Von den für die Zykloide als Gleichgewichtsprofil mathematisch in Betracht fallenden Näherungskurven ist nach den eingehenden Untersuchungen des Verfassers die praktisch brauchbarste und genügend genaue Ersatzkurve die Planparabel mit der Scheiteltgleichung

$$y = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{2 L_1} x^2. \dots \dots \dots (17)$$

nach Abb. 648 für Gleichgewicht des Bogens OP

$$T_0 \cos \beta - T \cos \alpha = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$T_0 \sin \beta - T \sin \alpha + pL = 0, \quad \dots \dots \dots (2)$$

und wenn man

$$T_0 = p t_0$$

$$T = p t$$

setzt,

$$t_0 \cos \beta - t \cos \alpha = 0 \quad \dots \dots \dots (1')$$

$$t_0 \sin \beta - t \sin \alpha + L = 0, \quad \dots \dots \dots (2')$$

hieraus

$$L = t \sin \alpha - t_0 \sin \beta;$$

da nach Gl. (1)

$$t = t_0 \frac{\cos \beta}{\cos \alpha},$$

wird der Bogen OP

$$L = t_0 \cos \beta (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) = a (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta), \quad \dots \dots \dots (3)$$

und, da $dx = \cos \tau \cdot ds$, folgt für den Punkt P

$$x = t_0 \cos \beta \left[\operatorname{lgn} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} \right) - \operatorname{lgn} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} \right) \right] = a \operatorname{lgn} \frac{\operatorname{tg} \alpha + \sec \alpha}{\operatorname{tg} \beta + \sec \beta}, \quad \dots \dots (4)$$

$$y = t \cos \beta (\sec \alpha - \sec \beta) = a (\sec \alpha - \sec \beta), \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\rho = \frac{ds}{d\alpha} = t \frac{\cos \beta}{\cos^2 \alpha} = a \sec^2 \alpha = \frac{t}{\cos \alpha}. \quad \dots \dots \dots (6)$$

Aus Gl. (4) hat man als allgemeine Gleichung der Kettenlinie

$$x = a \operatorname{lgn} (\sec \tau + \operatorname{tg} \tau), \quad \dots \dots \dots (4')$$

hieraus folgt mit $e^{\frac{x}{a}} = \sec \tau + \operatorname{tg} \tau$, $e^{-\frac{x}{a}} = \sec \tau - \operatorname{tg} \tau$ und Gl. (4) die Bogenlänge

$$s = a \operatorname{tg} \tau = \frac{a}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} - e^{-\frac{x}{a}} \right) = a \mathfrak{S} \operatorname{in} \left(\frac{x}{a} \right) = y \sin \tau \quad \dots \dots \dots (3')$$

und mit Gl. (5)

$$y = a \sec \tau = \frac{a}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right) = a \mathfrak{C} \operatorname{os} \left(\frac{x}{a} \right). \quad \dots \dots \dots (5')$$

Es ist nun leicht, die weitem Stücke der Kettenlinie für jeden Fall zu bestimmen.

Mit Rücksicht auf die immerhin für die praktischen Zwecke nicht sehr bequeme Berechnung dieser Kurve ist an deren Stelle in der Praxis der Kreis, die kubische Parabel und in neuerer Zeit, auf Veranlassung des Verfassers z. B. bereits 1904 bei der Niesenbahn, allgemein die Planparabel als Gefällsausrundungskurve verwendet worden.

10. Die Planparabelausrundung. Diese Gefällsausrundungskurve bietet den Vorteil, daß sowohl deren Konstruktion, als die Berechnung der kartesischen Koordinaten ihrer Punkte und der Neigungen in letztern sich in einfacher Weise durchführen lassen.

Ist T_0 der Seilzug am untern Ende der Gefällsausrundung mit der Neigung β , so hat man als Krümmungsradius derselben für die Kettenlinie

$$\rho_k = \frac{T_0}{p \cos \beta},$$

für die Parabel mit dem Parameter (= Krümmungsradius im Scheitel) ρ_0 :

$$\rho_p = \frac{\rho_0}{\cos^2 \beta} = \frac{x}{(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) \cos^2 \beta}$$

und für $\rho_p \geq \rho_k$

$$x \geq \frac{T_0}{p} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) \cos^2 \beta,$$

d. h. die horizontale Ausrundungslänge für die Planparabel ist

$$x \geq \frac{T_0}{p} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta},$$

womit die Ausrundung bestimmt ist.

Die Bogenlänge L der Parabel ab Scheitel bis zu einem beliebigen Parabelpunkt mit der Tangentenneigung τ kann für Standseilbahnen mit der vom Verfasser abgeleiteten Näherungsformel

$$\frac{L}{x} = \frac{131 + 38 \operatorname{sec} \tau + 11 \operatorname{sec}^2 \tau}{180}$$

praktisch genügend genau berechnet werden. Zur einfachen überschlägigen Bestimmung der horizontalen Länge konkaver Gefällsausrundungen kann das Nomogramm (Abb. 649) dienen, welches die Ausrundungslänge x nach vorstehender Formel für die zu vermittelnden Neigungen α und β gibt, und zwar für Drahtbeanspruchungen durch normalen maximalen Zug von 15 kg/mm^2 und 18 kg/mm^2 und bei Verwendung der üblichen Langschlaglitzenseile in Compoundkonstruktion. Ist die spezifische Spannung in einer vorgelegten Ausrundung geringer als obige Werte, so verringert sich die horizontale Ausrundungslänge proportional.

Es ist zu berücksichtigen, daß die genaue Kettenlinienformel nur die Ausrundungslänge für den Grenzfall des Schwebens des Seils gibt, während die praktische Ausführung mit größerer Ausrundungslänge zu erfolgen hat, damit noch ein überschüssiger Druck des Seils auf die Tragrollen verbleibt, der ein Schleifen des Seils auf diesen verhindert.

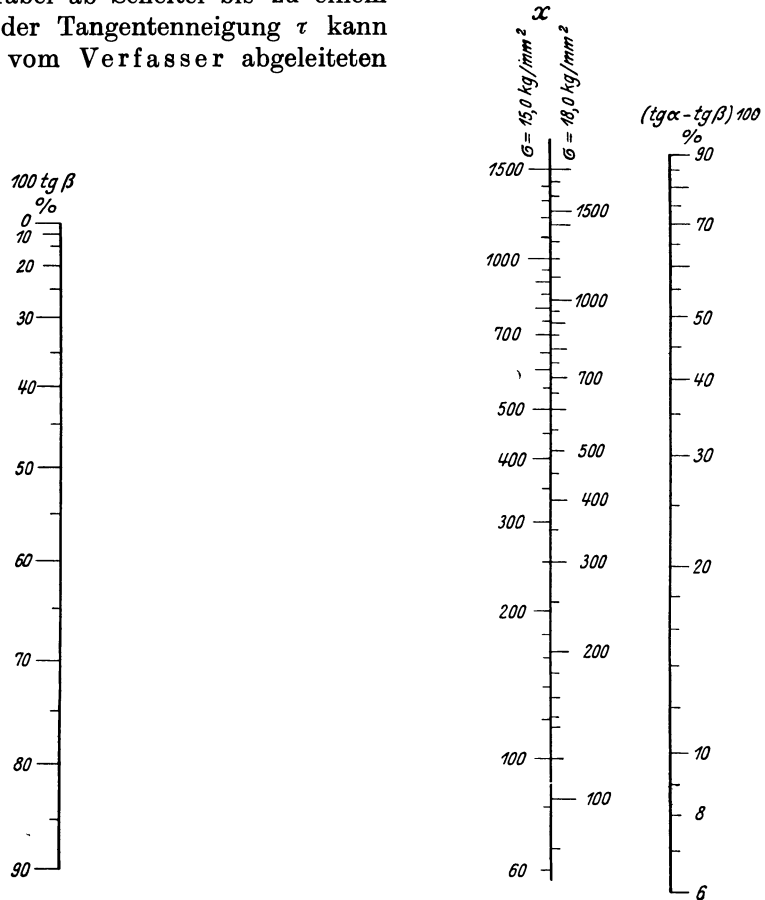


Abb. 649. Rechentafel für die Gefällsausrundung.

Bei Mitberücksichtigung der Seilleitungswiderstände erhöht sich die Zugkraft im Seil am Ausrundungsanfang auf

$$T_0 + \mu l,$$

wobei μ der Seilleitungswiderstand je Laufmeter Bahn
und l die in der Neigung gemessene Bahnlänge vom bergwärts fahrenden Wagen bis zum Ausrundungsanfang bedeutet.

Für Motorbahnen kommt ferner für das Anfahren eine supplementäre Zugkraft von

$$\frac{P + pl + Q}{a} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

hinzu, wobei

P das Gewicht des belastet bergwärts fahrenden Wagens,

Q das Gewicht der zu beschleunigenden Seilrollen zwischen bergfahrenden Wagen und Gefällsausrundung,

a die Anfahrstrecke bis zur Erreichung der normalen Fahrgeschwindigkeit v bedeutet. Eventuell sind auch die Widerstände von Kurvenrollen gesondert zu berücksichtigen. Der Umstand, daß die Bewegung des Seils mit der konstanten Fahrgeschwindigkeit v den (statisch berechneten) Parameter der Kettenlinie unbedeutend verringert, kann hier vernachlässigt werden. Auch ist es nicht möglich, in der Seilrechnung den ungünstigen Einfluß der durch Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte, die Elastizitätseigenschaften des Seilmaterials usw. verursachten Vibrationen und Oszillationen der Seile, deren Schwingungsenergie von den Führungen des Seils absorbiert werden muß, zu berücksichtigen.

Wo aus besondern Gründen eine geringere Ausrundungslänge als die normale verlangt wird, muß zur Wahl eines schwereren Seils bzw. geringerer spezifischer Beanspruchung des Drahtmaterials gegriffen werden, wenn man nicht wenig empfehlenswerte abnormale Seilleitungen (Niederhalterollen, walzenförmige Tragrollen usw.) anwenden will.

11. Die Tragrollen. Die Stützung und Führung des Seiles in der Bahnlinie erfolgt durch Rollen, die möglichst reibungslos gelagert werden. In gerader Bahn sind zu diesem Zweck Tragrollen mit wagerechter Drehachse angeordnet, in den Krümmungen entsprechend schief gelagerte Kurvenrollen (Abb. 652).

Die Tragrollen in gerader Bahn sind nur mit dem Gewicht des Seiles belastet; die Kurvenrollen müssen die der Seilspannung entsprechende radial gerichtete, oft beträchtliche Seitenkraft aufnehmen können.

Wenn das Längenprofil 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 vertikal gemessenen Durchhang zwischen zwei Rollen

$$f = \frac{pt^2}{8T},$$

wo t die schiefe Entfernung der beiden Rollen 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.

Die gesuchte Rollenteilung ist daher

$$t = \sqrt{\frac{8f \cdot T}{p}}$$

Ist die zugelassene Einsenkung rechtwinklig zur Bahnebene (Abb. 650), gemessen von der Unterseite des Seiles, e , dann ist statisch

$$t = \sqrt{\frac{8eT}{p \cos \alpha}}$$

Zwischen Seil und Unterbaukörper bzw. Schotterbett läßt man für allfällige Unregelmäßigkeiten einen Raum von 50 bis 60 mm frei. In der Ausweiche wird das Seil so tief geführt, daß die Flachrollen des Fahrzeuges über das Seil hinwegfahren können.

Zur Festsetzung der Rollenteilung berechnet man am besten für einige im Höhenplan vorkommende Neigungen, darunter auch für kleinste und größte Steigung den Wert von T für den unbelasteten Wagen und trägt die so gewonnenen Werte in einer Kurve in Abhängigkeit von der schiefen Bahnlänge 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.

Um sicherzugehen, setzt man e für diese Rechnungen etwas kleiner an als die Einsenkung, die man wirklich zulassen will.

12. Die Kurvenrollen. Die Wirkung des Seilzuges auf die Kurvenrollen in Bahnkrümmungen ergibt sich aus den Resultierenden der Seilzugkräfte am auf- und ablaufenden Seiltrum.

Der horizontal gerichtete Druck H , den das Seil in der Bahnebene auf die Kurvenrolle ausübt, ist nach Abb. 651.

$$H = \frac{t}{\varrho} \cdot T,$$

wobei T die Zugkraft im Seil,
 t die Rollenteilung, gemessen in der Bahnneigung,
 und ϱ den räumlichen Radius der Bahnkurve, gemessen in der Oskulations-ebene, bedeutet.

Rechtwinklig zur Bahnebene wirkt auf die Kurvenrolle die Resultierende V der Seilzüge im auf- und ablaufenden Seiltrum, das unter dem Winkel δ gegen die Bahnnivellette geneigt ist, somit

$$V = 2T \sin \delta \sim 2T \operatorname{tg} \delta$$

und, da $\operatorname{tg} \delta = \frac{4f}{t}$, folgt weiter

$$V = \frac{8fT}{t}.$$

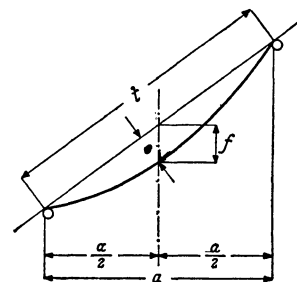


Abb. 650. Bestimmung der Tragrollenteilung.

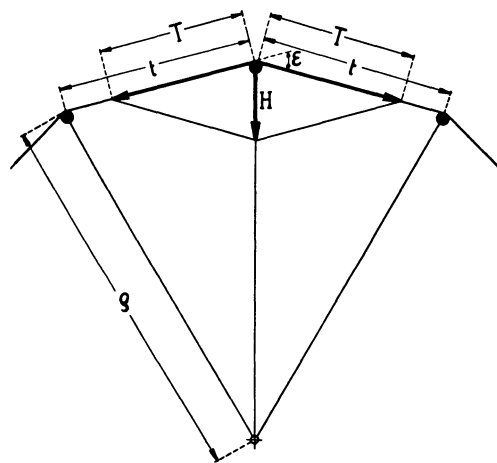


Abb. 651. Kräfteplan der Seilspannungen an einer Kurvenrolle.

Die Neigung γ der aus den Kräften H und V resultierenden, auf die Kurvenrolle wirkenden Kraft gegen die Rechtwinklige zur Bahnneigung wird daher

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{H}{V} = \frac{t^2}{8f \cdot \rho}.$$

Bei diesen Rechnungen ist zu beachten, daß während der Fahrt in vielen Fällen die Betriebszugspannung im Seil zwischen zwei gegebenen Trag- oder Kurvenrollen innerhalb weiter Grenzen schwankt.

Die Neigung γ wird gewöhnlich mit rd. 30° bis 35° ausgeführt.

Für den in der Bahnebene gemessenen Ablenkwinkel ε des Seils an den Kurvenrollen gilt angenähert

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{t}{\rho}.$$

Wo die Konstruktionsverhältnisse der Bahn nicht gestatten, größere Kurvenrollen in einigermaßen normaler Teilung anzuordnen, sind eine größere Anzahl kleinerer Kurvenrollen mit entsprechend geringeren Ablenkwinkeln einzulegen.

Für gute Rollenausteilungen kann der resultierende Seildruck auf die Kurvenrollen zu ca. 2 bis höchstens 4% der Zugkraft im Seil angenommen werden.

Weiterhin erhält man im Rollendurchmesser ein Maß für den spezifischen Druck und die Abnutzung.

Die Tragrollen werden meist mit dem etwa zehnfachen Seildurchmesser ausgeführt. In Krümmungen muß man Leitrollen mit einem größern Durchmesser anwenden.

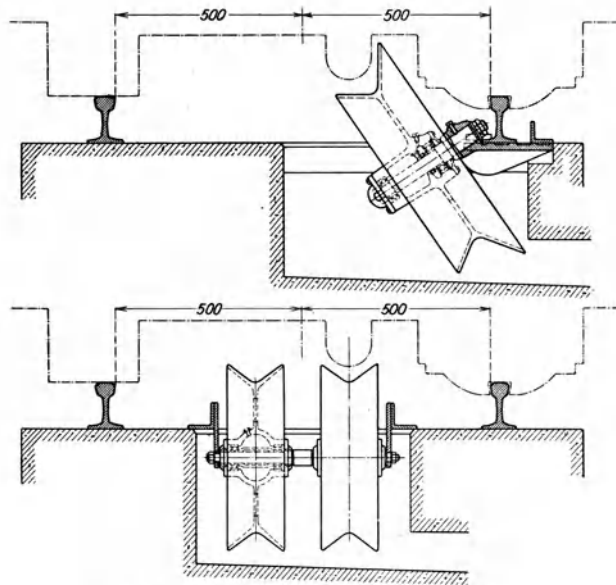


Abb. 652. Rollen mit Kugellagern.

Man gibt den Ablenkrollen 13- bis 18fachen 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 ungünstig beanspruchen.

Vorstehende Darlegungen zeigen, 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 dem Gelände sich anschmiegenden Trassen-

führung im Zusammenhang mit dem ortsfesten Antrieb sichern den Motorbahnen gegenüber Wasserübergewichtbahnen weitgehende Überlegenheit und vielartige Anwendungsmöglichkeiten.

13. Bauformen der Seilrollen. Die Trag- und Kurvenrollen werden aus einem Stück aus Gußeisen, eventuell mit Holzfütterung der Rille, oder aus gepreßtem Blech erzeugt und meist mit Bronzebüchsen auf festen Achsen gelagert. Auf gute und zuverlässige Schmierung der Rollenachsen ist größter Wert zu legen. Schleifende Rollen

nützen das Drahtseil ab; dieselbe Wirkung hat die jedesmalige Ingangsetzung der Rolle durch das Seil. Bei der großen Zahl der Rollen darf diese Wirkung nicht unterschätzt werden; es ist daher unrichtig, eine schwere Rollenbauart anzuwenden, die dann im Betrieb große Seilabnutzung verursacht. Dieser Umstand in Verbindung mit den Kosten des Schmiermaterials und der Beaufsichtigung der Lager spricht dafür, alle Rollen mit Kugel- oder Walzenlagern zu versehen, die sozusagen keinerlei Wartung benötigen und fast kein Schmiermaterial verbrauchen (Abb. 652).

Die Tragrollen sollen stets Rillen mit einem mindestens solchen Kreisquerschnitt erhalten, daß das Seil in demselben gut aufliegt, ohne zu klemmen und ohne seitlich zu schwingen. Walzenförmige Tragrollen sind unzweckmäßig, weil sie die seitlichen Schwingungen des Seiles und die damit verbundenen Abnutzungen und Stauchungen des Drahtmaterials begünstigen.

Drahtseile und Seilführung bei ausgeführten Drahtseilbahnen mit Motorbetrieb.

Bahn	Drahtseil		Tragrollen		Kurvenrollen		Windwerk
	Ø mm	Gewicht kg/m	Ø mm	Teilung m	Ø mm	Teilung m	Seilscheibe Ø mm
Bürgenstock	30,0	3,0	160	15	600	11	3840
	33,1	3,34	160	15	600	8,7	3770
Hungerburg	30,0	3,47	300	9—15	392	9,0	3600
Territet—Gliion	35,0	3,90	240	15	360	9,0	3600
Siders—Vermala	30,7	3,14	300	8—14	390	7—11	3500
	29,6	2,88					3300
Stanserhorn	23,0	1,79					
	34,2	3,61	300	14—17	600	12	4000
Treib—Seelisberg	33,0	3,59					
	31,0	3,27	300	12—14	390	7—8	3794
Lugano—Mte. Bré	27,9	2,44	230		265		3170
	31,5	3,25	300	10—13	390	8—10	4020
Tátra—Tarajka	18,5	1,06	250	11	300	8	1800
Erdmannsdorf—Augustsburg	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	4,00	300	10—17	390	6—12	3800
	33,0	3,75					3600
Neuchâtel—Chaumont	34,8	3,80	300	7—11	390	8—13	3500

14. Das Seil. Für die Wahl der Seilkonstruktion muß auf Grund der in jeder Beziehung bestimmten Hauptanlageverhältnisse, wie Linienführung, Wagengewichte usw., die ungünstigste Seilbeanspruchung errechnet werden. Die (statisch gerechnete) maximale Zugkraft ergibt sich ohne weiteres aus dem in jedem Fall vom projektierenden Ingenieur aufzustellenden Kraftdiagramm (Abb. 655).

Befindet sich die Stelle der ungünstigsten Beanspruchung in einem Punkt der Linie, wo regelmäßig angefahren werden muß, so steigert sich diese Beanspruchung noch weiter; die bei heftigen Bremsungen und Beschleunigungen auftretenden Schwingungsspannungen erhöhen die statische Zugbeanspruchung auf etwa das Doppelte.

In größeren Steigungen vermeidet man mit Rücksicht auf die Fahrgäste hohe Anfahrsgeschwindigkeiten und wählt $\gamma = 0,1 - 0,2 \text{ m/sek}^2$. Dementsprechend ist auch eine genügende Abstufung der Kontroller vorzusehen. Ganz kurze Seilbahnen, die mehr Aufzugscharakter haben, können höhere Anfahrbeschleunigungen erhalten.

Eine genaue Vorausbestimmung der Seilleitungswiderstände auf der Linie ist nicht gut möglich, immerhin kann man schätzungsweise je nach den vorliegenden Konstruktionen etwa mit 2 bis 6 kg Widerstand per Rolle rechnen. Es ist auch zu beachten, daß im allgemeinen die Seilleitungs- und Antriebswiderstände in der ersten Betriebs-

zeit höhere sind als nachher, somit die Ingangsetzung der Bahn eine höhere Anfahrkraft erfordert.

Nach Art der Flechtung (Abb. 653) unterscheidet man Seile mit Langschlag und solche mit Kreuzschlag; bei ersteren sind die Litzen im Seil in gleicher Richtung geschlagen wie die Drähte in den Litzen; beim Kreuzschlag ist das Umgekehrte der Fall.

Bei den Motorbahnen werden in neuerer Zeit fast nur noch Langschlagseile verwendet und zwar meist in Compoundkonstruktion (Abb. 654), bei welcher die an die Oberfläche tretenden Außendrähte der Litzen etwas größeren Durchmesser erhalten als die Innendrähte. Seile in Langschlag werden Kreuzschlagseilen vorgezogen, weil sie eine günstigere Auflagefläche bieten und weniger der Abnutzung unterworfen sind. Eine Verbesserung der Seilauflage in den Rillen der Antriebsrolle wird auch durch Verwendung von flachlitzigen und dreikantlitzigen Seilen angestrebt.

Seile geschlossener Bauart werden nur für Wasserballastbahnen verwendet; sie werden des weichern Materials der Formdrähte wegen schwerer als die bei den Motorbahnen üblichen Langschlagseile, welche auch auf der Triebrolle einen besseren Reibungskoeffizienten aufweisen. Schwerere Seile, als durch die maximalen Zugkräfte bedingt sind, werden ausnahmsweise verwendet, um unter gegebenen Geländebedingungen schärfere Gefällsausrundungen einlegen zu können. Schwerere Seile können unter Umständen bei gegebenem Längenprofil auch eine Verbesserung des Kraftdiagramms im Sinne einer Verringerung der Kraftschwankungen während der Fahrt ergeben.

Die Standbahnseile aus Stahl (Tiegelgußstahl, Pflugstahl) weisen meist 6 Litzen und eine Hanfseele auf, bei 90 bis 144 Drähten. Das Seilgewicht bei den schweizerischen Motorbahnen schwankt zwischen 1,8 und 5,5 kg je Laufmeter.

Der Durchmesser der Antriebsrolle wird üblicherweise rund gleich dem Hundertfachen des Zugseildurchmessers angenommen.

Für die Seilberechnung gelten, wenn

- σ die zulässige Beanspruchung des Drahtmaterials in kg/mm^2 ,
- q den Metallquerschnitt des Seils in mm^2 ,
- γ das spezifische Gewicht des Drahtmaterials,
- φ den Verseilungsfaktor, der angibt, wievielfach der geflochtene Seildraht länger ist als das Seil ($= \frac{7}{6} \div \frac{13}{12}$),
- η die Abminderung des Seils (nach Tetmajer = 0,92),
- p das Seilgewicht in kg/m ,
- T die maximale Zugkraft im Seil in kg ,
- c das Gewicht der Hanfseele pro m

bedeutet, folgende Beziehungen:

$$T = q \cdot \sigma \cdot \eta$$

und

$$p = \frac{q \cdot \gamma \cdot \varphi}{1000} + c.$$

Die Biegungsbeanspruchung im Antrieb der Litzendrähte der üblichen Langschlagseile mit Hanfseele und 140—180 kg/mm^2 Drahtfestigkeit kann für die üblichen Flechtwinkel und einen Elastizitätsmodul des Drahtmaterials von rd. 20 000 kg/mm^2 angenähert berechnet werden zu

$$\sigma_b = \frac{17000 \delta}{D} \div \frac{20000 \delta}{D}$$

wobei

δ den Drahtdurchmesser und
 D den Rollendurchmesser bedeutet.

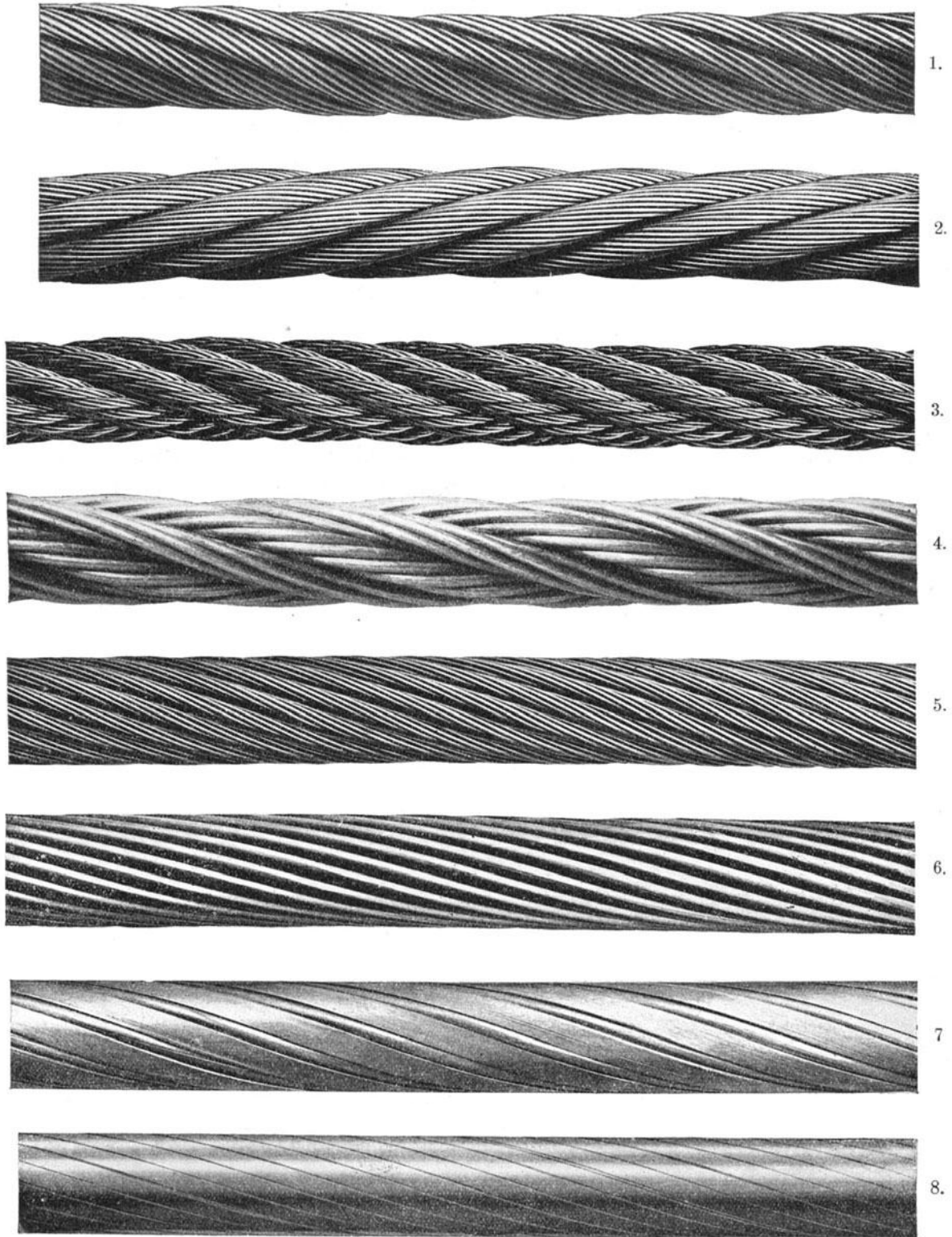


Abb. 653. Flechtarten von Drahtseilen (St. Egydi):

1. Langschlag; 2. Kreuzschlag; 3. Kabelschlag; 4. Wechselschlag; 5. Litzenspiralseil, Herkules-Bauart; 6. Spiralseil; 7. Halbverschlossenes Seil; 8. Ganzverschlossenes Seil.

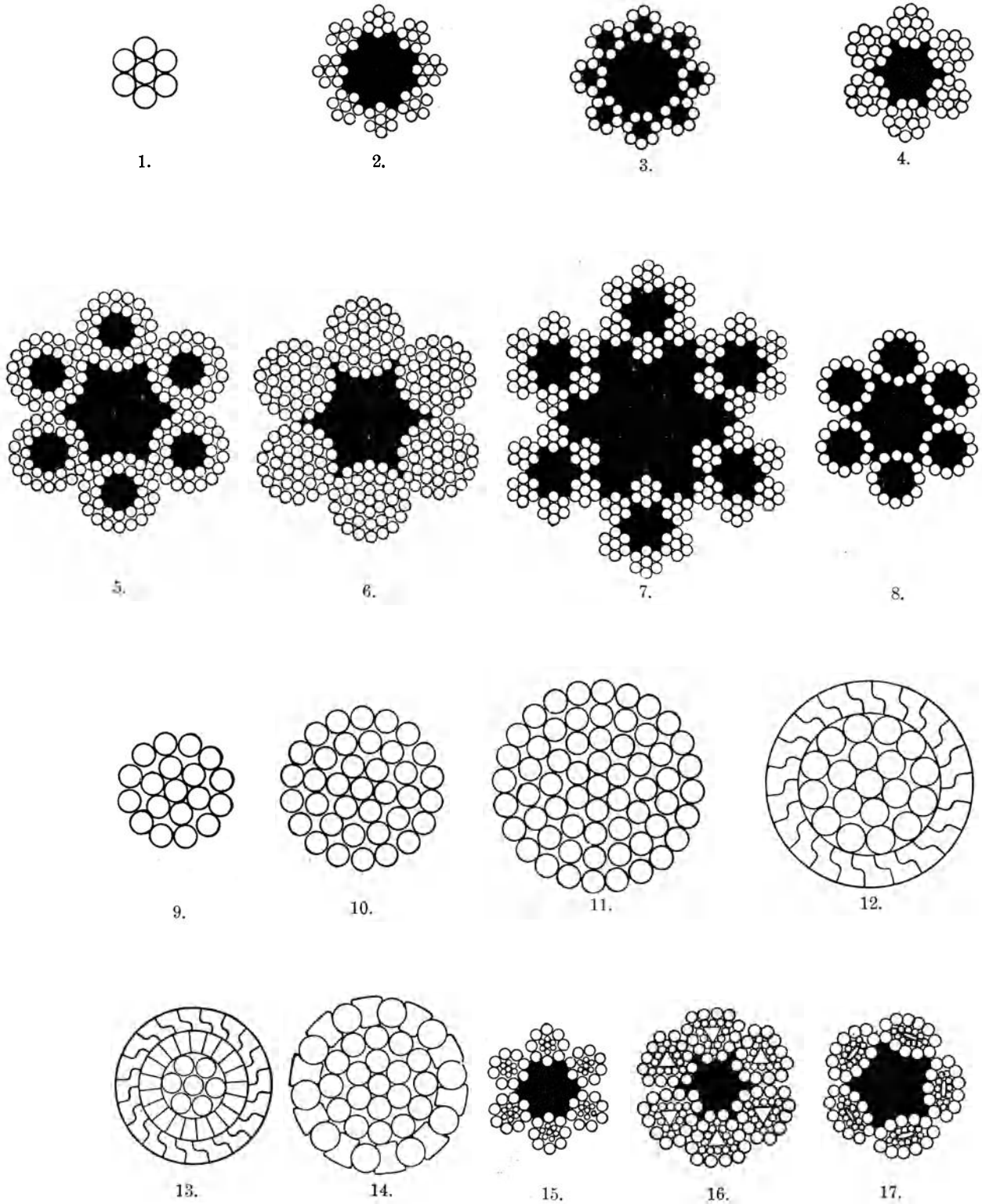


Abb. 654. Bauart der Drahtseile (St. Egydi):

1. Litze aus sechs Drähten mit Drahteinlage; 2.—6. Runddrahtseile in Litzenkonstruktion mit Hanfeinlage; 7. Kabelbauart; 8. Schiffseil; 9.—11. Spiraltragseil; 12.—14. Verschlussene Drahtseile; 15. Compoundseil; 16. Dreikantlitziges Seil; 17. Flachlitziges Seil.

Die elastische Verlängerung eines in Betrieb befindlichen Seils von der Länge l Meter zufolge der Zugkraft T kann überschlägig nach Versuchen berechnet werden zu

$$\Delta l = \frac{T \cdot l}{15000 q} \div \frac{T \cdot l}{10000 q}$$

In der Schweiz sind derzeit folgende Anforderungen an das Seilmaterial üblich:

Sicherheit: zehnfach (statisch nur auf Zug gerechnet).

Zugfestigkeit: 150 bis 180 kg/mm²; bei ungünstiger Linienführung 120 bis 150 kg/mm².

Dehnung: nicht unter 3‰.

Torsionsarbeit: größer als 5,5 cmt/cm³.

Anzahl der Umbiegungen um einen Dorn von fünffachem Seildurchmesser: 10.

Die Qualitätsvorschriften einiger anderer Länder enthalten leichtere Bestimmungen. Es wird aber auf Grund der bisherigen Erfahrungen und privaten Untersuchungen bei einer großen Zahl von Seilbahnbetrieben unumgänglich sein, die bestehenden Vorschriften zu ergänzen, da die bisher vorgeschriebenen Prüfungen gewisse Faktoren, die von großem Einfluß auf die Lebensdauer der Seile sind, nicht erfassen, indem sie nur über das Verhalten des Seilmaterials jenseits der Fließgrenze orientieren. Auch der baulichen Durchführung der Anlagen und der Seilkonstruktion ist hierbei mehr als bisher Beachtung zu schenken, um die Seile im Betrieb möglichst zu schonen und vorzeitige Abnutzung, Materialermüdung, Verrostungen usw. möglichst zu vermeiden. Die Wichtigkeit des Seils als Maschinenelement für die Sicherheit des Seilbahnbetriebes erheischt sodann dessen sorgfältigste Unterhaltung und Überwachung, zu welcher letzterer namentlich auch die Kontrolle der Innendrähte des Seils gehört. Die Seile kürzerer schweizerischer Seilbahnen weisen vor dem Ablegen bis 370000 Fahrten auf.

Das nach dem „Kompond-System“ gebaute erste Seil der Hungerburgbahn erzielte eine Lebensdauer von 4½ Jahren mit einer Leistung von 60000 km. Das seit Betriebseröffnung eingebaute zweite Seil derselben Bezugsquelle und Bauart erzielte 27000 km, das dritte „Rundschlageil“ auch nur eine Leistung von 37600 km. Da diese Leistungen nicht befriedigten, wurde schließlich ein Dreikantflachlitzenseil gewählt, dessen Runddrähte 165 kg und dessen Dreikantdrähte 90 kg Festigkeit aufweisen. Dieses Seil war 4 Jahre im Betrieb und hat 58000 km geleistet.

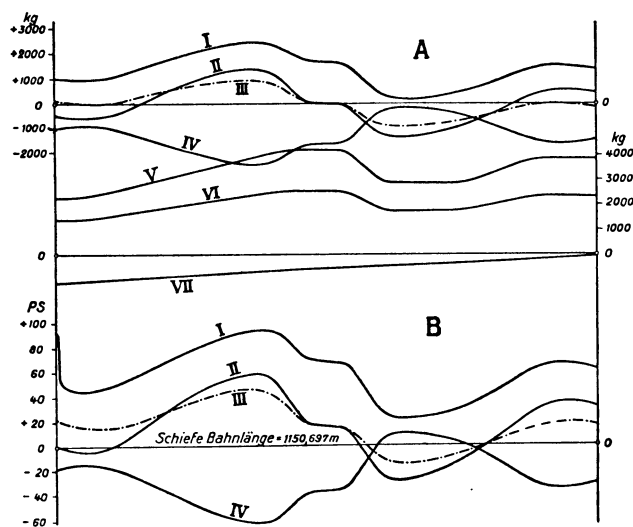


Abb. 655.

Leistungsdigramme der Seilbahn Treib—Seelisberg.

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| A. Wagen- und Seilkomponenten; | IV. Bergfahrt leer, Talfahrt vollbe- |
| B. Kraftdiagramme; | lastet, Gewichtskomponente; |
| I. Bergfahrt vollbelastet; | V. Wagen vollbelastet; |
| II. Berg- und Talfahrt vollbelastet; | VI. Wagen leer; |
| III. Beide Wagen leer; | VII. Seil. |

15. Kraftbedarf. Die höchste und die durchschnittliche Mittelkraft wird zweckmäßigerweise graphisch ermittelt. Zu diesem Behufe genügt es, im Kraftdiagramm die der jeweiligen Wagenstellung entsprechenden Kräfte aufzutragen. Diese bilden, da eine gleichmäßige Geschwindigkeit vorausgesetzt wird, gleichzeitig das Maß für die aufzuwendende Leistung (Abb. 655, 656).

Im positiven Sinne sind aufzutragen:

- a) Die Wagenzugkraft $P_2 \sin \beta$,
- b) die Wagenreibung

$$(P_1 + P_2) \frac{k}{1000},$$

- c) der Seilleitungswiderstand für verschiedene Stellungen des bergfahrenden Wagens.

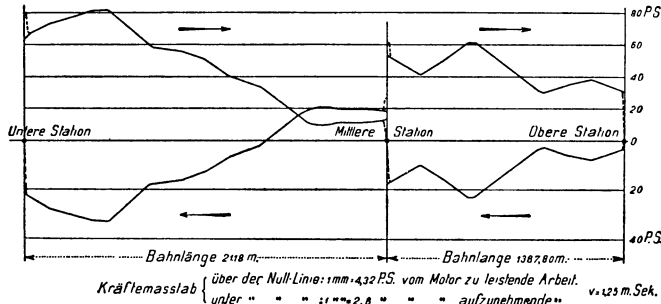


Abb. 656. Leistungsdiagramm der beiden Teilstrecken der Niesenbahn.

- d) die Antriebswiderstände, die nach bestehenden Ausführungen abgeschätzt werden können.

Im negativen Sinne und in entgegengesetzter Richtung fortschreitend

- e) die Wagenzugkraft $P_1 \sin \alpha$,

schließlich

- f) 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 berg- bzw. talfahrende Wagen P_2 voll belastet ist und der tal- bzw. bergfahrende Wagen P_1 leer läuft.

Die Addition bzw. Subtraktion 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 Dauerleistung des Motors maßgebend ist.

16. Betriebsmotor. Die Wahl der Stromart — Gleichstrom oder Drehstrom — ist grundsätzlich gleichgültig; erstere wird vorzuziehen sein, wenn auf eine gleichmäßige Stromentnahme 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 talwärts fahrenden Last als Generator arbeitet und die Wicklung des Auslösungsmagnetes auch weiter speist. Dieser Übelstand

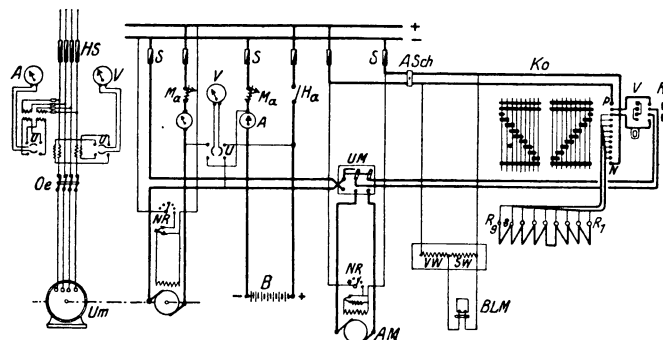


Abb. 657. Schaltplan des elektrischen Antriebes für das Windwerk der Seilbahn auf die Hungerburg (Innsbruck).

Umformung: 2000 V Zweiphasenstrom auf 440 V Gleichstrom, Leistung 40 kW
 Pufferbatterie, Leistung . . 50 kWh
 Nebenschlußmotor, Leistung . 80 PS

besteht bei Drehstrom nicht, der Bremsluftmotor läßt seinen Anker immer fallen, wenn die Stromzufuhr ausbleibt.

Die Abb. 657 und 658 stellen Beispiele für Betriebsschaltungen von Windwerksantrieben 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/sek, auf kürzeren oder weniger steilen Seilbahnen bis 3 m/sek, ausnahmsweise 4 m/sek, angewendet.

Die bei zahlreichen neueren Drahtseilbahnen ähnlicher Bremskonstruktionen üblichen Geschwindigkeiten geben brauchbare Anhaltspunkte für die zweckmäßige Wahl der Fahrgeschwindigkeit für neue Entwürfe.

Für Bahnen mit den üblichen Keilkopfschienen und Zangenbremsen kann man genähert annehmen

$$v \operatorname{tg} \alpha = 0,8 \div 0,9,$$

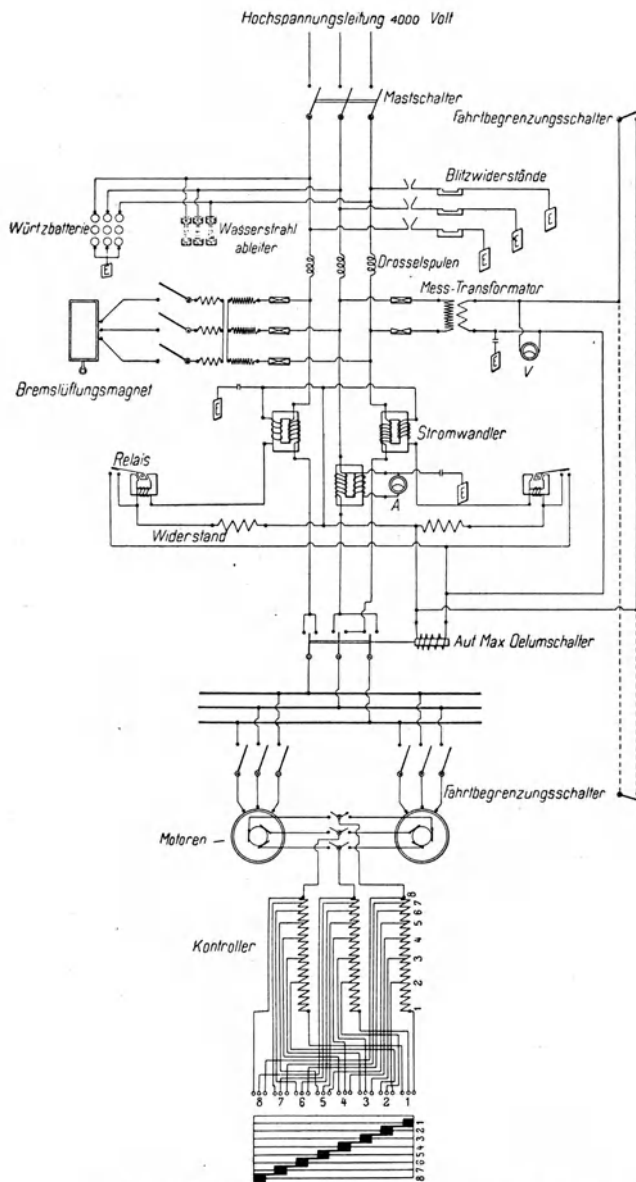


Abb. 658. Schaltbild der Antriebstation Schwandegg der Niesenbahn (Alioth).

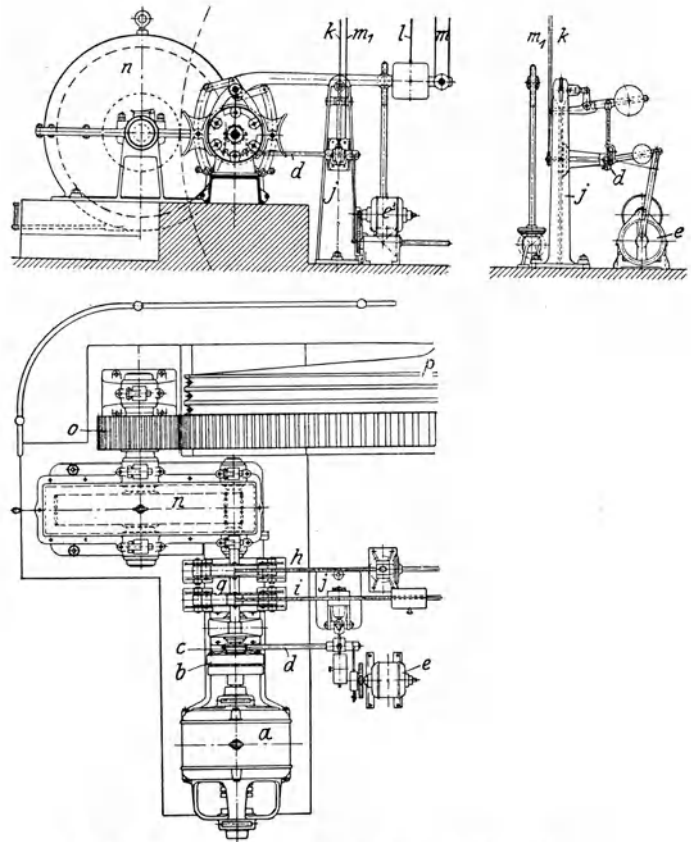


Abb. 659. Windwerk mit Reibungskupplung und Bremsen der Seilbahn Treib-Seelisberg (Bell).

für Bahnen mit Schnellschlußbremsen

$$v \operatorname{tg} \alpha = 1,0 \div 1,2,$$

wobei v die normale Fahrgeschwindigkeit in m/sek und α die maximale Bahnneigung bedeutet.

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 gleichzeitig Gelegenheit, in das Getriebe ein elastisches Zwischenglied einzulegen, um die Starrheit einerseits des Seiltriebes, andererseits des Motors mit Nebenschlußeigenschaften zu mildern. Zu diesem Behufe hat man vielfach zwischen Motor und Windwerk doppeltes Zahnradvorgelege und Riemenantrieb angeordnet. Dieser Betriebsart haftet unter den meistens obwaltenden Umständen das Übel an, daß für die Auslegung des Riementriebes ein verhältnismäßig großer Raum erforderlich ist. Dieser Nachteil läßt sich

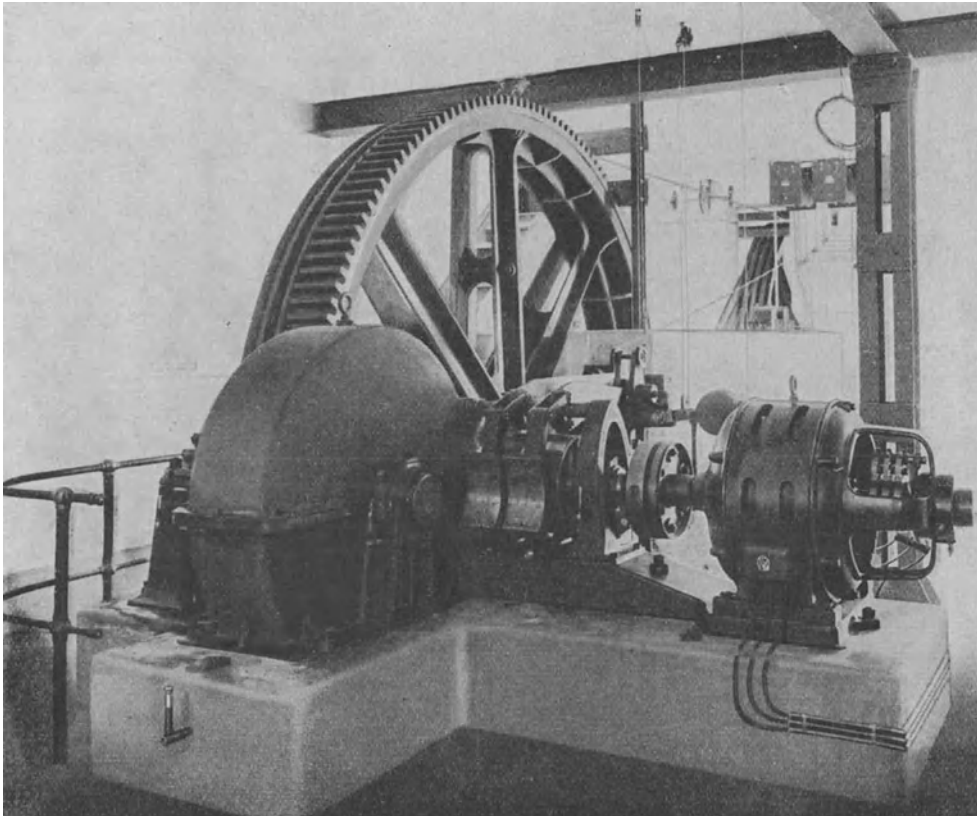


Abb. 660. Ansicht des Windwerkes der Drahtseilbahn Treib—Seelisberg.

vermeiden, wenn man den Motor mittels einer Rutschkupplung mit dem Windwerk verbindet. Zu diesem Zweck eignen sich die auch bei Zahnradlokomotiven gebräuchlichen Lamellenkupplungen.

Die Windwerke der Seilbahnen am Monte Bré, Freundschaftshöhe und Åreskutan wurden vom Verfasser mit Globoid-Schneckengetriebe versehen; dieses ermöglicht, die Gesamtübersetzung statt in drei in zwei Stufen zu erreichen. Einige andere neuere Bahnen erhielten Reduktionsgetriebe (Seelisberg, Abb. 659, 660, Gerschnialp).

Die Steuerung des Antriebsmotors erfordert eine der bei stabilen Motoren üblichen ähnliche Anordnung. Es 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 unter-

bricht, wenn dies der Maschinist unterlassen haben sollte. Durch diese Anordnung wird auch erreicht, daß Strom nur nach erfolgtem Wechsel der Fahrtrichtung eingeschaltet werden kann.

Fahrgeschwindigkeiten auf Drahtseilbahnen mit Motorbetrieb.

Anlage	Größte Steigung ‰	Geschwindigkeit m/sek	Anlage	Größte Steigung ‰	Geschwindigkeit m/sek
Bürgenstock	577	1,13	Lyon-Croix Paquet .	172	4,00
Capri	380	2,50	Lyon-Croix Rousse .	160	2,74
Capucin-Mt. Dore	545	1,00	Mendel	649	1,50
Cassarate-Mte. Bré	475	1,50	Niesen {	150—660	1,25
Dolder	175	2,80		344—660	0,90
Engelberg-Gerschni	580	1,20	Siders-Vermala . . . {	484	1,80
Grasse	228	3,00		396	1,40
Gurten	350	2,00	Stanserhorn {	100—270	2,00
Heidelberg	430	2,00		400—600	1,00
Hungerburg	555	1,27	Tátra-Tarajka	126	2,80
Lausanne-Gare	116	3,00	Treib-Seelisberg	380	2,40
Lausanne-Ouchy	116	4,00	Tréport-Terrasse	650	1,10
Les Avants Sonloup	545	1,50	Virgl-Bozen	700	1,50

17. Das Windwerk (Abb. 659 bis 665). Die Grundsätze der zweckmäßigen Arten der Verbindung der Seilschabe mit dem Antriebsmotor sind vorstehend 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 T und t im auf- und ablaufenden Trum besteht die aus der allgemeinen Maschinenlehre bekannte Beziehung:

$$T = t \cdot e^{\mu \alpha},$$

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \operatorname{lg} n \left(\frac{T}{t} \right) = \frac{1}{\mu} (\ln T - \ln t),$$

wobei

$$\alpha = \frac{2 \pi \alpha^0}{360^0} \text{ den Zentriwinkel im Bogenmaß,}$$

und

μ die Reibungsziffer bezeichnet.

Setzt man $T = n t$, so wird

$$\alpha = \frac{\operatorname{lg} n}{\mu},$$

eine Gleichung, die sich leicht nomographisch darstellen läßt.

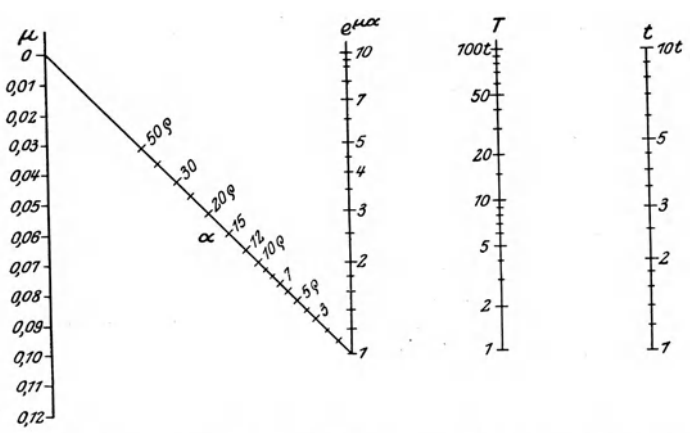
Will man nicht nur das Verhältnis $\frac{t}{T}$, sondern auch die absoluten Werte von T und t für die Errechnung der nötigen Seilumschlingungen ermitteln, so leistet das Nomogramm Abb. 661 gute Dienste.

Aus dem logarithmischen Gesetz der Kraftübertragung durch Reibungsschluß folgt jedoch, daß bei mehrfacher Umschlingung die aufeinanderfolgenden Umschlingungen nicht in gleicher Weise an der Kraftübertragung teilnehmen.

So wird bei $\mu = 0,1$ und $\alpha = 3 \pi$ die erste Umschlingung 46,0 ‰, die zweite 30,7 ‰ und die letzte die restlichen 23,3 ‰ der Umfangskraft aufnehmen.

Die Vermehrung der Rillenzahl bzw. der Umschlingungen — je ein Rillenkranz entspricht $\alpha = \pi$ bis $\frac{5}{8} \pi$ — erhöht zwar die Sicherheit des Reibungsschlusses zwischen dem

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 Schlüpfungen in der Rille zur Folge.



Das Nomogramm Abb. 661 läßt erkennen, daß für eine Reibungsziffer von 0,09 das Verhältnis der Seilzüge $T:t$ für drei Umschlingungen (über welche hinaus man nicht gerne geht) ungefähr den Wert 1:2,5 annimmt. Hieraus ergeben sich für Seilbahnen mit offenem Seil gewisse Grenzen für die Unterschiede zwischen der geringsten Steigung und dem Leergewicht des Zuges einerseits und der größten Steigung und dem vollbelasteten Zugandererseits. Durch die Anwendung eines Ballast-

Abb. 661. Rechentafel zur Bestimmung der Seilumleitung bei Windwerken.

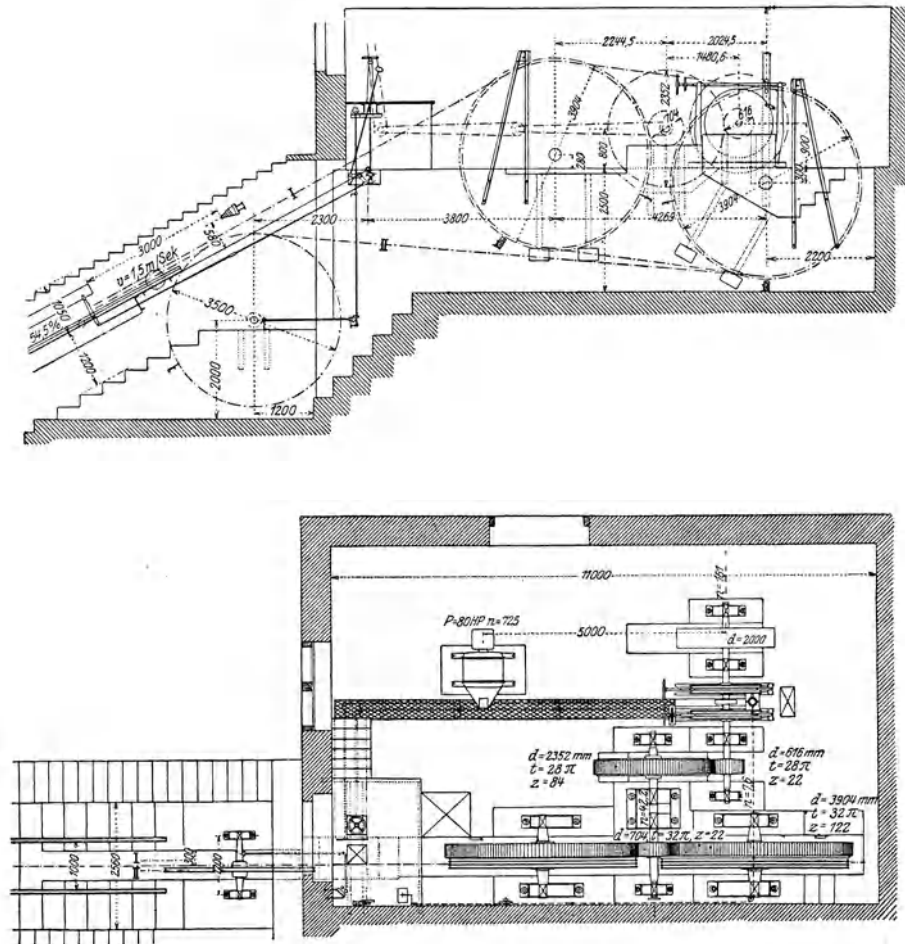


Abb. 662. Windwerk der Seilbahn Les Avants—Sonloup (v. Roll).

seiles mit Spannvorrichtung lassen sich evtl. ungünstige Längenprofilverhältnisse überwinden.

Durch das Gleiten des Seiles in der Rille wird an sich die Sicherheit des Reibungsschlusses verringert. Weiters tritt bei den meist gebräuchlichen drei Rillen eine ungleichmäßige Abnutzung ein.

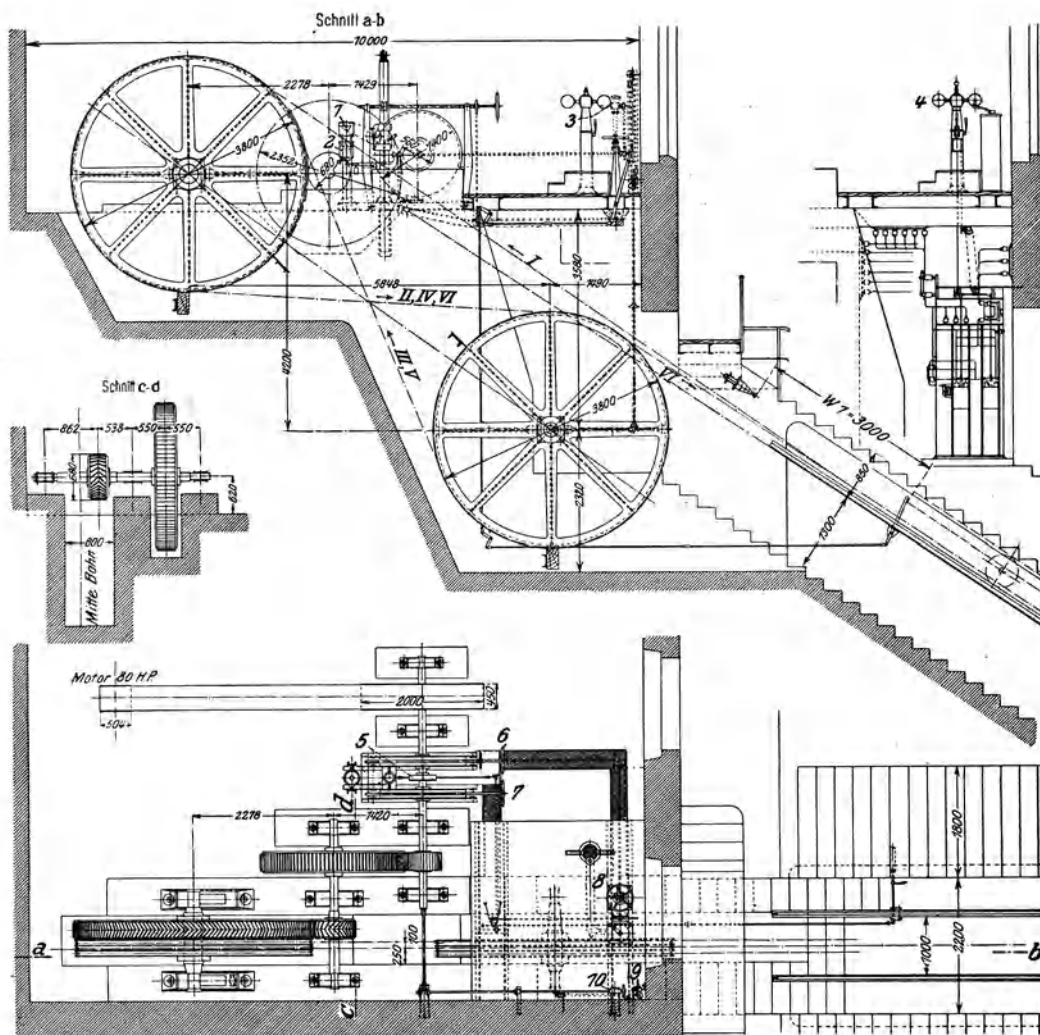


Abb. 663. Windwerk der Niesenbahn. Riemenantrieb (Roll).

Mit Holz oder Chromleder gefütterte Radkränze neigen wegen der größeren Reibung mehr zu diesem Übel als eiserne Rillen; andererseits ist dort 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 nicht immer zutreffend, da die Reibungsziffer oft Veränderungen unterworfen ist. Man wird also aus Sicherheitsgründen und auf Grund der Betriebserfahrungen den Wert von μ nicht zu hoch wählen.

Die Ungleichmäßigkeit der Lastverteilung kann dadurch (Abb. 664) wesentlich gemildert werden, daß zwischen je zwei Radkränze ein den Kraftausgleich bewirkendes

Planeten- (Differential-) Getriebe eingebaut wird, wodurch die treibenden Radkränze, wenn z. B. deren zwei vorhanden sind, gezwungen werden, dauernd gleiche Drehmomente zu übernehmen. Das Gefälle der Umfangskraft wird so in zwei gleiche Teile geteilt. Eine Anwendung des Kraftausgleichs durch Differentialgetriebe fand bereits Ende der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts bei der Seiltransmission der Wasserwerkgesellschaft Schaffhausen statt.

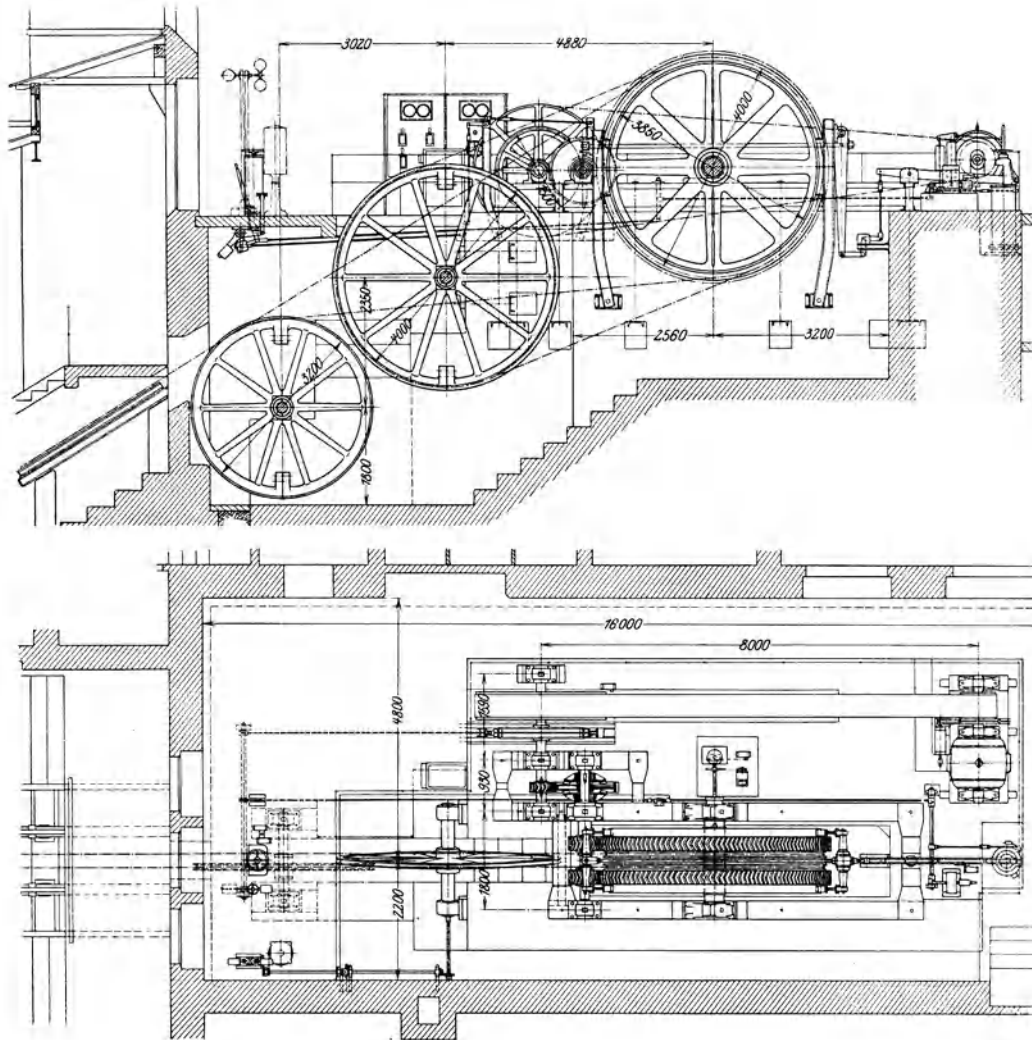


Abb. 664. Windwerk mit Spannungsausgleich der Seilbahn auf dem steirischen Erzberg.
(AEGU — R. Ph. Waagner.)

Bezüglich der Reibungsziffer zwischen Rad und Seil gehen die in der Literatur vorfindlichen Angaben weit auseinander.

Erfahrungsgemäß kann für Stahldrahtseile auf Gußrillen

$$\mu = 0,06 \div 0,09$$

angenommen werden.

Fest steht jedenfalls, daß bei Bahnen, die Winterbetrieb haben, die Reibungsziffer 0,09 zuweilen unterschritten wird, so daß es zweckmäßig ist, die Windwerke auf Grund einer niedrigeren Reibungsziffer zu berechnen.

Aus der Grundgleichung

$$T = t \cdot e^{\mu \alpha}$$

geht hervor, daß man größere Seilzugsdifferenzen nur durch Vermehrung der Zahl der Umschlingungen überwinden kann.

Die Vermehrung der Umschlingungen bringt, wie schon erwähnt, 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 verursacht diese Sachlage in den aufeinanderfolgenden Rillen eine mit der Seilspannung abnehmende Abnutzung, die die Nachteile dieser Erscheinungen noch weiter steigert.

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 Gegenrichtung gebogen werden muß, im Gegensatz zu den mehrrilligen Anordnungen, bei welchen das Seil nach jeder Umleitung in die andere Richtung gebogen wird.

Trotz des Vorteiles dieser Anordnung wird sie namentlich für steile Drahtseilbahnen unanwendbar bleiben, weil der erforderliche Raum für die Unterbringung der Seilscheiben meist fehlt oder sehr hohe Baukosten verursacht. Nach diesem Grundsatz ist bisher nur das Windwerk der Seilbahn Les Avants-Sonloup gebaut worden (Abb. 662).

Die einfachste und weitestverbreitete Anordnung sieht für das Windwerk eine 2- bis 4rillige Seilscheibe und eine ebenso gebaute Umlenkrolle vor. Beide sind in der Berührenden der Bahnneigung (über Boden) oder annähernd auf gleicher Höhe unter Boden angeordnet.

Die Seilscheibe trägt zugleich die Verzahnung mit einer Übersetzung von etwa 1:5 bis 8.

Die zweite Übersetzung wird in verschiedener Weise bewirkt.

Für viele schweizerische 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 abstufbare 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 die von der selbsttätigen Bremse betätigte Bremsscheibe. Zur Milderung der Bremswirkung wird die Raschheit der Auslösung durch einen Öldämpfer gehemmt. Die Handbremse wirkt auf eine auf der ersten Vorgelegewelle sitzenden Bremsscheibe.

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 ablaufende Seil getrennte Gegenscheiben vor, so 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, also den Antrieb nicht „über Boden“ ausführen, was insbesondere dann von Wichtigkeit ist, wenn man das Aufnahmegebäude am oberen Bahnende für andere Zwecke benötigt, so 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, Freundschaftshöhe Karlsbad 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 normalen Elektromotoren 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 abgekommen und verwendet vorwiegend Stirnräder und gekapselte Reduktionstriebwerke. In manchen Fällen hat man das kleine Pfeilrad mit Holzzähnen versehen. Für ruhigen Gang haben sich besonders die Schneckentriebe bewährt.

18. Signal- und Telephoneinrichtungen. Zum Unterschied von allen anderen Bahnarten wird bei Seilbahnen des betrachteten Systems die Fahrt nur ausnahmsweise vom Fahrzeug aus geregelt, sonst stets von einem festen Standort, der sich meist am oberen Bahnende befindet. Neuerdings werden auch Seilbahnen mit Fernsteuerung des Antriebes vom einen Wagen aus eingerichtet, Rigiviertel Zürich, Fürigen. Insofern der

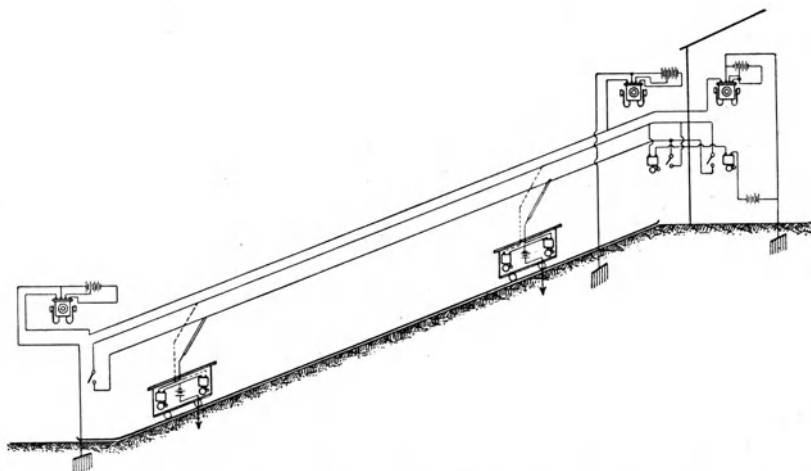


Abb. 665. Schaltung der Signalanlage der Hungerburgbahn, Innsbruck (AEGU).

Maschinist von seinem Standort die Strecke übersehen kann, also bei kurzen Seilbahnen mit gerader Linie, ist ein besonderes Verständigungsmittel entbehrlich. Man begnügt sich in solchen Fällen mit akustischen Signalen. Bei längeren unsichtigen Strecken müssen elektrische Signaleinrichtungen, sowie Wagen- und Stationstelephone vorgesehen werden, die den Schaffner eines jeden Wagens instandsetzen, sich jederzeit mit dem Maschinenführer zu verständigen.

In Abb. 665 ist der Schaltplan einer Signalanlage dargestellt. Es ist von Wichtig-

keit, daß sich auch auf jedem Wagen eine Batterie befindet, so daß das Ansprechen der Signallocken von der Wagenstellung unabhängig ist. Die beiden Signalleitungen, die Geber- und Empfängerleitung, sind längs der Bahnachse geführt und können vom Schaffner mittels eines Kontaktstabes erreicht werden. Sobald er das in Betracht kommende Signal gegeben hat, wofür ihm das Er-tönen der Glocke am eigenen Fahr-zeug eine Kontrolle bildet, hängt er den Kontaktstab auf die Emp-fängerleitung, durch die er die Signale vom Maschinenführer er-hält. In analoger Weise wird bei neueren Bahnen meist auch eine telephonische Verbindung herge-stellt. (Abb. 666.)

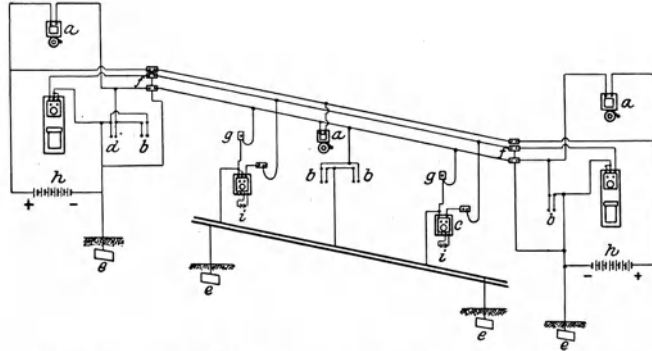


Abb. 666. Signalanlage mit telephonischer Verständigung.

19. Fahrzeuge (Abb. 667, 668). Die Wagen für Drahtseilbahnen müssen, sofern es sich um ausgesprochene Steilbahnen handelt, den hohen Beanspruchungen, die beim

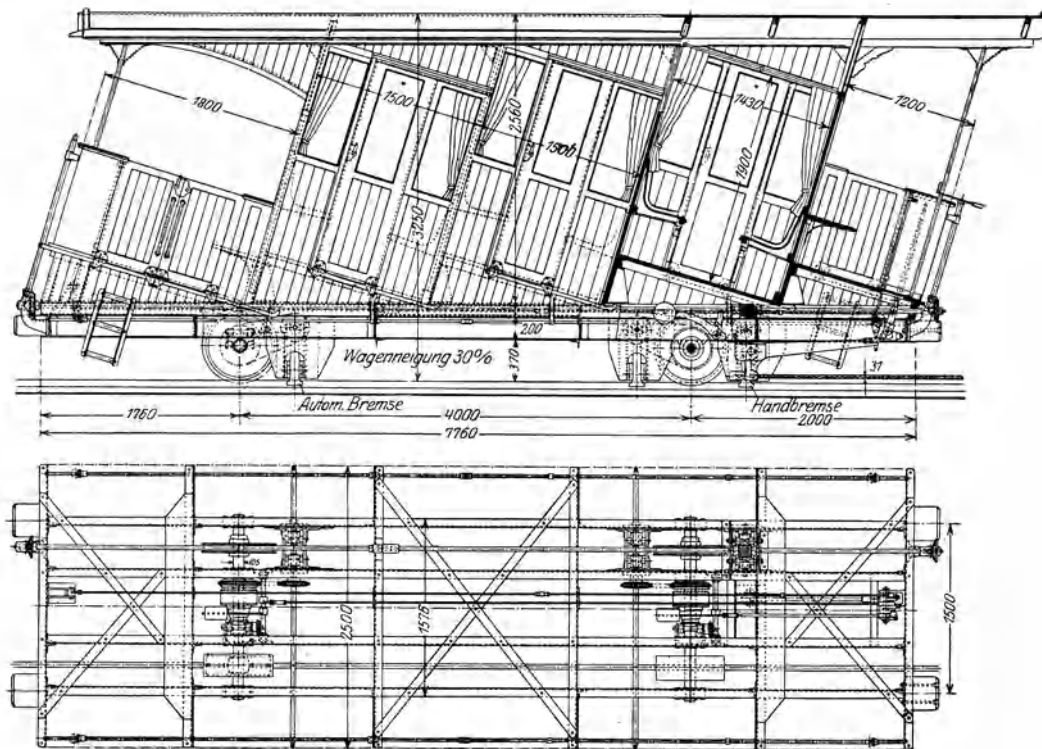


Abb. 667. Seilbahnwagen, Sitzanordnung.

Bremsen im Falle eines Seilbruches auftreten, Rechnung tragen. Die Bedeutung des 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. Dieser Anforderung kann nur bei An-

ordnung verhältnismäßig kleiner Raddurchmesser und Vermeidung einer Achsfederung entsprochen werden. Neuzzeitliche Wagen erhalten meistens Raddurchmesser von etwa 600 mm.

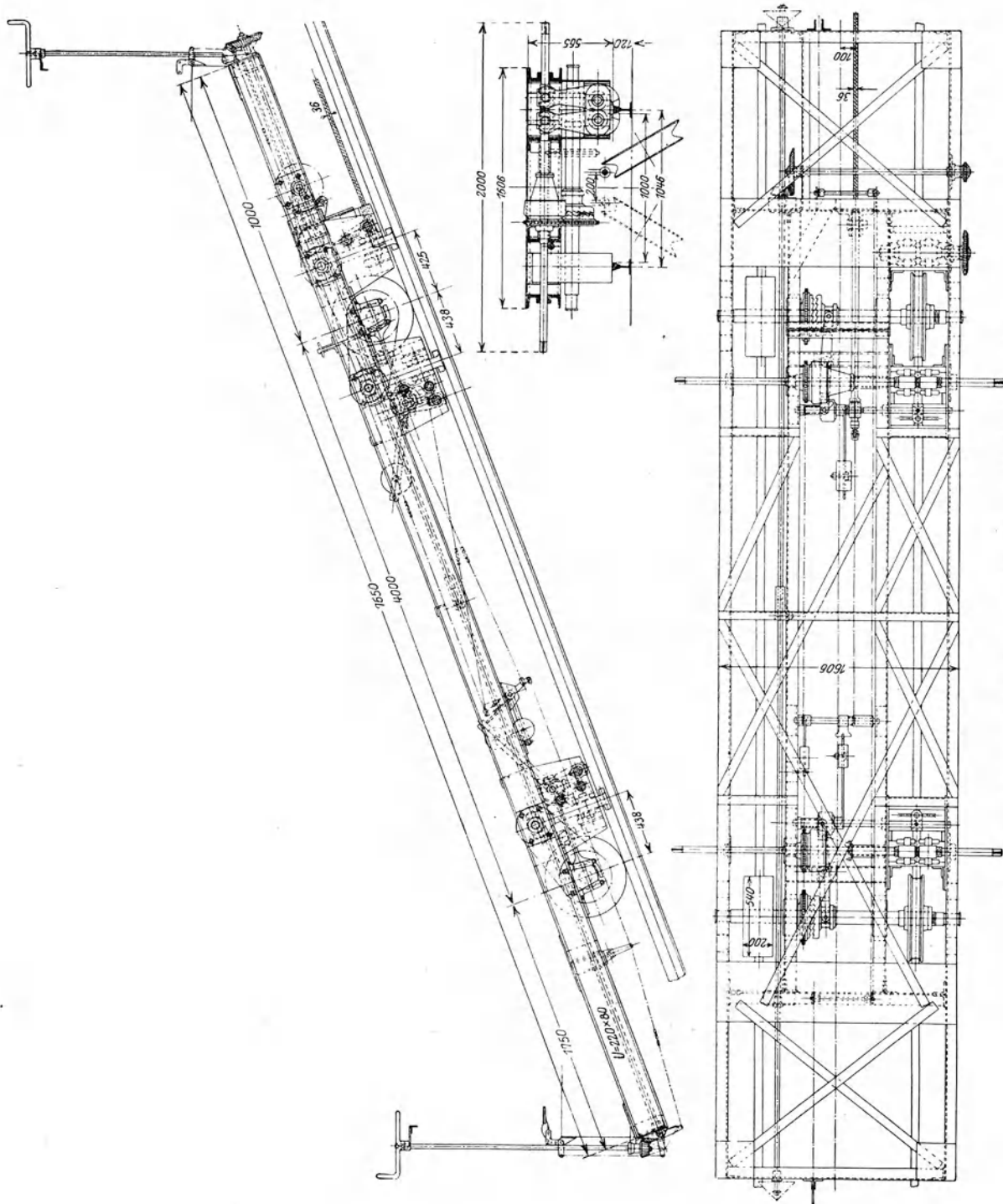


Abb. 668. Untergestell des Wagens der Niesenbahn (Gießerei Bern).

Bei den Schweizer Typen sind meist drei Zangenbremsen, die möglichst nahe an die Laufräder herangerückt werden, vorgesehen.

Eine Zange wird von Hand aus 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 folgende:

Das Zugseil ist mittels konischen Vergußkopfes im Seilhebel am oberen Wagenende gefaßt und drückt im gespannten Zustande das andere Hebelende gegen eine Klinke, die mittels 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 die auf der gleichen Welle aufgekeilte Muffe mit Spiralnut drehen und die auf den beiden Laufachsen gelagerten Klauenkupplungen einrücken. Von diesen betätigt je ein Kettentrieb die Bremsspindel mit Doppelmutter der beiden Zangenbremsen. Die Zangen werden dabei gegen den konischen Schienenkopf gepreßt. Vor der Bremsspindel 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 über dem Schienenkopf angeordneten Stempels, der diese Durchbiegung auf einige wenige Millimeter begrenzt.

Verschiedene Bahnen besitzen Wagenbremsen, bei welchen Rutsch- und Klauenkupplung auf der Laufachse sitzen und das Einrücken der Klauenkupplung mittels Konustriebe erfolgt (Abb. 668, 669, 670, 671).

Eine Entlastung des Wagengestelles von der senkrechten Bremskraft erzielt auch 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 Bremse muß sehr heftig sein, weil die Bremswirkung ohne Abstufung auftreten muß. Dieses System ist nur in Italien in Anwendung und stellenweise bereits verlassen worden (Capri).

Für überschlägige Berechnungen läßt sich der eigentliche Bremsweg s der Wagen (Gleitstrecke der Zangen an den Schienen) ermitteln aus

$$s = \frac{\frac{Pv^2}{2g} + Ph}{R \cdot f},$$

wobei

P das Wagengewicht,

v die Fahrgeschwindigkeit am Ende des Freilauf- und Schließweges,

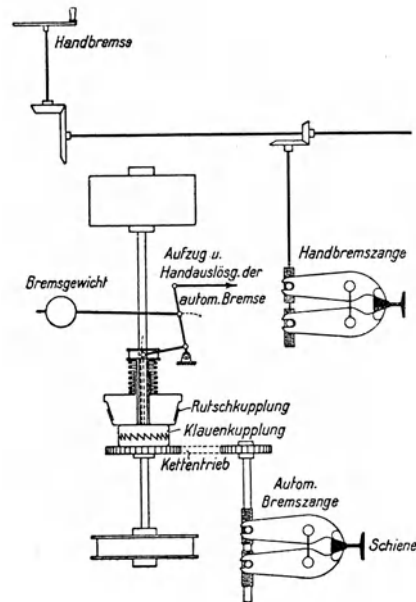


Abb. 669. Bremsschema des Seilbahnwagens Treib-Seelisberg.

$h = s \sin \alpha$ die auf dem Bremsweg durchfahrene Höhe,
 f den Reibungskoeffizient zwischen Zangen und Schiene und
 R die Zangenpressung

bedeutet.

Hierbei ist zu beachten, daß je nach der Konstruktion der Bremsauslösungen die Wagengeschwindigkeit v im Moment des Zangenschlusses bzw. Bremsbeginns, bereits wesentlich höher sein kann als die normale Fahrgeschwindigkeit. Die neuesten Schnell-

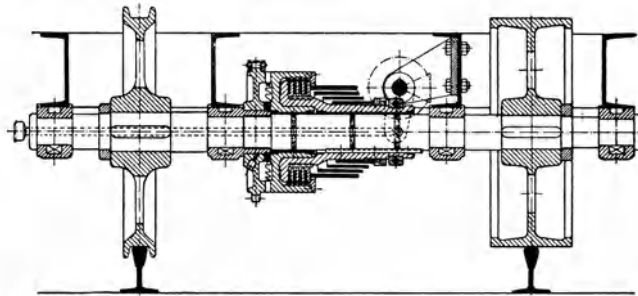


Abb. 670. Schalt- und Antriebsmechanismus der Zangenbremse (Rutsch- und Klauenkupplung) des Wagens der Seilbahn Treib—Seelisberg (Bell).

schlußbremsen gehen deshalb darauf aus, den Freilaufweg von Seilbruch bis zum Zangenschluß möglichst abzukürzen und damit auch für schwerere Wagen und größere Geschwindigkeiten die Bremskräfte in erträglichen Grenzen zu halten (Magglings, Fürigen).

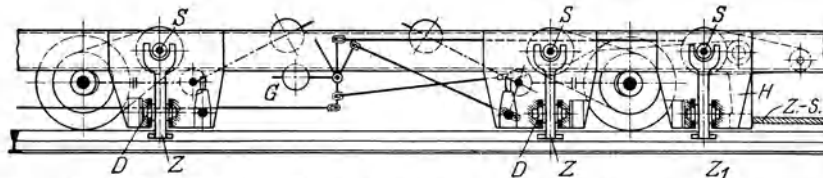


Abb. 671. Seilbahn-Wagenuntergestell mit Zangenbremsen (v. Roll).
 Z.-S. = Zugseil; Z_1 = Handbremse; Z = autom. Bremse; S = Bremsspindel; H = Seilhebel; G = Auslösegewicht.

Aus den beschriebenen Wirkungen dieser Bremsanordnungen folgt, daß man mit dem Gewicht der Seilbahnfahrzeuge nicht über einen gewissen Wert gehen soll. Etwa 16 t bilden die Grenze für meterspurige Fahrzeuge. Größere Gewichte verlangen eine breitere Spur, um die erforderliche Stabilität der Fahrzeuge zu erzielen.

Die bisher üblichen Wagen sind meist 2,00 m bis 2,6 m breit und weisen ein lfd. m-Gewicht von im Mittel 785 kg, d. s. 314 kg/qm, auf. Je Meter Länge fassen die Wagen bis 8 Sitzplätze und etwa 10 Stehplätze insgesamt, d. s. etwa 4 bis 5 Personen je qm. Die Wagenbeleuchtung erfolgt durch eine längs der Bahn geführte Stromleitung oder durch Wagenbatterien.

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. Als Ersatz für die fehlende Federung wird zwischen Untergestell und Wagenkasten eine elastische, schalldämpfende Zwischenlage montiert.

III. Schwebeseilbahnen.

Findeis: Rechnerische Grundlagen des Baues von Drahtseilbahnen. Wien: Deuticke 1923.

Peter: Die neuen österreichischen Vorschriften über Schwebeseilbahnen für Personenbeförderung SBZ. Bd. 68, Nr. 22.

Petersen: Schwebelift und Schwebefähren. VT. 1922, H. 31.

Woernle: Zur Beurteilung der Drahtseilschwebbahnen für Personenbeförderung. Z. Dipl.-Ing. 1913.

Schwebeseilbahnen gehören zu den ältesten Verkehrsbehelfen in der Kulturentwicklung. 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



Abb. 672. Stütze mit Fahrzeug der Schwebeseilbahn Bozen—Kohlern (Bleichert).

Geländes unabhängiges Verkehrsmittel zu schaffen, mußten zu Enttäuschungen führen, weil die günstige Beurteilung dieses Verkehrsmittels auf einem Trugschluß fußte. Man schloß nämlich aus den wirtschaftlichen Erfolgen der für industrielle Zwecke vielfach in Gebrauch stehenden Drahtseilbahnen auf das gleiche Ergebnis bei Bahnen in eigentlichem Sinne, d. h. bei öffentlichen Verkehrsmitteln mit überwiegendem Personenverkehr und naturgemäß starkem Wechsel unterworfenen Verkehrsbedürfnis.

Es war vorweg ein Irrtum anzunehmen, daß ein für industrielle Massenbeförderung mit vollständig gleichmäßiger Leistung und verteilten, verhältnismäßig kleinen Einzellasten bestimmtes 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 Tragseile und der sie tragenden Stützen.

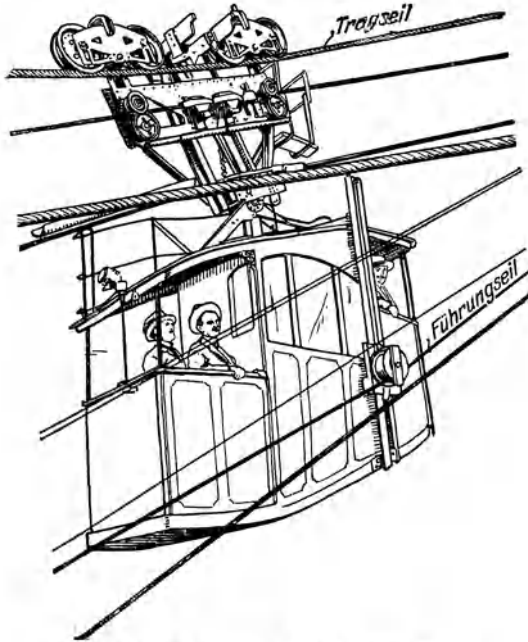


Abb. 673. Fahrzeug der Schwebeseilbahn Lana—Vigiljoch. Fassungsraum 16 Personen.

Dies fällt um so mehr ins Gewicht, als die Einrichtungen für ein öffentliches Verkehrsmittel mit weit höherem Sicherheitsgrad hergestellt werden müssen, 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 Auslangen finden, die Personen-Drahtseilbahnen bis vier Seile pro Fahrbahn erhalten müssen.

Die Schwebebahn auf den Kohlerenberg (Bozen) weist zwei Zug- und zwei Tragseile auf (Abb. 672). Bei der Lana—Vigiljoch-Bahn (Abb. 674 bis 676) sind 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.

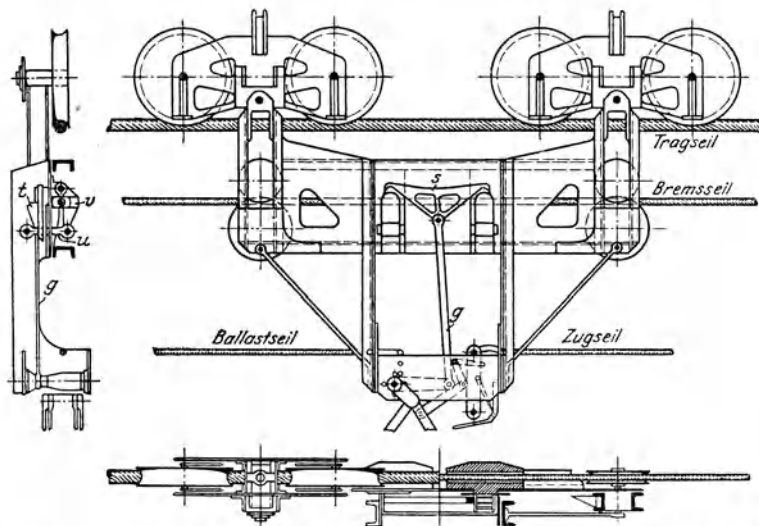


Abb. 674. Laufwerk eines Wagens für die Schwebeseilbahn Lana—Vigiljoch.

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. 677, 678), Erklímmung von Höhen über vergletschertes oder sonstwie gefährdetes Gelände, insbesondere wenn Steigungen von mehr als 85% zu überwinden sind

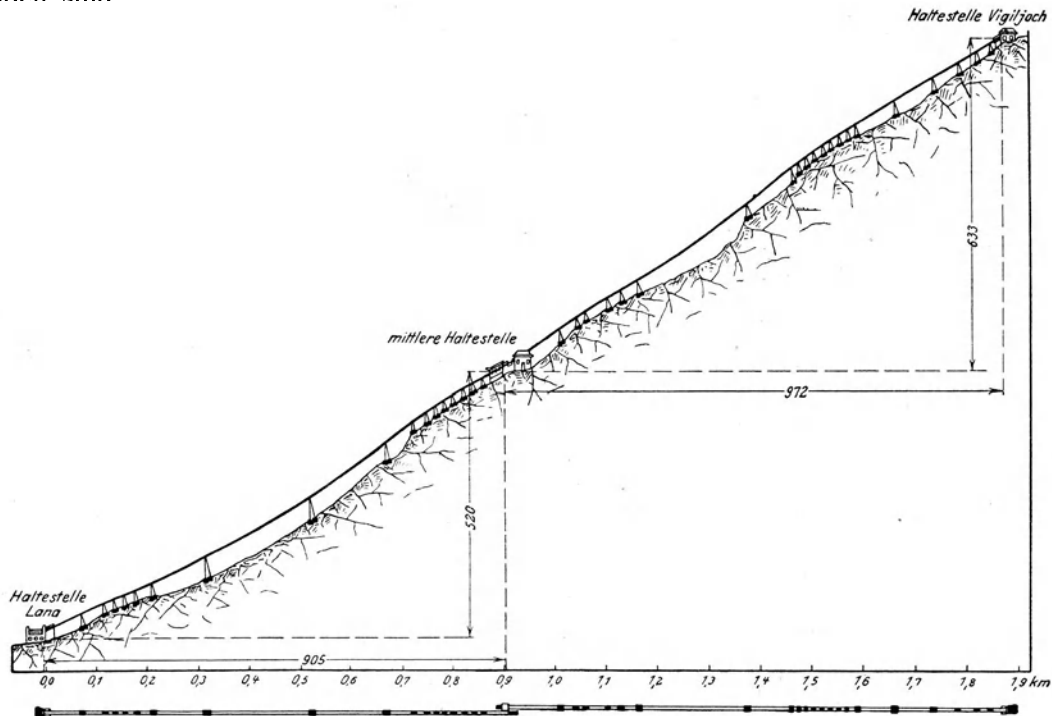


Abb. 675. Längsschnitt der Schwebeseilbahn Lana—Vigiljoch.

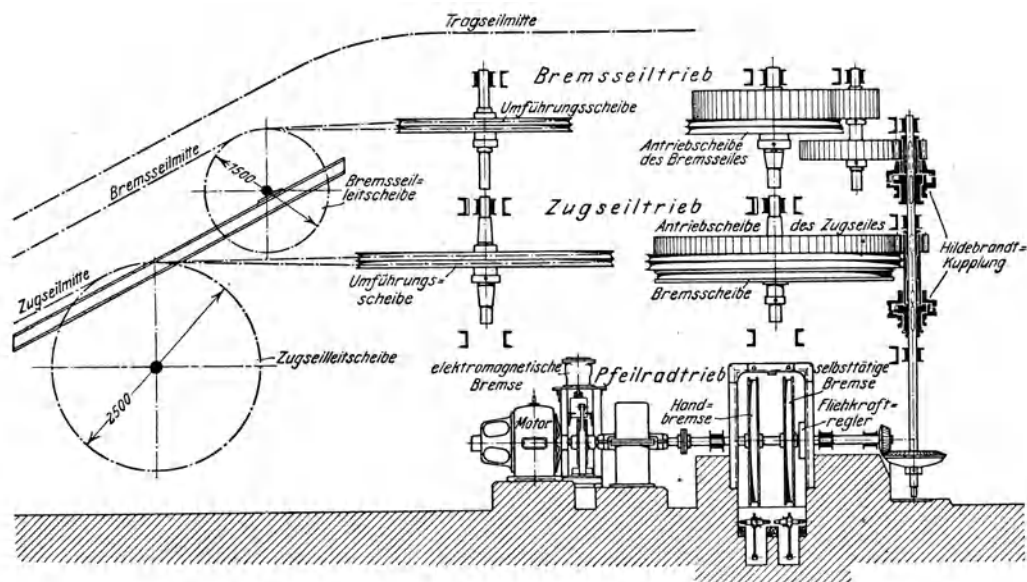


Abb. 676. Windwerk der Schwebeseilbahn Lana—Vigiljoch (Ceretti Tanfani-AEGU).

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 Fahrtstellung bei Bruch

eines der Tragseile wird, wie der Verfasser bereits im Jahr 1908 nachgewiesen hat, durch die Feldmannsche Spanngewichtsordnung ebensowenig wie durch diejenige von Torres erzielt.

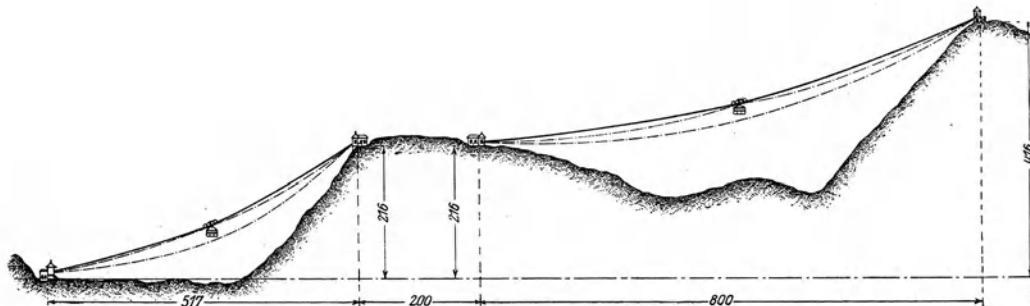


Abb. 677. Längsschnitt der beiden Teilstrecken der Schwebeseilbahn auf den Zuckerhut, Rio de Janeiro.

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

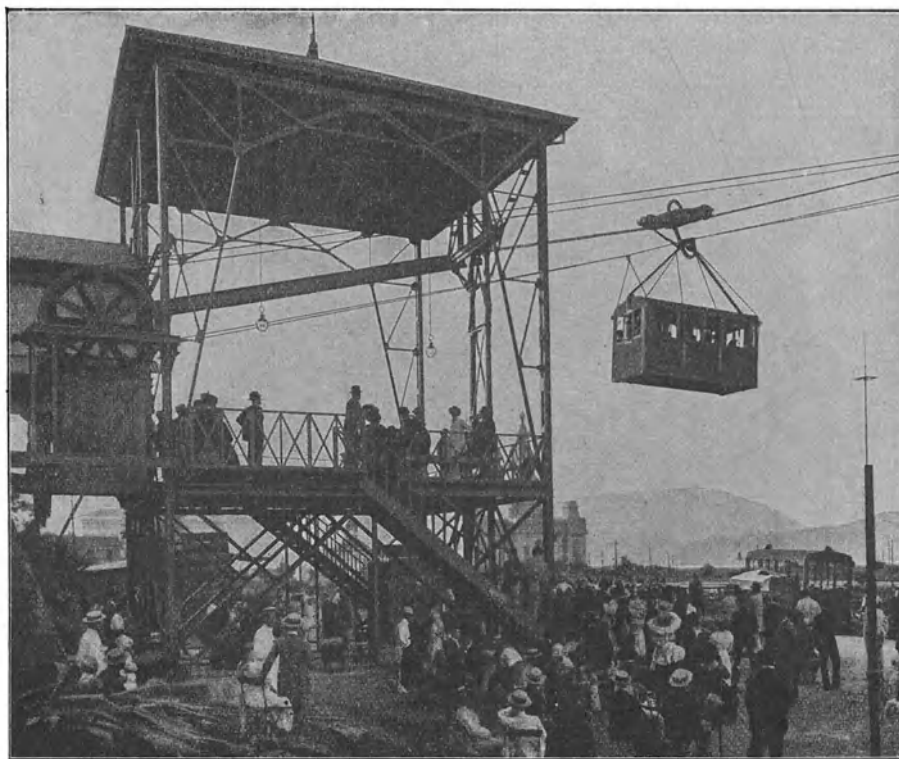


Abb. 678. Untere Station der Schwebeseilbahn auf den Zuckerhut, Rio de Janeiro (Pohlig).

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 der Seile und dadurch bedingt, daß namentlich die Tragseile bei einer einzigen schad-

haften Stelle in ihrer ganzen Länge ausgewechselt werden müssen. Spleißstellen sind unzulässig. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied gegenüber einem aus einzelnen Stücken zusammengesetzten Schienenoberbau.

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. Da beträchtliche Durchhänge zugelassen werden müssen, schwankt die Steigung der Seilfahrbahn innerhalb der Spannweite in weiten Grenzen. Diese Schwankungen übertragen sich nur wenig gedämpft auf das Windwerk. Es ist daher hier noch mehr wie bei Standeseilbahnen für die Zwischenschaltung elastischer oder nachgiebiger Getriebebestandteile zu sorgen.



Sechster Teil.

Wirtschaftliche Fragen.

I. Finanzielle Grundlagen.

- Adler: Der Neuaufbau der Berliner Straßenbahn. EKB 1921, H. 10.
Adler: Vereinheitlichung des Berliner Verkehrswesens. ZÖIAV 1923, H. 23.
Adler: Gegenwart und Zukunft der Berliner Straßenbahn. SKB 1922, H. 12. — GA 1922, Nr. 1080.
Bussebaum: Allgemeine technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte für die Bildung von Straßenbahntarifen. EKB 1916, H. 3.
Dawson: Investigation of the financial prospects of railway electrification. Inst. of Transport 1923. En. 1. Juni 1923.
Ertel: Zur großstädtischen Wohnungs- und Verkehrsfrage. VT 1921, H. 5.
Giese: Fahrplangestaltung und Zugfolge der Straßenbahnen. VT 1921, H. 30.
Haas: Die Rückstellungen bei Elektrizitätswerken und Straßenbahnen. Berlin: Springer, 1916.
Kummer: Die wirtschaftlichen Aussichten der Elektrifizierung der schweizerischen Eisenbahnen vor zehn Jahren und heute. SBZ 1923, Bd. 81, Nr. 5.
Mattersdorff: Die Hamburger Hoch- und Untergrundbahnen. VT 1923, H. 5.
Pforr: Einiges aus dem Betrieb der Berliner Straßenbahn. VT 1922, H. 27.
Sobersky: Vergleich des großstädtischen Verkehrs von New York, London, Paris und Berlin. VT 1923, Nr. 19.
Stahl: Tariffragen. EKB 1916, H. 22.
Stinemetz: Electrification largely a financial problem. ERJ 1923, Bd. 61, Nr. 20.
Sztrókay: Das Verkehrsproblem von Groß-Budapest. VT 1922, H. 51/2.
Trautvetter: Elektrische Straßenbahnen und straßenbahnähnliche Vorort- und Überlandbahnen. Berlin: Springer 1913.
Trautvetter: Linienführung elektrischer Bahnen. Berlin: Springer 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 Zuförderung 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 zu erwartenden Einnahmen und die Ausgaben auszuwerten und einander gegenüberzustellen.

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 Geldwesens 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 diesem entsprechenden, voraussichtlichen Einnahmen müssen dann auf Grund der örtlichen Verhältnisse erhoben werden.

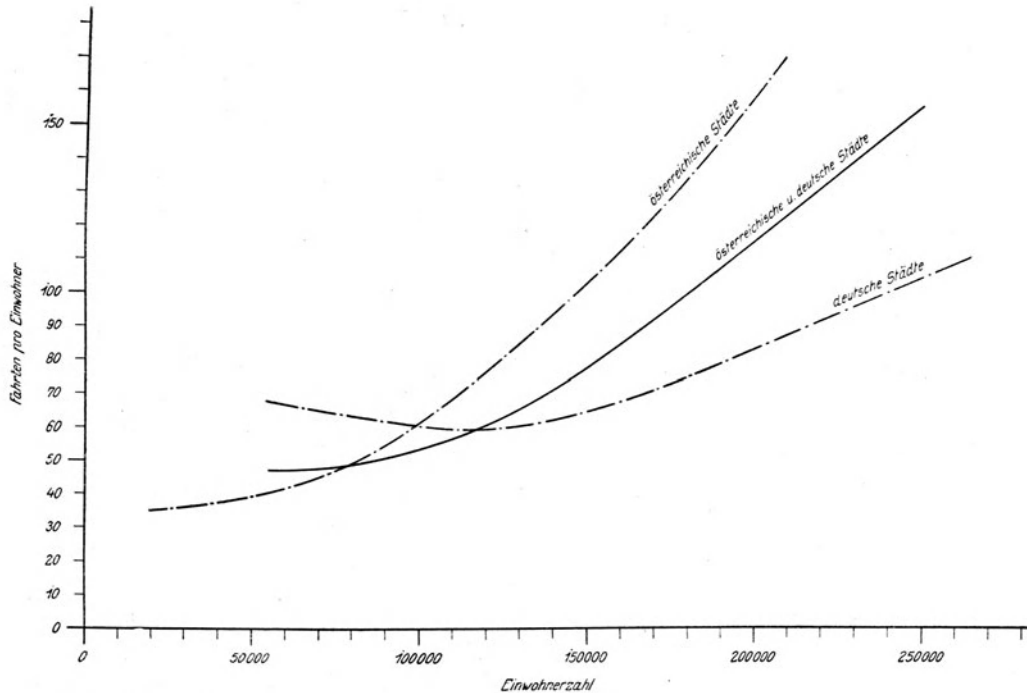


Abb. 679. Jährliche Anzahl der Straßenbahnfahrten in Abhängigkeit der Einwohnerzahl.

Ebenso können zur Auswertung der Betriebsausgaben nur die für bestimmte Verkehrsleistungen erforderlichen sachlichen Aufwendungen und die mit bestimmten Einrichtungen erzielbaren Verkehrsleistungen herangezogen werden, nicht die hierfür in Papiergeld 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 erster Reihe in einem gewissen Zusammenhang mit der Größe bzw. der Bevölkerungszahl des Stadtgebietes, welches als Anzugsgebiet in Betracht kommt. Neben der Bevölkerungszahl sind die Dichte der Besiedelung, besondere örtliche Verhältnisse, Art der Beschäftigung der Bevölkerung, usw., von Einfluß auf die Verkehrsziffer.

Diese Umstände verschleiern einigermaßen den Einfluß der Bevölkerungszahl. So viel 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, den vielfachen Handelsbeziehungen und zerstreuten Arbeitsgelegenheiten das Vielfache kleinerer Städte aufweisen.

Kleinstädte mit etwa 30000 Einwohnern 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 Bestandsmöglichkeit einer Straßenbahn angenähert klarzustellen, kann man sich der in Abb. 679 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 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 gestaffelten Tarifen läßt sich diese Frage aus der Anzahl der verkauften Fahrkarten einigermaßen schätzen. Bei Neuanlagen 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 hierdurch 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 wählen ist, daß dem Reisenden im allgemeinen selbst dann noch ein Zeitgewinn aus der Bahnbenützung erwächst, wenn er eben erst einen Zug versäumt hat. Nach der anderen Richtung

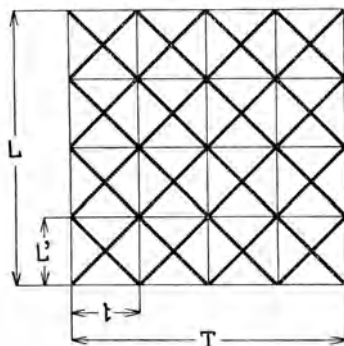


Abb. 680. Bildfahrplan.

begrenzt die Leistungsfähigkeit des Schaffners im Fahrscheinverkauf die Wagengröße. 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 durchschnittlich weniger angestrengt und 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 n der in Dienst zu stellenden Züge berechnet

werden. Aus dem geometrischen Zusammenhang der Fahrplanlinien (Abb. 680) folgt, daß

$$\frac{t}{T} = \frac{L'}{L} \text{ ist; und da in jedem Zeitabstand sich zwei Züge kreuzen, wird}$$

$$T = \frac{nt}{2}, \quad L = \frac{vT}{60}, \quad L' = \frac{2vt}{60n},$$

und schließlich
$$n = \frac{120L}{vt}.$$

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 40000 bis 50000 km beziffert werden. Bei Überlandbahnen sind um 50 bis 100% höhere Jahresleistungen nichts Ungewöhnliches.

Die Jahresleistung von Vollbahnlokomotiven ist vielfach nicht ausgenutzt, jedoch sind Leistungen von 100000 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 Triebwagenkilometer	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 aller Wahrscheinlichkeit nach zu rechnen ist. In diesem Belange werden außer den Vergleichszahlen anderer Bahnen und 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 Verkehrszahlen von Stadtbahnen, sondern auch 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. Wirtschaftlichkeit der elektrischen Zugförderung auf Vollbahnen.

Die mathematisch genaue Erfassung der Wirtschaftlichkeit der elektrischen Zugförderung auf Vollbahnen im Vergleich zum Dampfbetrieb ist äußerst schwierig. Die Art der Betriebskraft beeinflusst in der Hauptsache die auf die Zugförderung Bezug habende Ausgabengruppe, doch wirkt sie sich auch auf andere Betriebszweige aus und bleibt auch auf die Einnahmen nicht ohne Einfluß.

Es ist z. B. einleuchtend, daß durch den Entfall der Verunreinigungen durch Dampf und Rauch sich die Erhaltungskosten der baulichen Anlagen und Fahrzeuge verringern. Der elektrische Betrieb steigert die Leistungsfähigkeit einer bestimmten Strecke bzw. diese kann gesteigert werden, sofern das Verkehrsbedürfnis vorliegt. Die Kosten des Verkehrs und des kommerziellen Dienstes bleiben in ihrer Gesamthöhe — innerhalb gewisser praktischer Grenzen — hierbei unberührt; bei Steigerung des Verkehrs ergibt sich jedoch eine Verringerung der Kosten dieser Verkehrszweige für die Einheit der Verkehrsleistung.

Die zahlenmäßige Erfassung dieser Wirkungen ist selbst in einem bereits eingerichteten Betriebe schwierig, um so weniger kann eine vorgängige Berechnung oder Schätzung auf Zuverlässigkeit bis in alle Einzelheiten Anspruch erheben.

Das gleiche gilt besonders bei einer das gewöhnliche Maß der Verkehrssteigerung übertreffenden Zunahme des Verkehrsbedürfnisses.

Bei der Bewertung der wirtschaftlichen Vorteile des elektrischen Betriebes ist es daher üblich, sich auf einen tunlichst genauen Vergleich der reinen Zugförderungskosten der beiden Betriebsarten zu beschränken und sich über weitere Vorteile nur Rechenschaft zu geben, ohne sie zahlenmäßig bewertet in die Rechnung einzubeziehen.

Der Vergleich der Kosten der Zugförderungsarten gliedert sich entsprechend den im Eisenbahnwesen üblichen Buchungsgruppen in folgende Ausgaben:

1. Personalkosten (Lokomotivführer und Heizer bzw. Begleitmann);
2. Kosten der Betriebsstoffe:
 - a) Brennmaterial oder Stromkosten,
 - b) Speisewasser,
 - c) Schmiermittel und Putzmaterialien;
3. Instandhaltung der Lokomotiven;
4. Verzinsung und Tilgung des aufgewandten Kapitals.

Die Personalkosten. Die Bedienung der Dampflokomotive erfordert mindestens zwei Mann: den hochqualifizierten Führer und den Heizer.

Die Führung der Elektrolokomotive stellt an die physische Kraft und Ausdauer der Mannschaft keine nennenswerten Anforderungen, weiter sind keinerlei Manöver betriebsmäßig erforderlich, die zu diesem Zwecke die gleichzeitige und ständige Anwesenheit von zwei Mann erforderten. Die einmännige Bedienung der Elektrolokomotive ist daher grundsätzlich möglich; sie hat sich bei geeigneter Einrichtung der Führerstände als durchaus einwandfrei und betriebssicher erwiesen. Um allen Möglichkeiten bei einmänniger Bedienung Rechnung zu tragen, sieht man auf der Lokomotive einen geeigneten Raum für den Zugführer vor, der unterrichtet wird, wie er im Bedarfsfalle den Zug zum Stehen zu bringen oder in den nächsten Bahnhof zu führen hat.

Die Kosten des bei elektrischem Betrieb entfallenden Begleitmannes kann man, niedrig gegriffen, mit mindestens $\frac{1}{3}$ der Lohnsumme des Fahrpersonals einschätzen, wobei der Umstand, daß der Führer der Elektrolokomotive wegen seiner einfacheren Ausbildung und dem hierzu erforderlichen kürzeren Zeitaufwand nicht so hoch entlohnt zu werden braucht wie der Führer der Dampflokomotive, eine reichliche Kostenreserve darstellt.

Die Personalkosten dieses Titels können, bezogen auf gleiche Verkehrsleistung, um etwa 33% herabgesetzt werden.

Daß es sich hier durchaus nicht nur um eine theoretische, sondern in der Praxis bewährte Möglichkeit handelt, beweist die Rhätische Bahn, die in ihrem Liniennetz von etwa 270 km Länge mit Ausnahme einer vergleichsweise kurzen Strecke bereits die einmännige Bedienung der Lokomotiven eingeführt hat.

Die Personalkosten je Einheit der Verkehrsleistung, dem Bruttotonnenkilometer, verringern sich weiter durch die größere Verkehrsleistung der Elektrolokomotive. Die Erfahrung lehrt, daß bei gegebener Möglichkeit der Ausnützung der Elektrolokomotiven diese im Jahresdurchschnitt die doppelte Bruttotonnenkilometerzahl bewältigen können, als scheinbar oder konstruktiv gleichwertige Dampflokomotiven. Dieses Ergebnis wird durch die viel größere Betriebsbereitschaft der Elektrolokomotive erzielt, die bis 23 Stunden im Tage im Dienst gehalten werden kann und keines nennenswerten Zeit- oder Arbeitsaufwandes zur Indienststellung bedarf. Wertvoll sind die diesbezüglichen Angaben von Parodi, die sich auf den mehr als zwanzigjährigen Betrieb der Paris-Orléans-Bahn beziehen.

Die mittlere Kilometerleistung einer elektrischen Lokomotive betrug im Personenverkehr im Jahre 1920 58000 Lokomotivkilometer gegen 37000 km der Dampflokomotive, also 57% mehr. Im Güterverkehr erreichte eine elektrische Lokomotive im Mittel sogar eine Mehrleistung von 81%, das sind 43000 km gegen 22667 km; dabei handelt es sich hier um vergleichsweise kurze Bahnstrecken mit ungünstigen Ausnutzungsmöglichkeiten.

Da die mittlere Zuglast bei elektrischem Betrieb auch höher ist als bei Dampftrieb, folgt das durch die Erfahrung erhärtete Ergebnis, daß eine elektrische Lokomotive zumindest die doppelte Anzahl Bruttotonnenkilometer zu leisten vermag als eine Dampflokomotive; weiter folgt, daß — unberücksichtigt der an sich niedrigeren Entlohnung des Führers der Elektrolokomotive und, wie bereits gezeigt wurde, der praktisch durchaus möglichen einmännigen Bedienung — die Personalkosten je Bruttotonnenkilometer bei elektrischer Zugförderung kaum die Hälfte des bei Dampftrieb erzielbaren Satzes erreichen werden. (Butte-Anaconda-Bahn 1:2,27.)

Die Kosten der Betriebsstoffe: Brennmaterial und Stromkosten.

Die elektrische Zugförderung verbraucht, wenn man von den unbedeutenden Verlusten in den ortsfesten Abspannern absieht, wenigstens bei Wechselstrombetrieb keine Arbeit während des Stillstandes der Lokomotiven, und selbst wenn dies der Fall ist, wie z. B. beim Drehstrom-Gleichstromsystem mit umlaufenden Umformern, so lassen sich diese Arbeitsverluste berechnen und ihr Anteil auf den Verkehrsverbrauch bewerten.

Der Stromverbrauch je Tonnenkilometer der gesamten Zuglast, einschließlich Lokomotivgewicht, kann auf Grund der physikalischen Größen der dynamischen Lokomotivarbeit exakt berechnet werden. Der Stromverbrauch bezogen auf die verkehrstechnisch gebräuchliche Rechnungsgröße, das Bruttotonnenkilometer (Btkm), ergibt sich dann aus dem Verhältnis des gesamten Zugsgewichts zur Anhängelast. Anhaltspunkte zur Kontrolle der Rechnung liefern außerdem die Betriebsergebnisse anderer Linien mit ähnlichen Anlageverhältnissen.

Nicht so einfach erfaßbar ist der dem Stromverbrauch der elektrischen Zugförderung gegenüberzustellende Aufwand für Brennstoffe beim Dampftrieb. Es fehlt nicht an Versuchen, den Brennstoffverbrauch durch Erfahrungsgesetze zu erfassen, doch gelten die so gefundenen Formeln streng nur für denjenigen Bahnbetrieb, aus dessen Ergebnissen sie abgeleitet wurden. Derartige Formeln können lediglich dem Zweck dienen, über die Größenordnung und Art der einschlägigen Verhältnisse Aufschluß zu geben und ersetzen keinesfalls die genaue Nachrechnung des jeweiligen Falles.

Daß es keine Formel geben kann, die allgemein gültig, etwa in Zusammenhang mit den Neigungsverhältnissen der Strecke, den Kohlenverbrauch erfassen kann, folgt aus der Tatsache, daß der Kohlenverbrauch je Bruttotonnenkilometer unabhängig von der dynamischen Leistung außerordentlichen Schwankungen unterworfen ist.

Der Kohlenverbrauch wird wesentlich von der Ausnützung der Dampflokomotive beeinflußt; dieser Umstand ist nach Sanzin von solcher Tragweite, daß selbst mit Lokomotiven älterer Bauart, also mit minderwertigem kalorischem Wirkungsgrad, geringere Kohlenverbrauchszahlen erzielt worden sind als mit leistungsfähigen neuzeitlich eingerichteten Maschinen, wenn diese nicht ausgenützt waren.

Dampflokomotiven arbeiten nur bei bestimmten Geschwindigkeitsverhältnissen wirtschaftlich; wird die Geschwindigkeit aus Verkehrsrücksichten geändert, so drückt sich dies sofort im gesteigerten Kohlenaufwand aus.

Die Größenordnung des Kohlenverbrauches setzt den anwendbaren Bahnneigungen in Zusammenhang mit den erzielbaren Einnahmen bestimmte Grenzen. Nach Parodi ist die anwendbare Grenzsteigung 40 bis 60⁰/₀₀ bei Dampfbetrieb und 120 bis 140⁰/₀₀ bei elektrischer Traktion. Diese Angaben stimmen gut mit den allgemein gewonnenen Erfahrungen überein. Aus dieser Gegenüberstellung ist zu folgern, daß jenseits bestimmter Bahnneigungen nur mehr elektrischer Betrieb in Frage kommen kann.

Parodi stellt für die Kohlenkosten der Linien der Paris-Orléans-Bahn folgende Rechnung auf:

Es bezeichne Q den Kohlenverbrauch in Tonnen je Kilometer Bahnstrecke und C den Preis je Tonne Kohle; dann sind die Ausgaben für Brennstoff je Bahnkilometer QC .

Parodi setzt des weiteren voraus, daß die Ersparungen in den Erhaltungskosten der Fahrzeuge sich im Verhältnis zum Kohlenpreis ändern. Die letztere Ersparnis erreicht jetzt nach den Erfahrungen der Paris-Orléans-Bahn frz. Fracs. 1.— gegen 0,30 vor dem Kriege. Die Kohle kostet etwa frz. Fracs. 100.— je Tonne (1923), so daß diese Ersparnis durch die Formel

$$0,10 + 0,009 C$$

ausgedrückt werden kann.

Für Bahnen mit anhaltenden Neigungen von etwa 15⁰/₀₀ ist dieser Wert um $\varepsilon = 25$ ⁰/₀ höher anzusetzen.

Je Zugkilometer beträgt der Kohlenverbrauch bei der Paris-Orléans-Bahn 28 kg (Preußisch-Schlesische Gebirgsbahnen je Lokomotivkilometer 17,6 kg, Salzburg-Berchtesgaden 17,8 kg), so daß sich der Zusammenhang zwischen dem Kohlenverbrauch je Kilometer Strecke und der tonnenkilometrischen Verkehrsleistung wie folgt berechnet:

$$\text{Gefahrene Zugkilometer} \dots \dots \dots \frac{1000 Q}{28};$$

$$\text{Kohlenverbrauch hierfür} \dots \frac{1000 Q}{28} \cdot (0,1 + 0,009 C) \cdot (1 + \varepsilon).$$

Dieser Ausgabe sind die Kosten für die elektrische Betriebskraft sowie für Zinsen und Tilgung aufgewendeten Kapitals gegenüberzustellen.

Nach übereinstimmender Feststellung von Parodi für die französischen Bahnen und Donati für Italien können im Kostenvergleich die Anschaffungskosten der elektrischen Lokomotiven ausgeschieden werden, indem sich die Kosten, bezogen auf gleiche Verkehrsleistung, als gleich hoch erwiesen haben.

Für englische Verhältnisse wird angegeben, daß eine elektrische Lokomotive etwa das Doppelte kostet wie eine Dampflokomotive; da auch in diesem Land festgestellt wurde, daß die jährliche Transportleistung der Elektrolokomotive doppelt so groß ist als diejenige der Dampflokomotive, erscheint die Feststellung Parodis bestätigt, daß für den Fall gleichzeitiger Neubeschaffung von Lokomotiven beider Art im wirtschaftlichen Vergleich die Anschaffungskosten ausscheiden. Diese Feststellung hat im allgemeinen nur theoretisches Interesse, da die Wahl zwischen der Anschaffung von elektrischen oder Dampflokomotiven selten zu treffen sein wird. Die Eisenbahnverwaltun-

gen haben meist mit vorhandenen Einrichtungen für den Dampfbetrieb zu rechnen und es interessiert sie der Vergleich zwischen den Kosten der beiden Betriebsarten nur in dem Sinn, ob für die tatsächlich aufzuwendenden Summen ein Ertrag aus den Ersparnissen herausgewirtschaftet werden kann. Daß der so gestellte Vergleich theoretisch falsch ist, ändert nichts an dieser Sachlage.

Angenommen, es wäre wahlweise die Beschaffung von elektrischen oder Dampflokomotiven nötig und es trifft die obige Feststellung der Gleichwertigkeit beider Betriebsarten zu, so belastet den elektrischen Betrieb nur der Geldaufwand für die Bahnleitungen und die Unterwerke, wogegen diese Ausgabengruppe bezüglich der Kraftwerke und Fernleitungen schon im Strompreis berücksichtigt werden kann.

P sei der Geldaufwand je Kilometer für obige Einrichtungen und r der Zinsfuß, den das Geld kostet, so entstehen aus diesem Titel

$$\frac{Pr}{100} \text{ Jahreskosten.}$$

Der Stromverbrauch je Streckenkilometer kann durch den Term

$$\frac{1000 Q}{\lambda}$$

ausgedrückt werden, wobei λ diejenige Kohlenmenge in Kilogramm bezeichnet, die die Arbeit einer kWh zu ersetzen vermag. Nach Angaben von amerikanischen Bahnen und von Parodi für die Paris-Orléans-Bahn ist $\lambda = 2,5$ bis $3,5$ kg, für Vorortzüge eher $4,0$ als $3,5$ kg. Ist p der Preis der elektrischen Kraft, so sind die Stromkosten

$$\frac{1000 Q p}{\lambda}.$$

Der Ersatz des Dampfbetriebes durch die elektrische Zugförderung erscheint gerechtfertigt, wenn zumindest diese oben berechneten Hauptgruppen der Ausgaben sich das Gleichgewicht halten:

$$C + 0,028 Q (0,10 + 0,009 C) (1 + \varepsilon) = \frac{1000 Q p}{\lambda} + \frac{Pr}{100}.$$

In diesem Ausdruck bleiben auch noch die Betriebskosten der Unterwerke und diejenigen der Erhaltung der ortsfesten Anlagen unberücksichtigt, diese können durch eine entsprechende Steigerung des Strompreises berücksichtigt werden.

Der unter bestimmten Verhältnissen ($P, r, c, \varepsilon, p, \lambda$) gleichwertige kilometrische Kohlenverbrauch berechnet sich somit aus der Gleichung

$$Q = \frac{0,01 Pr}{C [1 + 0,32 (1 + \varepsilon)] + 3,57 (1 + \varepsilon) \frac{1000 p}{\lambda}}.$$

Für ebene Linien ($\varepsilon = 1$) wird

$$Q = \frac{0,01 Pr}{1,32 C + 3,57 - 1000 \frac{p}{\lambda}}.$$

Die Anlagekosten, soweit sie in dieser Theorie überhaupt erscheinen, beziffert Parodi je Kilometer wie folgt:

	Frz. Fracs. (1923)
Viergleisige Linie	800 000.—
Dreigleisige „	650 000.—
Zweigleisige „	470 000.—
Eingleisige „	250 000.—

Auf Grund dieser Annahme berechnen sich die Grenzwerte des Kohlenverbrauchs (Q^t) je Bahnkilometer laut Tabelle.

C Frcs.	Flachlandlinien Festwerte $\varepsilon = 0, \lambda = 3, \gamma = 8,5, p = 0,10$ Frcs.				Gebirgsbahnen $\varepsilon = 0,25, \lambda = 3,3, \gamma = 8,5, p = 0,09$	
	Anzahl der Geleise					
	4	3	2	1	2	1
120	530	430	310	165	275	146
110	590	480	348	184	304	162
100	665	540	390	208	340	181
90	765	620	448	239	380	206
80	900	730	527	281	448	238
70	1085	880	638	340	530	282
60	1380	1120	808	430	652	347
50	1880	1525	1100	588	846	450

Dieser Ableitung und den aus derselben gewonnenen Resultaten kann keineswegs eine allgemeine Gültigkeit zuerkannt werden, sie sollen lediglich über die Größenordnung der Zusammenhänge orientieren. Es ist einleuchtend, daß man an Stelle der Errechnung des für die beiden Betriebsarten paritätischen Verkehrs, von dem für die betrachtete Strecke gegebenen Verkehr und den tatsächlich vorliegendem Kohlenpreis ausgehend, den paritätischen Stromkreis errechnen kann. Bei einem höheren Strompreis besteht dann keine geldliche Gleichwertigkeit beider Betriebsarten.

Daß es unzulässig ist, die aus den Erfahrungen eines bestimmten Bahnnetzes gewonnenen Zahlen ungeprüft auf andere Bahnen zu übertragen, geht aus der großen Verschiedenheit der Anlagekosten und anderer Betriebszahlen hervor. In den Angaben wirkt auch verwirrend die ungenügende Berücksichtigung der Entwertung der Währungen der verschiedenen Länder.

Durchschnittliche Kosten der elektrischen Einrichtung je Kilometer:

Italienische Staatsbahnen	Lire	141 000.—
Rhätische Bahnen	Schw. Frcs.	68 000.—
Schweizer Bundesbahnen (einschl. Kraftwerke) . .	" "	275 000.—

Bei Ermittlung der Wirtschaftlichkeit darf auch die besondere Art des Verkehrs nicht außer acht gelassen werden. In diesem Belang ist es z. B. wichtig, den Anteil des Kohlenverbrauchs für den Verschubdienst zu kennen. Die Tragweite dieses Umstandes beleuchtet die Angabe von Bearce, der für den Fahrbetrieb die Gleichwertigkeit der Transportleistung von 3,2 kg am Lokomotivrost verbrannter Kohle mit einer der Elektrolokomotive zugeführten kWh nachweist. Im Verschubdienst leistet 1 kWh das gleiche wie 13,2 kg Kohle am Tender, das heißt in diesem Dienstzweig können selbst bei kalorischer Erzeugung des Stromes 75 bis 85% Kohle erspart werden. Diese hohe Ersparnis macht die bedeutende, durch schlechte Ausnützung der Verschubgeleise verursachte Belastung durch Kapitalzinsen wett.

Im Falle einer auf einen bestimmten Fall bezughabenden Berechnung der Wirtschaftlichkeit wäre es falsch, mit dem Strompreis als festen Satz zu rechnen. Die Verringerung der Stromkosten durch gesteigerte Ausnützung des Kraftwerkes wirkt sich insbesondere bei hydraulischen Anlagen im Eigenbesitz der Bahnunternehmung voll aus. Schon im Rahmen der Stromerzeugung wurde der Umstand erwähnt, daß kein Anlaß vorliegt, einen der absoluten Höhe nach ungünstigen Strompreis für den Bahnbetrieb anzunehmen, weil die Ausnützung eine durchaus günstige ist.

Für die italienischen Bahnen rechnet Donati mit einer Ausnützung der installierten Leistung des Kraftwerkes bis zu 38⁰/₀, das sind 3400 Stunden im Jahre. Smith weist für die englischen Eisenbahnen eine Ausnützung von 37⁰/₀ nach (14 Bahnen verbrauchen 400 Millionen kWh bei 123000 kW Leistung).

Unter Annahme der seit dem Krieg um etwa 50⁰/₀ erhöhten Baukosten je ausgebauten kW eines hydraulischen Kraftwerkes von rund Goldkr. 1500.— und 15⁰/₀ Gesamtaufwand für Zinsen und Betrieb kostet das kW-Jahr (Gold) K. 225.— und die kWh 2,6 Goldheller \simeq 2,75 C. (Schweiz). Der früher erwähnte Preis, den die Rhätische Bahn bezahlt, entspricht somit einer Ausnützung von

$$\frac{2,75}{9,00} \cdot 8760 = 2680 \text{ h, das sind } 30\%.$$

Die formelmäßige Behandlung des Vergleiches der Erhaltungskosten der elektrischen und der Dampflokomotiven nach der Hypothese von Parodi ist für andere Betriebe kaum anwendbar. Für die Vorberechnung dieser Kosten können eher die zahlenmäßig ausgewiesenen Ergebnisse anderer Betriebe verwertet werden.

Vergleich der Erhaltungskosten elektrischer und Dampflokomotiven bezogen auf die gleiche Verkehrsleistung (Bruttotonnenkilometer).

Bahnunternehmen	Verhältnis elektrische : Dampf
Chicago-Milwaukee-St. Paul	1 : 5,0
Butte-Anaconda	1 : 3,2
North Eastern	1 : 4,0
Italienische Staatsbahn	1 : 2,5
Rhätische Bahn	1 : 2,8
Amerika (Bearce)	1 : 5,0

Der Minderverbrauch an Schmier- und Putzmittel kann bei elektrischem Betrieb, bezogen auf das Bruttotonnenkilometer, mit 25 bis 50⁰/₀ geschätzt werden.

Im Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeit darf auch die Tragweite der Systemfrage nicht außer acht gelassen werden. Unausgesprochen ist dies in dem Sinn schon vollwertig geschehen, als die Bedeutung der Anlagekosten für die ortsfeste elektrische Einrichtung hervorgehoben wurde. Schwacher Verkehr setzt niedriges Anlagekapital voraus, woraus ohne weiteres auf das anwendbare System hingewiesen wird.

Die technische Eignung muß natürlich auch volle Bewertung finden, wenn auch feststeht, daß technisch mit jedem der drei bzw. vier gebräuchlichen Systeme jede Vollbahnaufgabe gut gelöst werden kann.

Bei Systemen, die Unterwerke mit umlaufenden Maschinen benötigen, belasten die Kosten des Bedienungspersonals die Stromkosten.

In Italien kostete die Bedienung eines solchen Unterwerkes vor dem Krieg (Gold) L. 10000,—, im Jahre 1920 L. 50000,—.

In bezug auf die Systemfrage weist Donati mit Recht darauf hin, daß sich diese — gute Ausnützung der Anlagen vorausgesetzt — in der Rentabilitätsrechnung des gesamten Bahnbetriebes kaum auswirken kann, weil die Kosten der Zugförderung nur 16 bis 17⁰/₀ der gesamten Auslagen erreichen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß selbst für vergleichsweise geringe Verkehrsleistungen erprobte technische Lösungen zur Verfügung stehen, um die wirtschaftliche Gleichwertigkeit des elektrischen Betriebes gegenüber dem Dampftrieb zu erzielen, indem schwache Verkehrsleistung durch geringe Anlage- und Betriebskosten ausgeglichen werden können. Die einzelnen Fälle sind an Hand von Erfahrungszahlen, die nicht ungeprüft angewendet werden dürfen, zu untersuchen, da sich allgemeine Regeln nicht geben lassen.

Beispiele.

Italien. Betreffend die Rentabilität der elektrischen Zugförderung auf den italienischen Staatsbahnen macht Donati die folgenden Angaben:

Kosten (Lire) je 1000 virtuelle Bruttotonnenkilometer.

	Dampf- betrieb	Elektrischer Betrieb	
		ganzes Netz	Ligurisches Netz und Frejusstrecke
Kohle (L. 248,46 je Tonne) bzw. elektrischer Strom	13,15	1,60	1,51
Personal, Schmierung, Verschiedenes, Wasserbeschaffung	1,61	1,12	1,04
Erhaltung der Lokomotiven	1,22	0,77	0,62
Erhaltung der elektrischen Einrichtungen	—	1,00	0,78
Zinsen, Tilgung der elektrischen Einrichtungen	—	1,42	1,13
Allgemeine Ausgaben	0,42	0,45	0,37
Insgesamt Lire	17,04	7,17	6,07

In dieser Aufstellung fehlen eigentlich die Kosten für den Zinsendienst derjenigen Dampflokomotiven, die an Stelle der elektrischen Lokomotiven angeschafft hätten werden müssen. Weiter auch diejenigen Beträge, die durch die Verwertung der freigewordenen Dampflokomotiven zur Verfügung stehen. Es kommt auch der wesentliche Vorteil nicht zum Ausdruck, daß man ohne Elektrifizierung eine Reihe zweiter, dritter und vierter Geleise, und zwar in außerordentlich schwierigem Terrain, hätte bauen müssen.

Die für elektrischen Betrieb eingerichteten Strecken waren durchaus an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit angelangt.

Der Mittelwert der je Streckenkilometer beförderten Bruttotonnenkilometer auf den mit Dampf betriebenen Strecken beträgt 2,729 651 je Jahr und hat seit 1914 eher eine Verminderung um mehr als 10% gegen den erreichten Höchstwert erfahren. Demgegenüber weisen die elektrifizierten Linien seit 1914 durchaus eine etwa 100%ige Verkehrssteigerung auf und erreichten im Jahre 1919 etwa 12 000 000 Bruttotonnenkilometer/Jahr, d. h. des 4,36fache. Auf den beiden Giovi-Linien konnte durch den elektrischen Betrieb die Jahresleistung nach einem Jahre von 500 Millionen virtuellen Bruttotonnenkilometer auf 1200 Millionen gesteigert werden. Auf der Strecke Busso-leno-Modane stieg die Leistung von 1 835 000 Bruttotonnenkilometer auf 8 570 000 virtuelle Bruttotonnenkilometer. Der jährliche Kohlenverbrauch je Kilometer der letztgenannten, zu 37% eingleisigen und 63% zweigleisigen Gebirgsstrecke berechnet sich zu etwa 453 t (0,0529 kg/virtuelle Bruttotonnenkilometer, etwa 0,265 kg/wirkliche Bruttotonnenkilometer, Chicago-Milw.-St. Paul-Bahn 492 t).

Die Anlagekosten nach Parodi würden je Kilometer etwa frz. Frs. 400 000,— erreichen dürfen, wogegen für die italienischen Bahnen nur L. 141 000,— ausgewiesen erscheinen; hieraus folgt die hohe Rentabilität der Elektrifizierung in Italien. Die Unstimmigkeit in den Anlagekosten läßt sich durch den Umstand erklären, daß die italienischen Einrichtungen zum Großteil noch in Goldlire bezahlt wurden.

In Übereinstimmung mit diesem Ergebnis geht aus der obigen Donatischen Vergleichstabelle hervor, daß der elektrische Betrieb noch bei einem Kohlenpreis von Lire 40 bis 60 (für das ganze Netz genau Lire 62) rentabel wäre. Die Kohle kostete jedoch Lire 248,46, also das vierfache, womit die wirtschaftliche Überlegenheit des elektrischen Betriebes augenfällig wird.

Schweiz. Für die Schweizer Bundesbahnen konnte bei den heutigen Kohlenpreisen ein derartig günstiges Ergebnis nicht errechnet werden, weil die Anlagekosten mit den hohen Kriegspreisen außerordentlich belastet sind. Der Paritätspreis der Kohle wird für einen gegenüber dem Jahre 1911 um etwa 30% gesteigerten Verkehr zu

schw. Fracs. 67.— bis 74.— je Tonne Kohle errechnet, wobei die Kohle (1922) Fracs. 60.— kostete. Nichtsdestoweniger zeitigte auch hier der elektrische Betrieb solche Vorteile, daß eine Beschleunigung der Elektrifizierung beschlossen wurde.

Für die Rhätische Bahn ist der Paritätspreis zu schw. Fracs. 88,— je Tonne Kohle berechnet worden, ein äußerst günstig zu nennendes Ergebnis, wenn man beachtet, daß die durchschnittliche Verkehrsleistung dieser Bahn nur 547000 Bruttotonnenkilogramm je Kilometer mit etwa 54,7 t Kohlenverbrauch je Kilometer erreicht. (Das ist etwa $\frac{1}{3}$ desjenigen spez. Kohlenverbrauchs, den Parodi für eine eingleisige Gebirgsbahn bei 120 frz. Fracs. \simeq 40 schw. Fracs. als „paritätisch“ nachweist).

Der wirtschaftliche Erfolg des elektrischen Betriebes der Rhätischen Bahn erscheint vorläufig auch dadurch ungünstig beeinflusst, daß der Strom aus einem bahnfremden Werk zu einem vergleichsweise hohen Preis, schw. Fracs. 0,09 je kWh, bezogen wird.

Amerika. Die in Amerika in bezug auf die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Betriebes erzielten Ergebnisse besitzen besondere Beweiskraft, weil hier Betriebsergebnisse von ausgedehnten Bahnnetzen, die außerdem schon viele Jahre elektrisch betrieben werden, zur Verfügung stehen. In besonders übersichtlicher Weise sind die diesbezüglichen Ergebnisse von Bearce für die im Gebiete der sog. „Super Power“-Zone der Staaten New York (östlicher Teil), Massachusetts, Connecticut, New Jersey, Pennsylvania (östlicher Teil), Maryland zu elektrifizierenden Bahnen veröffentlicht worden. Diesem Bericht ist zunächst das bereits anderwärts erwähnte Ergebnis zu entnehmen, daß festgestellt wurde, daß 3,4 bis 3,8 kg am Lokomotivrost verbrannte Kohle für die Leistung einer im Kraftwerk erzeugten kWh aufzuwenden sind. Dies gilt für den Streckendienst; im Verschubdienst sind sogar 13,2 kg Kohle erforderlich; da eine kWh mit etwa 1,0 kg Kohle erzeugt werden kann und die Stromkosten bei hydraulischer Erzeugung auch keinen höheren Betrag erreichen, kann die Ersparnis in diesem Dienstzweig etwa 90% erreichen.

Auf gleiches Lokomotiv-Treibgewicht (100 am. t) bezogen, verhalten sich die Erhaltungskosten (Dampf:elektrisch) für den Lokomotivkilometer wie 31,0 (Cents) zu 6,07, d. h. sie sind bei letzterer Betriebsart etwa 20%. Auf die gebräuchliche Leistungseinheit, den Bruttotonnenkilometer, bezogen, ist dieser Satz etwa noch zu halbieren, da die Jahresleistung der elektrischen Lokomotive etwa den doppelten Wert der Dampflokomotive erreicht.

Die Erhaltung der Fahrleitung je Kilometer Doppelgeleis kostet rund Dollar 373,—, für Einfachgeleis Dollar 250,—. Der Betrieb und die Erhaltung eines Unterwerkes erfordert einen jährlichen Aufwand von Dollar 1,5 je kWh, wodurch sich die gelieferte kWh bei etwa 2200 h Inanspruchnahme um 0,07 Cent verteuert.

Die Personalkosten im Güterzug- und Verschubdienst erreichen bei elektrischem Betrieb nur 75 bzw. 67% derjenigen des Dampfbetriebes.

Es wurden 40 Bahnbetriebe des „Super Power“-Gebietes durchgerechnet und diejenige für den elektrischen Betrieb als reif bezeichnet, bei welchen die erzielte Ersparnis mehr als 10% des für die Elektrifizierung aufgewendeten Kapitals beträgt. Es waren die 30 Bahnbetriebe mit Ersparnissen von 12,2 bis 19,0%, im Mittel 14,2%, bezogen auf das Anlagekapital für den elektrischen Betrieb. Dieses Ergebnis ist um so bemerkenswerter, als es sich keineswegs um Bahnen mit spezifisch hohem Kohlenverbrauch, also Gebirgsbahnen, handelt. Dies geht aus dem Kohlenverbrauch hervor, der mit 0,0264 kg/Bruttotonnenkilometer gegenüber der Chicago-Milw.-St. Paul-Bahn mit einem Verbrauch von 0,0725 kg/Bruttotonnenkilometer angegeben wird. Über den Umfang dieser Anlagen gibt die Tatsache Aufschluß, daß der Bahnbetrieb dieser Strecken bei 850000 kW Leistung eine Arbeitsmenge von 4400 Millionen kWh verbraucht. Die Inanspruchnahme der installierten Leistungen erreicht 5180 h je Jahr, das sind 59% (!) der eingebauten Leistung.

Aus den Betriebsberichten (Fortenbaugh) der Paulista-Bahn (Brasilien) sind folgende Ergebnisse des elektrischen Betriebes zu entnehmen:

	Dampf-	Elektrischer	Vom Dampf-	
	betrie			betrie
	je Zugkilometer			
	Cents	Cents	%	
Brennstoff-Stromkosten	23,30	8,14	35,0	
Reparatur der Lokomotiven	5,67	1,44	25,4	
Personalkosten	9,04	5,69	63,0	
Unterwerke	—	1,27	—	
Leitungsanlagen	—	0,60	—	
	38,01	17,23	45,3	

Es ist zweifellos, daß dieser Betriebserfolg eine ausreichende Verzinsung für das aufgewendete Kapital erzielen läßt.

III. Lebensdauer der der Abnutzung unterworfenen Bestandteile.

Beneke: Wirtschaftliche Wagenunterhaltung. VT 1922, H. 44.

Drescher: Erfahrungen aus dem Straßenbahnbetriebe. EKB 1922, H. 19.

Kammerer: Krankheiten der Zahnräder von Straßenbahnwagen. EB 1923, H. 6.

Mattersdorf: Normung und Wartung. VT 1921, Nr. 24.

Pirch: Winke zur Erzielung von Strom- und Betriebsmaterialersparnissen in Straßenbahnbetrieben. VT 1921, Nr. 230.

Stahl: Abnutzung und Lebensdauer der wesentlichsten Teile des rollenden Materials bei der Straßenbahn. JSKV 1908.

Willenberg: Ölverbrauch bei Ankerlagern von Straßenbahnen. VT 1921, H. 28.

Wiswell: Meßgerät zur Aufzeichnung der genauen Querschnittsform von Fahrleitungen. ERJ 1921, Bd. 58, S. 904. — 1922, Bd. 59, S. 118. — Ref. ETZ 1922, H. 24.

Aus dem Werkstattdienst der Norfolk and Western-Bahn. ERJ 1923, Bd. 62, Nr. 7.

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 Oberbausysteme verleiten lassen. Hierbei blieb meist die ungeahnte Verdichtung des Verkehrs gegenüber dem Pferde- und Dampftrieb 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 dichtbefahrene 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 Kapitalsaufwand macht sich durch niedrige Betriebskosten, geringen Stromverbrauch und 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 Gleis 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 betragen, wogegen für Holzmasse kaum mehr als 10 bis 12 Jahre angenommen werden können.

Das Spannwerk unterliegt der Verrostung und wird innerhalb von 15 bis 20 Jahren zu erneuern sein. Ebenso die Hartgummiisolation. Nach vorliegenden Erfahrungen ist die Lebensdauer der Porzellanisolatoren unbegrenzt; jedenfalls ist bei den meisten bestehenden Anlagen ein Ersatz für absehbare Zeit nicht zu erwarten.

Einer von der Fahrleistung abhängigen Abnutzung unterliegt der Fahrdraht. Die Abnutzung 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-Fahrdraht in einem Betriebsjahre durch 18250 Stromabnehmer eine Abnutzung von 0,14 mm, im Durchmesser gemessen, erfahren hat. Für diesen Fahrdrahtquerschnitt 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 Stromabnehmern rechnen, so daß sich die Lebensdauer entsprechend auf 8 bis 10 Jahre verringert.

Bezüglich der Abnutzung der Rückleitung können bei der Vielartigkeit der Systeme einigermaßen zuverlässige Angaben nicht gemacht werden. Der Zustand und die Widerstandsfähigkeit des Oberbaues sind diesbezüglich entscheidende Faktoren, wenn ein an sich gutes Verbindersystem 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, da selbst die primitiven Fahrzeuge aus der Erstlingszeit der elektrischen Zugförderung trotz ihrer Unvollkommenheit noch nach 15 bis 20 Jahren in Benützung standen und stehen.

Unabhängig von dieser das ganze Fahrzeug betreffenden Lebensdauer sind die einzelnen Bestandteile einer mehr oder weniger starken Abnutzung unterworfen.

Die Lebensdauer der Radreifen kann mit 70 bis 80 000 Wagenkilometer angesetzt werden. Griffinräder (Hartgüßräder) 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 gilt als Höchstmaß 0,5 mm. Der Zustand der Lager ist bestimmend für die Lebensdauer der Zahnräder. Der Zahneingriff ist nur dann einwandfrei, d. h. es findet eine Berührung der Zähne in voller Breite nur dann statt, wenn Ankerwelle und Tragachse parallel liegen.

Die Lager von Bahnmotoren, insbesondere jene der schmalspurigen Typen, sind verhältnismäßig hoch beansprucht, es darf daher nur hochwertiges Lagermetall (80 bis 90% Cu, 17 bis 9% Sn, 0,76 P) verwendet werden.

Gute Ergebnisse liefern Beusch-Lagerfutter; bei diesem System wird die Lebensdauer der Lagerschale durch eingesetzte Kieselsteine gesteigert. Nach Haller laufen Ankerlagerschalen 15 000 bis 20 000, sog. Beuschlager 66 000 km; bei Anwendung von Wellen mit entsprechend vergrößertem Durchmesser ist eine Lebensdauer dieser Lagerfutter bis 240 000 km erzielt worden.

Bei Motoren mit Leistungen bis etwa 60 bis 70 PS scheinen sich zweckmäßig gebaute Kugellager und Rollenlager 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; für Anhängewagen sind dieselben Zahlen 0,63 bzw. 0,96 g/km. Der jährliche Ölverbrauch eines Triebwagens mit Gleitlagern erreicht somit etwa 50 kg, obzwar Angaben vorliegen, wonach Wagen in 250 Betriebstagen durchschnittlich 160 kg Öl je Gleitlager verbrauchten. Demgegenüber wurde ein Ölverbrauch je Rollenlager von 3 kg erzielt, wobei ein Nachschmieren erst nach 9 bis 12 Monaten nötig wurde und die Lager selbst nach Leistungen von etwa 250 000 keinerlei Abnutzung zeigten.

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 300 000 km, Stahlguß als Baustoff vorausgesetzt. Auswechselbare Zahnkränze aus hochwertigen Stahlsorten oder Bronze laufen noch länger; zuverlässige Zahlenwerte liegen hierüber nicht vor.

Die Ritzel aus Siemens-Martinstahl laufen unter den gleichen Voraussetzungen 50 bis 60 000 km. Im Betriebe der Butte, Anaconda & Pac. Bahn erreichten die Ritzel der 320 PS/h-Motoren eine Verkehrsleistung von 160 000 km; der Zahndruck beträgt hierbei etwa 18 kg/cm Zahnbreite. Härtung der Ritzel und sorgfältige Herstellung der Verzahnung steigert die Lebensdauer des Vorgeleges wesentlich. Die Steigerung der Lebensdauer ist nicht so sehr vom Standpunkt der Kosten der zu ersetzenden 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 Abnutzung. Für beide ist 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/s nicht übersteigen. Ein Straßenbahnmotor hat meist 4 Bürsten. Die Ch.-M.-StP.-Bahn gibt für den Güterzugdienst eine Lebensdauer der Bürsten von 40 000 km, für die Personenzüge das Doppelte an. Die Kohlenbürsten der Motoren der Butte-Anaconda Lokomotiven laufen 19 500 km.

Glimmer und Kupfer haben nicht die gleiche Wärmeausdehnung, es ist daher für den einwandfreien zylindrischen Zustand der Oberfläche des Kollektors zweckmäßig, den Glimmer zwischen den Lamellen etwa 1,5 mm tief auszukratzen. Geschieht dies nicht so, dürfen die Kollektoren nur in kaltem Zustand geschmirgelt werden, weil sonst nach dem Abkühlen der Glimmer herausragt.

Straßenbahnkollektoren nützen sich etwa um 0,5 mm je 1000 km ab. Die gebräuchlichen Motoren lassen eine Abnutzung um 18 bis 25 mm im Radius zu, woraus sich die Lebensdauer eines Kollektors berechnen läßt. Auf der Liverpool-Southportbahn beträgt die Abnutzung der Kollektoren 4,5 mm im Durchmesser, d. s. etwa 0,5 mm je 10 000 km.

Durch den ununterbrochenen Wechsel der Erwärmungen und Abkühlungen leidet die Isolation der Wicklungen und zwar meist mehr diejenige des Ankers als des Feldes. Letztere ist 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%₀ der Ersatzkosten zu bewerten.

Den Fährnissen des Betriebes sind insbesondere die Widerstände ausgesetzt, so daß das aktive Material derselben meist nach etwa 10 Jahren ersetzt werden muß.

Die Fahrschalter erfüllen noch nach 20 Jahren gut ihren Zweck, wenn auch einzelne Bestandteile, dem Werte nach etwa ein Drittel des Anschaffungspreises, in dieser Zeit etwa zweimal auszuwechseln sind.

Einer regelmäßigen Abnutzung unterliegen auch 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 10 Jahren zu rechnen.

Schleifstücke aus Aluminium laufen auf Fahrleitungen aus Kupfer im Straßenbahnbetrieb, somit bei mäßigen Strombeanspruchungen, etwa 20 000 km, die Rollen im allgemeinen 8 bis 10 000 km. Nach Pirch kann durch Nickelzusatz eine mittlere Lebensdauer von etwa 25 000 km erzielt werden. Im Betrieb von Überland- bzw. Vollbahnen (Hochspannung) sind mit Schleifbügeln Leistungen bis 40 000 erzielt worden, wogegen für Rollen vereinzelt Angaben bis zu 35 000 km zu finden sind.

Die dreieckigen Bügelrohre aus Messing der Simplonlokomotiven laufen 6000 km. Die bei amerikanischen Gleichstrombahnen gebräuchlichen Walzenstromabnehmer laufen etwa 20 000 km.

Die vorstehenden Angaben beziehen sich überwiegend auf Straßenbahnbetriebe und können nicht ohneweiters für anders geartete Bahnbetriebe verwendet werden; mit ihrer Nennung wird nur der Zweck verfolgt, über die Quellen der Betriebsausgaben einige Anhaltspunkte zu geben.

Anhang.

Kurzer Abriß der angewandten Nomographie in geometrischer Behandlung.

Theorie:

- Konorski: Grundlagen der Nomographie. Berlin: Springer 1923.
Kraus: Die Nomographie oder Fluchtlinienkunst. Berlin: Springer 1922.
Kraus: Die Festigkeit von Zentrifugentrommeln. Zeitschr. für Dampfkesseluntersuchung. Wien 1923, Nr. 10.
Luckey: Einführung in die Nomographie. I. u. II. Teil. Math. phys. Bibl. Berlin: Teubner 1918.
Mandl: Graphische Darstellung von mathematischen Formeln. Wien: Seidl 1902.
d'Ocagne: Nomographie, les calculs effectués au moyen des abaques. Paris: Gauthier-Villars 1899. Calcul graphique et nomographie. Paris 1908.
Ohrlich: Einfache geometrische Darstellung des harmonischen Mittels. Af.E 1919, Bd. VIII.
Pirani: Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik. Berlin: Göschen 1914.
Schilling: Über die Nomographie von M. d'Ocagne. Berlin: Teubner 1917.
Schreiber: Verwendbarkeit der Logarithmen-Papiere beim praktischen Zahlenrechnen. Mb. 1922, H. 2.
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 ou traité des abaques. Paris: Chiron 1921.
Werkmeister: Das Entwerfen von graphischen Rechentafeln. Berlin: Springer 1923.

Anwendungen:

- Antranakian: Formules et abaques pour servir au calcul au point de vue mécanique des lignes aériennes. RGE 1921, Bd. 9, Nr. 16.
Bartus: Die Methode der fluchtrechten Punkte. MMEEK 1922, Nr. 4.
Bloch: Lichttechnische Berechnungen in nomographischer Behandlungsweise. ETZ 1922, H. 3.
Bouchilloux: Note sur la détermination par une abaque à alignement des conducteurs nécessaires à l'alimentation des moteurs asynchron triphasés. RGE 1922, Bd. 11, Nr. 25.
Brodetsky: A first course on Nomography. London: Bell & Sons 1920.
Clark: Theorie générale des abaques d'alignement. Revue de mécanique 1907.
Cook: Simple chart for illumination calculations. EW 1921, Bd. 78, Nr. 18.
Courou: Linientafel zur graphischen Bestimmung von Strompreisen. RGE 1920, S. 801. — Ref. ETZ 1920, H. 49.
Dobbeler: Anwendungsmöglichkeiten von graphischen Rechentafeln. Betr. 1920, H. 5.
Dobbeler: Graphische Preisberechnungen. Maschinenbau 1923, H. 5.
Dobbeler: Grundlagen der Nomographie. Maschinenbau 1923, H. 5.
Dubar: A propos d'abaques pour le calcul des garanties des transformateurs. RGE 1922, Bd. 11, Nr. 17.
Eaton: The construction of abaci. El. 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.
Guntermann: Die wirtschaftlich günstigste Aufteilung der Kosten von Verteilungsleitungen und Transformatorstationen. ETZ 1923, H. 21.
Gut: Ein neues graphisches Verfahren zur Vorausbestimmung der Erwärmung elektrischer Maschinen. BSEV 1918, H. 2.
Hak: Zur Berechnung von Drosselspulen. ETZ 1920, H. 48.
Hak: Beitrag zur Analyse von Wechselstromkurven. ETZ 1921, H. 19.
Hak: Über Fluchtlinientafeln. Zeitschr. f. angew. Math. 1921, S. 159.
Hedges: Solenoid and electromagnet windings. Proc. 1916.

- Hoffmann: Anwendung der Nomographie zur Ermittlung der Schnittzeit für geradlinig spanabhebende Werkzeugmaschinen. Maschinenbau 1923. H. 5.
- Hütte: XX. Aufl., Bd. III, S. 245.
- Jakob: Thomsons Dampf-Nomogramm. ZVDI Bd. 64, Nr. 50.
- Joitel: Einfaches Verfahren zur Trennung der Hysterese- und Wirbelstromverluste in Eisen. EW 1920, Bd. 76, S. 1220. — RGE 1920, Bd. 7, S. 148. — Ref. ETZ. 1921, H. 15.
- Joitel: Nomogrammes pour les calculs mécaniques des lignes aériennes de transmission d'énergie électrique. RGE 1922, Bd. 12, Nr. 2.
- Keinath: Regeln für Meßinstrumente und Meßwandler in verschiedenen Ländern. BSEV 1923, Nr. 3.
- Kun: Nomographic cart for dasigning illumination. EW 1923, Bd. 81, Nr. 14.
- Lacmann: Die Herstellung gezeichneter Rechentafeln. Berlin: Springer 1923.
- Langrehr: Fluchtlinientafel zur Berechnung des Leitungsfaktors bei Dreiphasen-Anlagen und -Apparaten. ETZ 1923, H. 8.
- Lasswitz: Der konstruktive Aufbau genormter Maschinenteile. Maschinenbau 1923/24, H. 4.
- Lavanchy: Nomogrammes et abaques auxiliaires nouveaux pour le calcul électrique des lignes de transmission d'énergie électrique à haute tension. RGE 1921, Bd. 10, Nr. 2 und 1923, Bd. 14, Nr. 21.
- Leistikow: Fluchtlinientafeln für Laufzeiten. Betr. 1920, H. 5.
- Loebe: Zur Berechnung elektrischer Wicklungen. ETZ 1915, H. 34.
- Meyer: Rechentafel zur Leitungsberechnung. ETZ 1921, H. 43.
- Neumann: Dreieckschaubilder für graph. Berechnung. ZVDI 1923, Bd. 67, Nr. 10.
- Oestreicher: Nomographische Tafel für Windmotorpumpwerkanlagen. Technik i. d. Landwirtschaft 1922, H. 2.
- Oltay: Hilfsmittel zur Erleichterung der barometrischen Höhenberechnung. MMEEK 1922, Nr. 27.
- Ott: Fluchtlinientafeln. Betr. 1920, H. 5.
- Ott: Rechentafel zur Berechnung von Holzmasten für elektrische Freileitungen. Eu.M 1921, H. 43.
- Ott: Die Berechnung von Wechselstromfreileitungen auf Spannungsschwankung mit graphischen Hilfsmitteln. (Rechentafel.) M.d.V.d.E 1921, Nr. 282. — Ref. ETZ 1922, H. 43.
- Palme: Wirkungsgrade von Transformatoren bei Teilbelastungen. Eu.M 1914, Nr. 7.
- Pasternak: Beiträge zur Berechnung von Eisenbeton-Querschnitten auf einheitlicher Grundlage. SBZ 1922, Bd. 79, Nr. 20.
- Pernt: Graphische Berechnung der Wassermenge und -leistung. ÖWÖB 1912, H. 49.
- Peter: Die Drahtseilbahn Treib—Seelisberg. SBZ Bd. 69, Nr. 11.
- Petizeau: Etablissement d'un nomogramme pour le calcul approché des lignes de distribution. RGE 1923, Bd. 13, Nr. 13.
- Pornin: Les économies d'énergie dans les exploitations de chemins de fer électriques. RGE 1923, Bd. 13, Nr. 10.
- 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—14.
- Reinhold: Eine Rechentafel für Eisenbetonbau. Der Bauingenieur 1923, H. 4.
- Schwerdt: Fluchtlinientafeln, Grundlagen und Anwendungen auf Fragen der Leitungsberechnung. ETZ 1922, H. 23.
- Seco de la Garza: Les Nomogrammes de l'Ingenieur. Paris: Gauthier Villars 1912.
- Seefehlner: Kollineare Rechentafel zur Ermittlung von Spannung und Durchhang einer Freileitung. Eu.M 1919, H. 52. — EKB 1920, H. 3.
- Seefehlner: Zeichnerische Rechenbehelfe. ETZ 1921, H. 9.
- Siegerist und La Combe: Urteile über die Fluchtlinientafeln. Betr. 1920, H. 5.
- Singer: Rechentafel zur Bestimmung des Durchhanges von Freileitungen. Eu.M 1920, H. 45.
- Stahl: Preisberechnung bei veränderlichen Grundpreisen unter Zuhilfenahme der Rechentafeln. Maschinenbau 1923, H. 5.
- Stritzl: Die Nomographie und ihre Anwendungen im Elektromaschinenbau. ETZ 1922, H. 23.
- Stritzl: Eine nomographische Methode zur Vorausberechnung von Gleichstrommaschinen. Af.E 1922, H. 1.
- Szabó: Fluchtlinientafel zur Berechnung der kritischen Drehzahlen raschiaufender Wellen. Eu.M 1923, H. 35. — ETZ 1923, Nr. 46.
- Thun: Eine Rechentafel zur Ermittlung der optimalen Bearbeitungszeit an Werkzeugmaschinen. Betr. 1921, H. 6.
- Treuler: Fluchtlinientafel für die Berechnung von Anlassern. ETZ 1923, H. 4.
- Vieser: Anwendung der Nomographie auf hydraulische Formeln. ZÖLAV 1910, H. 14 u. 42.
- Vogel: Graphische Tafeln für Festigkeitsrechnungen. Werkstatt-Technik 1922, H. 13. — 1923, H. 2.
- Warner: Induction motor-nomogramm. JAIEE 1921, Bd. 60, Nr. 10.
- Weel: Über einige bemerkenswerte Fluchtlinientafeln zur Berechnung elektrischer Leitungen. EA 1920, Nr. 81.
- Bericht über die technischen Entscheidungen der Pariser intern. Radio-Konferenz. Radio-Review 1922, Bd. 3. — Ref. ETZ 1922, H. 18.

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.

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 Nutzenanwendung auch für andere Ingenieuraufgaben von selbst ergibt.

Die Anwendung des Verfahrens auf eine große Zahl der Praxis entnommener Aufgaben soll den Ingenieur im Berechnungs- und Projektierungsbureau zur Weiterentwicklung dieses Verfahrens anregen. Es sei hervorgehoben, daß insbesondere die Wickeltechnik von Gleichstromankern und von Feldwicklungen, die Lösung von Erwärmungsproblemen ein dankbares Anwendungsgebiet darstellen. Dieses Rechenverfahren ist überall dort, wo Rechnungen mit einer großen Zahl aneinander gebundener Veränderlichen durchzuführen sind, am Platze. Es ist zweifellos ein durch seine Anschaulichkeit unüber-
treffbarer 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. 681).

Die Größen α , die unabhängige Veränderliche und β , die abhängige Veränderliche, werden durch Längen x und y gemessen.

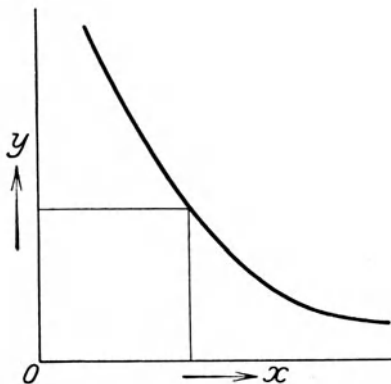


Abb. 681. Darstellung einer Funktion mit zwei Veränderlichen im rechtwinkligen Bezugssystem.

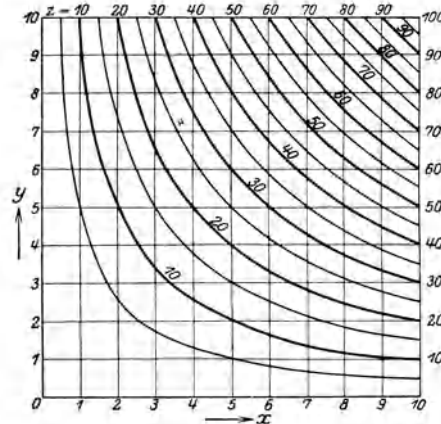


Abb. 682. Produkt-(Netz-)Rechentafel mit rechtwinkligem Bezugssystem für die Funktion $x \cdot y = z$.

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 Längenmaße 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, insolange es sich um den Zusammenhang von nur zwei aneinander gebundenen Veränderlichen handelt. Sie hat vor allem den Vorteil für sich, daß durch Ermittlung der Koordinaten einer verhältnismäßig geringen Punktzahl eine stetige Darstellung des in Frage stehenden Gesetzes gewonnen wird.

Für drei Veränderliche kann dieses Verfahren noch benützt 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. 682).

Das Diagramm enthält somit außer einer Kurvenschar auch noch eine Bezifferung der einzelnen Kurven mit Angabe des Wertes für γ (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 rechtwinkligen 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, soweit 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. 683).

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.

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 räumlichen Ausdehnung keine Vorteile gegenüber der stetigen, bildmäßigen Darstellung durch Kurven im rechtwinkligen 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.



Abb. 683. Funktionsleiter mit Doppelskala für die Beziehung: $y = x^2$.

Die 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 oder zweier Geraden — Index, Suchlinie, Weiser genannt — in den Schnittpunkten dieser mit den drei Skalenträgern die Lösung des durch die Gleichung der drei Veränderlichen gegebenen Zusammenhanges 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:

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 Rechentafelarten miteinander verbunden bzw. 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. 684). 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

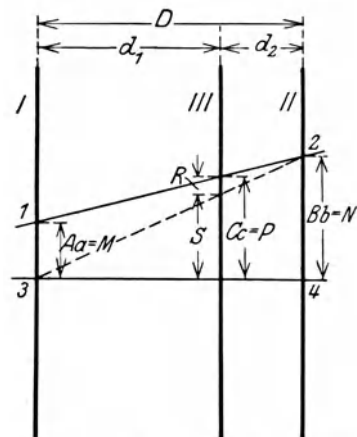


Abb. 684. Geometrie der kollinearen Summenrechentafel.

Achsen 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 d₁ und diejenige zwischen den Skalen III (C) und II (B) sei d₂, 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

$$M = A \cdot a, \quad N = B \cdot b, \quad P = C \cdot c \quad \dots \dots \dots (1)$$

gemessenen Größen (Funktionen)

$$A, B, C$$

auf, so gilt

$$A + B = C, \quad \dots \dots \dots (I)$$

vorausgesetzt, daß die Moduln a, b und c und die Entfernungen d₁ und d₂ gewisse Bedingungen erfüllen.

Ebenso wird

$$f(\alpha) + f(\beta) = f(\gamma),$$

wenn

$$A = f(\alpha), \quad B = f(\beta) \quad \text{und} \quad C = f(\gamma).$$

Die Skalen werden im allgemeinen nicht nach A, B, C, sondern den interessierenden Argumenten α, β, γ beziffert.

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

$$R = M \frac{d_2}{D}, \quad S = N \frac{d_1}{D}, \quad \text{wobei} \quad R + S = P.$$

Die Substitutionen durchgeführt, wird

$$P = M \frac{d_2}{D} + N \frac{d_1}{D},$$

und, da

$$M = Aa, \quad N = Bb, \quad P = Cc$$

geht die Gl. (I) über in die Form

$$Cc = Aa \frac{d_2}{D} + Bb \frac{d_1}{D} \dots \dots \dots (Ia)$$

Wählt man die Entfernungen mit Bezug auf die zwei Moduln 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 (Ia), so wird

$$Cc = A \frac{ab}{a+b} + B \frac{ab}{a+b},$$

und man findet, daß das Grundgesetz

$$\boxed{A + B = C} \dots \dots \dots (1)$$

erfüllt ist, wenn der dritte Modul c

$$c = \frac{ab}{a+b} \dots \dots \dots (2)$$

wird, d. h.

$$\boxed{\frac{1}{c} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}} \dots \dots \dots (2a)$$

Im Sonderfall $a = b$ wird

$$c = \frac{a}{2} \quad \text{und} \quad d_1 = d_2 = \frac{D}{2}.$$

Zeichentechnisch ist es gegebenenfalls, insbesondere wenn das kollineare System einer anderen Rechentafel anzugliedern ist, erwünscht, die Lage der Skalen zu vertauschen.

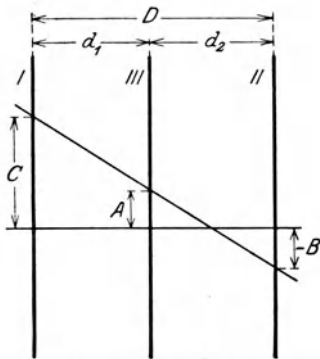


Abb. 685. Schema der Summentafel für $C - B = A.$

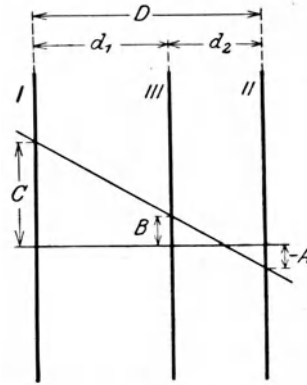


Abb. 686. Schema der Summentafel für $C - A = B.$

Die Umstellung der Grundgleichung (I) weist einen bequemen Weg, um diesen Zweck zu erreichen. Die Grundgleichung (I) kann auch wie folgt geschrieben werden:

$$A = C - B \quad \text{oder} \quad B = C - A \dots \dots \dots (Ia) \text{ u. (Ib)}$$

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. 685 und 686).

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 Veränder-

lichen. Schreibt man diese an, so wird die Skala im allgemeinen nicht mehr gleichmäßig, sondern durch das Gesetz der jeweiligen Funktionen

$$A = f(\alpha), \quad B = f(\beta), \quad C = f(\gamma) \dots \dots \dots (3)$$

bestimmt sein.

6. Das kollineare System mit logarithmischer Skala. Die Gleichung

$$f(\alpha) \cdot f(\beta) = f(\gamma).$$

$$\boxed{A \cdot B = C} \dots \dots \dots (III)$$

kann durch Logarithmieren in die Form

$$\lg A + \lg B = \lg C \dots \dots \dots (4)$$

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 nomographischer Darstellung. Besonders wertvoll wird dieser Kunstgriff zur Lösung von Gleichungen der Form

$$y = a \cdot b^x,$$

ie durch logarithmische Anamorphose in die Gleichung

$$\lg y = \lg a + x \lg b$$

übergehen. Durch entsprechende Substitution kann diese Gleichung in der Form

$$u = m + n v$$

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

$$y = a x^m$$

können logarithmiert

$$\lg y = \lg a + m \lg x$$

in einem logarithmischen Bezugssystem (Ordinaten und Abszissen logarithmisch geteilt) durch die Gerade $v = n + m u$ dargestellt werden, d. h. der $\log y$ ist die lineare Funktion von $\log x$.

Im halb-logarithmischen und logarithmischen System gehen die diese Gleichungen darstellenden Kurven in gerade Linien über, gestatten daher eine bequeme Beurteilung aller sonst nicht übersichtlichen Zusammenhänge.

7. Fluchtlinientafel mit einer krummlinigen Skala (Abb. 687). Funktionen der Form

$$f(\gamma) = F(\alpha) + \Phi_1(\alpha) \cdot \Phi_2(\beta) \dots \dots (II)$$

können durch eine Fluchtlinientafel, bestehend aus zwei parallelen, 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

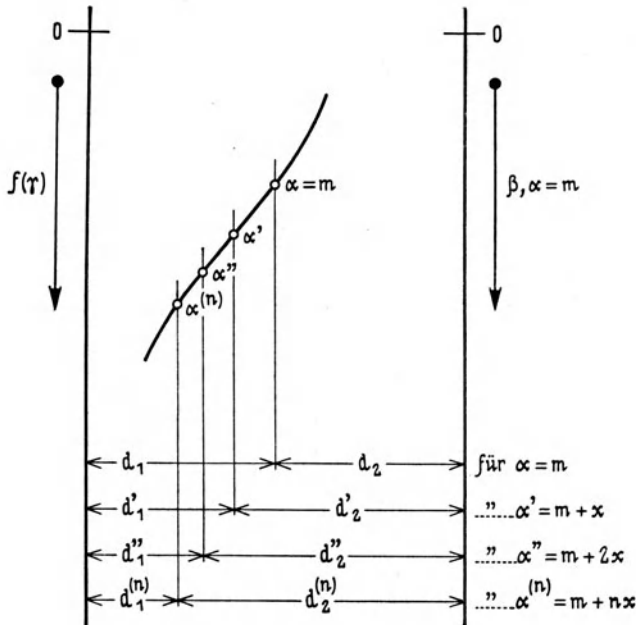
$$f(\gamma) = C, \quad F(\alpha) = A \quad \text{und} \quad \Phi_1(\alpha) \cdot \Phi_2(\beta) = B$$

Abb. 687. Rechentafel für die Gleichung

$$f(\gamma) = F(\alpha) + \Phi(\alpha) \cdot \Phi(\beta).$$

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 ohneweiters 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 die gleichen 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.

8. Die Z-Tafel (Abb. 688). 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 Funktionsskalen gleichmäßige Teilung erhalten können.

Die in Abb. 688 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 Kreuzpunkt 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

$$l = d \frac{n}{p-n} \dots \dots \dots (5)$$

Stellt man mit den Längen l und d die Funktionsgrößen

$$A = \frac{d}{a} \quad \text{und} \quad C = \frac{l}{c}$$

dar, wo a und c die betr. Moduln sind, so geht die Gleichung (5) über in die Form

$$C = A \frac{a}{c} \cdot \frac{n}{p-n} \dots \dots \dots (6)$$

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 , so kann die Rechentafel zur Durchführung des Produktes

$$\boxed{A \cdot B = C} \dots \dots \dots (III)$$

oder

$$f(x) \cdot f(\beta) = f(y) \dots \dots \dots (IIIa)$$

Verwendung finden.

Die Gleichung (6) gibt den Zusammenhang der Moduln. Aus ihr geht hervor, daß für

$$a = c$$

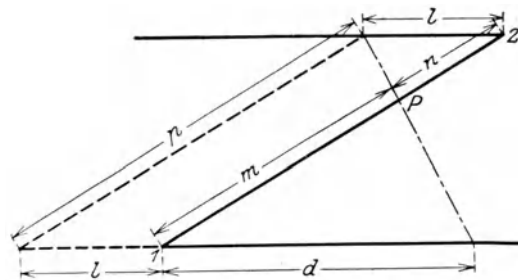


Abb. 688. Schema der Produkttafel.

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 $n = \frac{p}{2} B = q$ eine beliebige Zahl, so ist

$$q = \frac{a}{c}$$

das Verhältnis der beiden Moduln auf den parallelen Skalen.

Aus dieser Ableitung folgt zugleich, daß die B (Diagonal) Skala ohne Rechnung vielmehr durch Ziehen von Strahlen von beliebig gewählten Teilpunkten abgeleitet werden kann.

Die Z -Tafel gibt in ihrer obigen einfachen Grundform die allgemeine Lösung der Gleichung mit drei Veränderlichen:

$$A B - C = 0. \dots \dots \dots (III)$$

Sind vier Veränderliche in der allgemeinen Form

$$\frac{A \cdot B}{C} = D \dots \dots \dots (IV)$$

miteinander in Beziehung, so benötigt man nach Abb. 689 zur Lösung zwei zusammengelegte Z -Tafeln, wobei durch Einführung der Hilfsgröße H , die auf einer Zapfenlinie aufgetragen wird, 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.

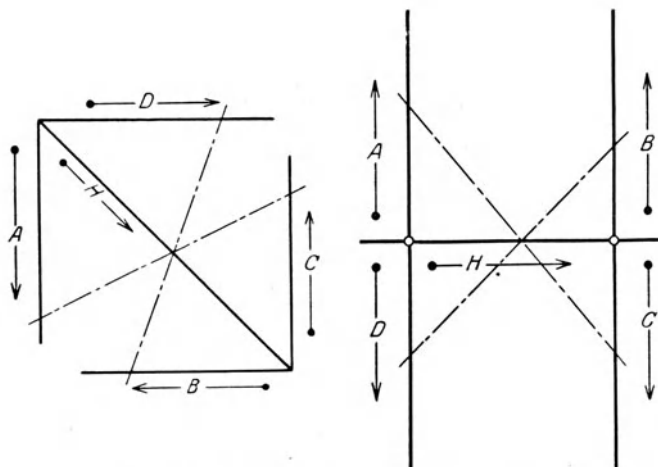


Abb. 689. Produkttafel für die Gleichung

$$\frac{A}{C} = \frac{D}{B} = H.$$

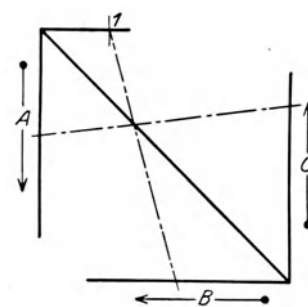


Abb. 690. Produkttafel für die Gleichung

$$\frac{A}{C} = \frac{1}{B} = H.$$

Alle vier Größen $A B C D$ können dann auf die Außenseiten der Rechentafel in gleichmäßigen Skalen aufgetragen werden.

Gleichung (IV) kann in die Form

$$\frac{A}{C} = \frac{D}{B} = H \dots \dots \dots (IVa)$$

überführt werden.

Die eine Z -Tafel stellt das Produkt $A = C H$ mit der Hilfsgröße H auf der Diagonalen dar.

Die zweite Z -Tafel mit auf die Außenachsen der erstgenannten Z -Tafel senkrechten Außenachsen und gemeinsamer Diagonale stellt das Produkt $D = B H$ dar, wieder mit H auf der Diagonalen.

Es bedarf keines Beweises, daß die Moduln 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 in einer doppelten Z -Tafel mit der Hilfsgröße H auf der Diagonalen eignet (Abb. 690).

Es besteht nicht immer das Bedürfnis, die ungleichmäßig kotierte Diagonalskala zu vermeiden, um so weniger, als dies im Falle von drei Veränderlichen die Verdoppelung der zur Lösung führenden Manipulationen bedeutet. Die Mehrleistung besteht zwar nur im Ziehen eines die gegebenen Werte verbindenden Suchstrahles, doch ist es naheliegend, jede noch so unbedeutende Manipulation zu vermeiden, wenn sie überflüssig ist.

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; es bringt daher keinen Nachteil, wenn man m auf der 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 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.

Weiter 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

$$W = \frac{\sigma}{\frac{d^2 \pi}{4}}.$$

Die Praxis verlangt die Bemessung der Durchmesser z. B. zu $d = 10$ mm bis 1 mm mit Abstufungen von etwa $\frac{1}{1}$ bis $\frac{1}{2}$ mm, weiter von $d = 1$ bis 0,1 mm mit Abstufungen von etwa $\frac{1}{100}$ bis $\frac{5}{1000}$ 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 der 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 beim kollinearem System. Zeichnerisch wird die Z -Tafel in diesem Fall für die gleichen Ablesungsmöglichkeiten ($d = 0,001$) wesentlich größere Ausmaße erhalten müssen.

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 das gleiche, so ist auch das Verhältnis ihres Unterschiedes zu einer von ihnen stets das gleiche:

$$\left[6 : 5 = 12 : 10, \quad \frac{6 - 5}{5} = \frac{12 - 10}{10} = \frac{1}{5} \right].$$

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

$$B = \frac{n}{p - n} \cdot \frac{a}{c}$$

gehorchende 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. 691).

Daß das Strahlencentrum auf einer durch den Endpunkt der Diagonalskala gehenden Parallelen liegen muß folgt aus der Tatsache, daß der zu dem Wert $B = \infty$ führende Strahl parallel zur A -Skala (I) ist 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
 und, da l willkürlich wählbar ist,
 so erhält man die Gleichung

$$m = y, \quad d = x$$

$$l = 1,$$

$$y = p \frac{x}{x-1}$$

als Gesetz für die mit einer gleichmäßig geteilten (x)-Skala projektiv verwandten (y)-Skala. Diese Skala ist identisch mit der in der Z -Tafel benützten Diagonalskala.

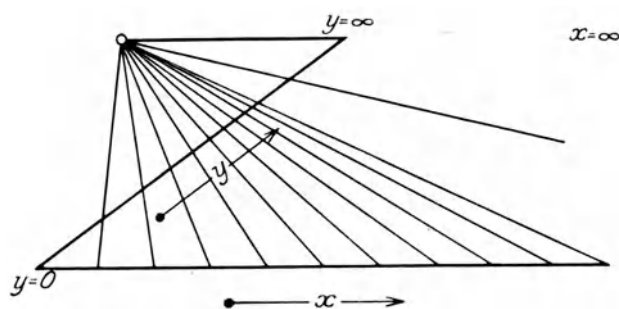


Abb. 691. Herstellung einer projektiven Skala.

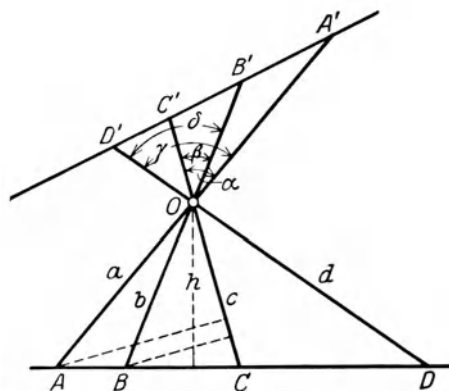


Abb. 692. Doppelverhältnis von vier Punkten.

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. Da die projektive Herstellung von Skalen an sich ein bequemer Behelf des zeichnerischen Rechenverfahrens ist, welches insbesondere dann wertvoll wird, wenn es sich um die projektive Umformung weniger einfacher Beziehungen handelt, so soll untersucht werden, welche Art Funktionen der projektiven Ableitung zugänglich sind. Eine allgemeine Behandlung dieses Gegenstandes ist hierzu notwendig.

Zwei Funktionen

$$F(x) \text{ und } f(x)$$

stehen in projektiver Verwandtschaft, wenn sie allgemein durch die Gleichung

$$y = F(x) = \frac{m f(x) + n}{p f(x) + q} \dots \dots \dots (V)$$

aneinander gebunden sind, wobei bezüglich der Festwerte nur die Einschränkung besteht, daß

$$m q - n p > 0$$

sein muß.

Zieht man von vier auf einer Geraden befindlichen Punkten über einen Punkt O vier (Abb. 692) Strahlen $a b c d$, 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 $A B C D$ gleich dem Doppelverhältnis der vier Strahlen $a b c d$ wird und daß das gleiche auch für die Punkte $A' B' C' D'$ gilt.

Unter dem Doppelverhältnis wird die Beziehung

$$\frac{A C}{B C} : \frac{A D}{B D} = \frac{\sin(a c)}{\sin(b c)} : \frac{\sin(a d)}{\sin(b d)}$$

verstanden.

Drückt man den Flächeninhalt der Dreiecke ACO , CBO , ADO und BDO auf zweierlei Art aus, so 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 folgt:

$$\frac{AC}{BC} : \frac{AD}{BD} = \frac{ac \sin \alpha}{bc \sin \beta} : \frac{ad \sin \gamma}{bd \sin \delta}.$$

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, geht dieses in die Form

$$\frac{f(x_1) - f(x_3)}{f(x_2) - f(x_3)} : \frac{f(x_1) - f(x_4)}{f(x_2) - f(x_4)} \text{ über.}$$

Ebenso kann man die Funktion $F(x)$ durch eine Punktreihe darstellen und für diese das Doppelverhältnis:

$$\frac{F(x_1) - F(x_3)}{F(x_2) - F(x_3)} = \frac{F(x_1) - F(x_4)}{F(x_2) - F(x_4)} \text{ bilden.}$$

Bezüglich $F(x)$ wurde die Annahme gemacht, daß

$$F(x) = \frac{mf(x) + n}{pf(x) + q} \text{ ist.}$$

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 Abb. 692 ersichtlich, durch zentrale Projektion entstanden, woraus sich als Schlußfolgerung ergibt, daß die Skalen von Funktionen, die in einer durch eine Gleichung ausgedrückten mathematischen Verwandtschaft stehen, durch zentrale Projektion voneinander 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. 693) 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.

Praktischerweise wird der Maßstab so angesetzt, daß die von den beiden Skalen für denselben Bereich beanspruchten Längen etwa gleich groß werden. Anfang- und Endpunkt der Skalen mit den einander zugeordneten Werten sind gegeben. Berechnet man ein drittes zusammengehöriges Wertepaar von x und $\frac{1}{x}$ und 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. Die bisher behandelten Nomogramme geben jeweils den Zusammenhang von drei Größen. Sind mehr Veränderliche vorhanden, so muß ein Skalengerüst aus

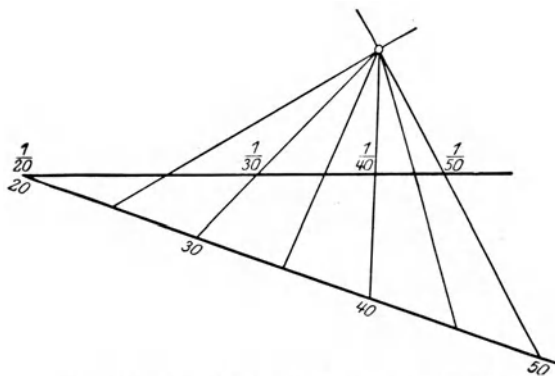


Abb. 693. Projektive Skala mit beschränktem Zahlenbereich.

mehreren Rechentafeln gebildet werden. Für vier, im allgemeinen durch eine Gleichung von der Form

$$f(x) + f(y) = \frac{f(v)}{f(w)} \dots \dots \dots (VI)$$

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.

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).

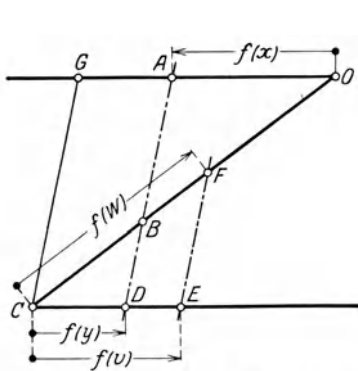


Abb. 694. Positive Verhältnistafel.

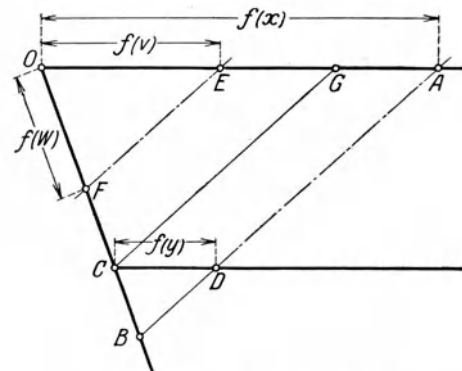


Abb. 695. Negative Verhältnistafel.

In der Abb. 694 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* die Beziehung

$$\frac{OG}{OA + CD} = \frac{CD}{BC} \frac{(OB + BC)}{OC} \text{ gilt.}$$

Für die zweite Transversale *EF* gilt

$$\frac{CD}{BC} = \frac{CE}{CF}$$

und hieraus

$$OA + CD = \frac{CE}{CF} OC.$$

Setzt man

$$OA = f(x), \quad CD = f(y), \quad CE = f(v) \quad \text{und} \quad CF = f(w)$$

und führt diese Substitutionen durch, so erhält man die obige Gleichungsform.

Für die negative Verhältnistafel Abb. 695 ist die Ableitung ähnlich:

$$OA - AG = \frac{CD}{BC} (OB - BC)$$

$$AG = CD.$$

Weiter ist

$$\frac{CD}{BC} = \frac{OE}{OF},$$

so daß schließlich

$$OA - CD = \frac{OE}{OF} OC.$$

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 kommensurable Größen addiert werden können.

Es sei

$$OA = af(x), \quad CD = af(y), \quad OE = cf(v) \quad \text{und} \quad OF = df(w),$$

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 der gleichen Aufgabe kann man eine Summentafel mit einer Produktentafel verbinden. Das Skalengerüst besteht in diesem Falle aus zwei logarithmischen, einer regulären und einer projek-

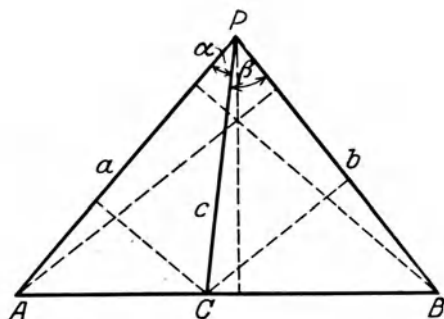


Abb. 696. Dreieck zur Ableitung des Zusammenhangs dreier Strahlenskalen.

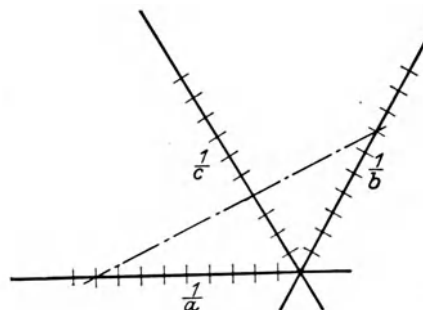


Abb. 697. Strahlenskalen für das halbe harmonische Mittel.

tiven 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, wobei zwei logarithmische und zwei reguläre Skalen vorhanden sind; sie ist demnach wesentlich einfacher. Beschränkt wird ihre Verwendbarkeit lediglich durch die Bedingung gleicher Maßstäbe auf den parallelen Skalen.

11. Die Strahlentafel (Abb. 696). Zieht man von einem Punkt P drei Strahlen mit den Längen a, b, c , zu den auf einer Geraden liegenden drei Punkten ABC , so gelten die folgenden trigonometrischen Beziehungen:

$$\begin{aligned} \text{Fläche des Dreieckes } APC & \frac{1}{2} ac \sin \alpha = A, \\ \text{„ „ „ } BCB & \frac{1}{2} bc \sin \beta = B, \\ \text{„ „ „ } ABP & \frac{1}{2} ab \sin (\alpha + \beta) = C. \end{aligned}$$

$$A + B = C,$$

daher

$$ab \sin (\alpha + \beta) = ac \sin \alpha + bc \sin \beta,$$

$$\frac{\sin (\alpha + \beta)}{c} = \frac{\sin \alpha}{b} + \frac{\sin \beta}{a}.$$

Für den Sonderfall

wird

$$\alpha = \beta$$

$$\frac{2 \cos \alpha}{c} = \frac{1}{b} + \frac{1}{a}$$

für den Sonderfall

$$\alpha = 60^\circ, \quad \cos \alpha = \frac{1}{2},$$

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. 697), so gibt jede die drei Skalen schneidende Gerade — der Index — drei durch die obige Beziehung aneinander gebundene Werte.

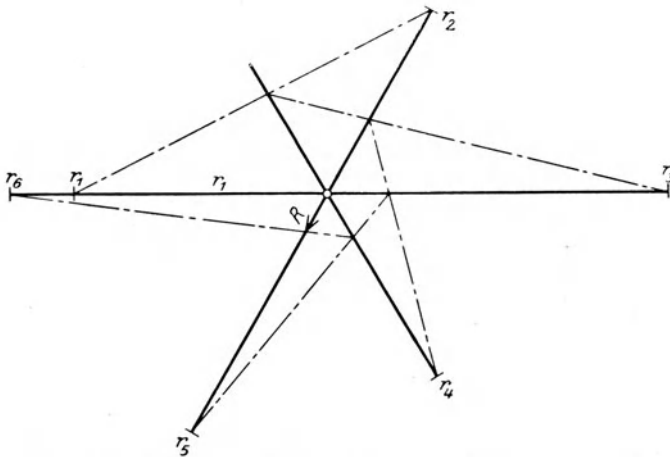


Abb. 698. Polygon-Strahlensystem zur Addition der Brüche:

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} = \frac{1}{R}.$$

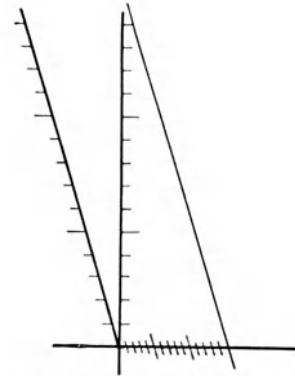


Abb. 699. Strahlenskalen mit verschiedenen Maßstäben.

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. 698 erläutert für sich die Anwendungsart mit sechs Strahlen.

Praktisch liegt die Sache meistens so, daß nicht für alle Größen die gleichen Moduln genommen werden können. Das ist z. B. der Fall, wenn zu einem verhältnismäßig großen Widerstand ein wesentlich kleiner zugeschaltet werden soll. Man muß dann die Winkel zweckmäßig ändern, womit auch eine entsprechende Änderung der Moduln im Sinne der allgemeinen Gleichung einhergeht. Wählt man einen der Zentriwinkel, z. B. $\beta = 90^\circ$ (Abb. 699), so wird

$$\frac{\cos \alpha}{c} = \frac{1}{a} + \frac{\sin \alpha}{b}.$$

Zeitschriften-Verzeichnis (Abkürzungen).

AEGZ	A.E.G.Zeitung.	LE	La Lumière Electrique.
AfE	Archiv für Electrotechnik	LRTJ	The Light Railway & Tramway Journal.
BBCM	B.B.C.-Mitteilungen, Baden (Schweiz)	MMEEK	Mitteil. des Ungarischen Architekten und Ingenieur-Vereins.
RevBBC	— (Franz. Auflage)	MT	Il Monitore Tecnico.
BBCMM	B.B.C.-Mitteilungen, Mannheim.	Organ	Organ für Fortschritte des Eisenbahnwesens.
BIEKV	Bulletin des Intern. Eisenbahn-Kongreß-Verbandes.	OWOB	Oesterreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst.
BSEV	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereines.	Proc	Proceedings of A.I.E.E.I.
BTSR	Bulletin technique de la Suisse Romande.	RE	The Railway Engineer.
CM	Cassiers Magazine.	RT	Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane.
DBZ	Deutsche Bauzeitung.	RTW	Rundschau für Technik und Wirtschaft.
Dingler	Dinglers Polytechnisches Journal.	RGCF	Revue Générale des Chemins de fer.
DSKBZ	Deutsche Straßen- u. Kleinbahn-Zeitung.	RGE	Revue Générale d'Electricité.
EA	Elektrotechnischer Anzeiger	RyEng	The Railway Engineer.
EB	Elektrische Bahnen, Elektrischer Betrieb, Berlin.	SBZ	Schweizer Bauzeitung.
EBTZ	Eisenbahntechnische Zeitschrift.	SETZ	Schweizerische Elektrotechnische Zeitschrift.
EKB	Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, Berlin.	STZ	Schweiz. Techniker-Zeitung.
El	Electrician, London.	SA	Scientific American
En	L'Electricien.	SRJ	Street Railway Journal.
Eta	L'Elettrotecnica.	TH	Thomson Houston, Paris.
E u. M	Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien.	TM	La Technique Moderne.
EN	Engineering News.	TRW	Tramway & Railway World.
ENA	Electrot. Neuigkeits-Anzeiger	TAIEE	Transaction of Am. Institut of Electrical Engineers.
Ep	Der Elektropraktiker.	VT	Verkehrstechnik.
ER	Electrical Review.	VTW	Verkehrstechnische Woche.
ERJ	Electric Railway Journal.	ZfE	Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien.
ETR	Elektrotechnische Rundschau.	ZVDEV	Zeitung des Vereines Deutscher Eisenbahnverwaltungen.
ETZ	Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin.	ZVDI	Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure.
EW	Electrical World.	ZfKB	Zeitschrift für Kleinbahnen.
Fu.F	Fördertechnik und Frachtverkehr.	ZOLAV	Zeitschrift des Oesterreichisch. Ingenieur- und Architekten-Vereines.
GA	Glasers Annalen.	ZBBV	Zentralblatt für Bauverwaltung.
GC	Le Génie Civil.		
GEB	General Electric Co.-Bulletin.		
GER	General Electric Review.		
IE	L'Industrie Electrique.		

Verzeichnis der gekürzten Firmennamen.

AEG	Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.	LHW	Linke-Hofmannwerke, Breslau.
AEGU	AEG-Union, Elektrizitäts-Gesellschaft, Wien.	MAG	Maschinenfabrik der k. Ung. Staatsbahnen, Budapest.
AFAG	Akkumulatoren-Fabrik Akt.-Ges., Berlin.	MFO	Maschinenfabrik Oerlikon.
ALW	American Locomotive Works.	MSW	Maffei Schwarzkopf-Werke, Berlin.
BBC	Brown, Boveri & Cie., Baden (Schweiz) und Mannheim.	MVE	Metropolitan Vickers Electr. Co.
Bell	Theodor Bell & Cie., Kriens-Luzern.	OBW	Oesterreichische Brown-Boveri Werke, Wien.
BEW	Bergmann Elektrizitätswerke, Berlin.	OSSW	Oesterreichische Siemens-Schuckert-Werke, Wien.
BLW	Baldwin Locomotive Works.	Roll	von Rollsche Eisenwerke, Bern.
CEF	Constructions Electriques de France.	SB	Siemens Brothers
Ganz	Ganz & Co., Maschinenfabrik und Eisen-Gießerei A.-G., Budapest.	SCB	Société de Construction Batignolles, Paris.
GEC	General Electric Co., Schenectady, U.S.A.	SLFW	Schweizerische Lokomotivfabrik, Winterthur.
GWF	Grazer Waggonfabrik, Graz.	SOP	Soc. Örlikon, Paris
Hanomag	Lokomotivfabrik Hannover.	SSW	Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.
LFK	Lokomotivfabrik Kraus u. Co., München-Linz.	West	Westinghouse Electric u. Manufacturing Co., Pittsburg. U.S.A.

Namenverzeichnis (Verfasser).

- A**bt 199. 239. 536. 545. 547. 572.
 Adler 7. 141. 160. 183. 217. 378.
 527. 610.
 Adolph 556.
 Afee 411.
 D'Aste 28.
 Albert 358. 378.
 Alexander 16.
 Alexanderson 183. 527.
 Allen 38.
 Altmann 126.
 Alvensleben 138.
 Amberg 115.
 Ambrosius 61.
 Amsler 527.
 Antranakian 68. 626.
 Armbruster 18. 24. 26.
 Armknecht 25.
 Armstrong 14. 217. 371. 429.
 Andrews 20. 511.
 Anger 16. 22. 435.
 Arnold 21. 183.
 Arns 100.
 Aspinall 12. 14.
 Auvert 239. 296. 527.
 Axtell 308.
 Ayasse 390.
- B**abcock 14.
 Bachmann 18.
 Bacqueyrisse 239.
 Baecker 14. 441.
 Bäseler 26.
 Bahse 25.
 Bally 37.
 Bandow 14.
 Barbier 158.
 Bartus 626.
 Bauer 411.
 Baum 141.
 Batchelder 239. 243. 244. 254. 411.
 429.
 Bearce 8. 12. 15. 16. 28. 358. 431.
 618. 621.
 Beers 308.
 Beeuwkes 15.
 Behn-Eschenburg 49. 61. 183.
 197. 199. 214. 308. 443. 445.
 Behr 378.
 Bell 55.
 Bellinger 15.
 Beneke 622.
- Benischke 126. 183. 199.
 Bergmann 14.
 Berling 102.
 Bernadet 25.
 Besig 67.
 Besser 68.
 Bethge 141. 150. 217.
 Bianchi 239. 439.
 Biely 21.
 Binder 308.
 Birk 26.
 Bisacre 49.
 Bissinger 545.
 Blakmore 10.
 Blanc 217.
 Bloch 626.
 Blondel 68. 199.
 Blum 11. 12.
 Bode 22.
 Boedecker 141.
 Böhm-Raffay 138.
 Boesch-Ouzelet 8. 24.
 Bolstorff 239.
 Bonfiglietti 7. 20.
 Boucherot 49.
 Bouchilloux 626.
 Borghaus 22.
 Borries 158. 411.
 Bourlier 8.
 Bosshart 7. 8.
 Boveri 199.
 Braarud 12.
 Bragstad 308.
 Brackett 68.
 Braun 12. 100. 199.
 Brauns 61.
 Brecht 12. 14. 16. 126. 161. 239.
 431.
 Breitfeld 49.
 Bremond 24.
 Breslauer 239.
 Bright 400.
 Brodbeck 9.
 Brodetsky 626.
 Broomall 217.
 Brousoux 141.
 Brückmann 24.
 Brünner 24.
 Brugsch 11. 14. 141.
 Buchwald 141.
 Bucksath 126.
 Buchli 141. 239. 289. 373. 439. 443.
- Buhle 26. 27.
 Burch 2.
 Burkard 24.
 Bürke 126. 141.
 Bussebaum 100. 610.
 Bütow 400.
 Büttner 22. 23.
- C**aesar 141.
 Calzolari 18.
 Carlier 22. 28.
 Carpentier 68.
 Carpi 25.
 Carter 2. 14. 51. 433. 437.
 Case 308. 358.
 Cattani 24. 26.
 Cauer 12.
 Cauwenberghe 200. 214. 437.
 Chappuis 61.
 Charbonnel 61.
 Chardin 511.
 Charpentier-Bill 15.
 Choisy 100.
 Christen 529.
 Clarafeld 37.
 Clark 626.
 Clarke 308.
 Clellan 411.
 Coding 68.
 Collischon 6.
 Collum 14. 138.
 Conrad 27.
 Cook 626.
 Cooper 217. 239. 431.
 Coors 199.
 Corsepius 7.
 Courou 626.
 Couwenhoven 239. 289. 443. 527.
 Cox 15. 115.
 Cramer 116. 377.
 Crecelius 14.
 Cremer 358.
 Cristiansen 141.
 Cronbach 183.
 Cserhádi 19. 439.
 Cuenod 308.
 Czeija 14.
- D**ahlander 17.
 Daubner 24.
 Davis 14. 15. 38. 41. 429.
 Dawson 2. 13. 17. 115. 610.

Dean 183.
 Dehore 378.
 De la Court 21.
 Delmez 378.
 Demany 141.
 Déri 343.
 Derrer 7.
 Desprez 61.
 Devaux 61.
 Dick, Kerr 308.
 Diesel 20. 518.
 Dietl 7. 12. 13. 390. 429.
 Dittes 9. 17. 28. 31. 441.
 Dobbeler 626.
 Dobbelstein 400.
 Dobson-Wynne 14.
 Dod-Potter 14.
 Dodd 21. 239. 429.
 Döry 183. 239. 289. 308. 344. 435.
 Dolezalek 536. 572.
 Donath 68. 110.
 Donati 18. 619. 620.
 Dover 2. 183. 308.
 Dreger 23.
 Dreisbach 68. 89.
 Drescher 622.
 Dubar 626.
 Dubois 13.
 Dürler 18. 373. 445.
 Duffing 252.
 Dumas 12. 25.
 Dummermuth 61.

Eaton 239. 400. 626.
 Easton 49.
 Eberhard 25.
 Edler 68. 100. 110.
 Egg 68.
 Eggenberger 26.
 Ehnhart 433.
 Eichberg 14. 183.
 Eichel 16.
 Eigenheer 10.
 Eiselen 12.
 Eipel 626.
 Ellenbogen 28.
 Engel 16. 183. 217. 308. 445.
 England 20.
 Epstein 16.
 Erb 6.
 Ertel 20. 100. 610.
 Espitalier 27.
 Euler 100.
 Evans 38.
 Ewing 141. 358.

Faber 6.
 Fadda 536. 572.
 Farnham 61.
 Favarger 378.
 Feldmann 55. 608.
 Ferstel 28.
 Fetter 68.
 Feuer 68. 110.

Findeis 21. 511. 604.
 Fischer 8.
 Fischer-Hinnen 217. 223.
 Fleischmann 184.
 Fodor 10. 19.
 Föppl 239.
 Fontanellaz 411.
 Forsberg 199. 308.
 Fortenbangh 622.
 Fränkel 28.
 Frank 26.
 Frankl 199.
 Franklin 184.
 Frese 21.
 Freund 11. 115.
 Friebel 308. 443.
 Frischmuth 14.
 Freyer 10.
 Fühles 19. 25.
 Funke 199.
 Fynn 184.

Gabriel 626.
 Gall 49.
 Gallego 13.
 Garnier 17.
 Gastelnuovo 126.
 Gatzweiler 26.
 Gayer 23.
 Gaze 24.
 Geenens 15.
 Geiger 239.
 Gerlach 11. 390.
 Gerstmeyer 126. 184.
 Gesing 68.
 Gibbs 13. 14. 15. 239. 411.
 Giese 141. 610.
 Giesler 23.
 Girousse 61.
 Givelet 308.
 Gleichmann 14. 15. 16. 435. 437.
 Glinski 13. 68. 141. 160.
 Goetze 486.
 Godferneaux 12. 13.
 Goldberg 9.
 Goldschmidt 140.
 Golwig 19.
 Gordon 11.
 Goupillière, de la 574.
 Görges 184.
 Göttler 28.
 Gradenwitz 26.
 Grempe 22. 23.
 Greulich 24.
 Grimshaw 13. 16.
 Grivet 25.
 Grothe 69.
 Grünholz 100.
 Grünhut 28.
 Grünig 486.
 Grüninger 536.
 Grütter 69.
 Gubler 439.
 Gümbel 239.

Guerndt 69.
 Guery 8.
 Guggenheim 102.
 Guhl 141.
 Guillery 23.
 Gunderlach 6. 400.
 Guntermann 626.
 Gut 217. 626.
 Gyáros 8.
 Gysel 411.

Haag 24.
 Haas 9. 610.
 Hagenbucher 516.
 Hahn 12.
 Hak 49. 626.
 Hals 69.
 Hammel 184.
 Hare 15.
 Hartmann 378.
 Hauer 574.
 Häusler 110.
 Hausmann 18. 141.
 Heberling 141.
 Hedges 626.
 Heilfron 200. 308.
 Heilmann 516.
 Heinemeyer 69. 110.
 Heldé 400. 411.
 Heller 20. 22.
 Hellmund 17. 200. 421.
 Hering 138.
 Hermann 138.
 Hermanns 6.
 Hershey 14. 431.
 Herzog 8. 14. 18. 24. 55. 449.
 Heubach 184.
 Heumann 22.
 Hewett 9. 14.
 Hewlett 129.
 Heyden 10. 14. 16. 115. 239. 433.
 439. 443.
 Heyland 184.
 Heymann 184.
 Heys 527.
 Hibbard 200.
 Hiertzeler 37.
 Hildebrand 6.
 Hill 14.
 Hipple 239.
 Hixson 100. 358.
 Hobart 14.
 Hochenegg 141. 175.
 Hoepner 17. 239. 296. 373. 378.
 443.
 Hoffmann 627.
 Hohage 61.
 L'Hoest 239.
 Holmgren 9. 14.
 Holzer 239.
 Hoppe 49.
 Hort 141.
 Hotopf 24. [175. 411.
 Hruschka 11. 15. 17. 28. 141.

- Hubendick 22. 378.
 Huber-Stockar 17. 19. 28. 30. 32.
 Huebler 18.
 Huidschiner 10. 13. 14. 18. 49.
 52. 439.
 Hutchinson 429.
 Hütte 627.

Idelberger 16.
 Iglésis 511.
 Iranyi 308.

Jahn 141.
 Jackson 511.
 Jacquín 445.
 Jakob 627.
 Japiot-Ferrand 16.
 Jobin 69.
 Johnson 38.
 Joitel 69. 627.
 Jones 10. 38. 133.
 Jordan 19. 25. 26.
 Juliusburger 378.
 Jullian 9. 14. 17. 437.
 Jüllig 69.

Kadrnozka 10. 141. 175.
 Kahler 14.
 Kalbfuß 20.
 Kallir 69. 110.
 Kammerer 622.
 Kandó 19. 282. 287. 350. 439.
 Kapp 18.
 Kasten 6.
 Kayser 8.
 Keinath 627.
 Keller 23.
 Kemmann 11. 12.
 Kennelly 49. 55. 61. 511. 512.
 Kiefer 435.
 Kielland 7.
 Kilchenmann 19. 141.
 Kinberg 110.
 Kindler 21. 200. 378.
 Kirsten 69.
 Klausner 23.
 Kleinow 10. 16. 239. 285. 286.
 308. 411. 433. 435.
 Klien-Lindner 303.
 Kliment 28.
 Klingelhoefler 7.
 Klingenberg 28.
 Klose 545.
 Knorr 141. 142. 217.
 Koch 49.
 Kock 126.
 Kohler 69.
 Kohlfürst 13.
 Koller 8.
 König 55.
 Königshagen 22. 445.
 Körner 9. 13. 17.
 Konorski 626.
 Koczynski 184.

 Koromzay 439. 527.
 Kraemer 308.
 Kratochwill 17.
 Kraus 51. 200. 626.
 Krautt 69.
 Kreißig 142.
 Krizik 9. 250.
 Krug 400.
 Krüger 18.
 Krzyzanowski 69.
 Kübler 13. 110.
 Kummer 8. 14. 17. 18. 28. 30. 31.
 32. 49. 52. 54. 61. 62. 142. 161.
 184. 185. 200. 239. 289. 377.
 439. 443. 445. 527. 610.
 Kun 627.
 Kuntze 14. 17. 24. 61. 115.
 Kurz 21. 571.
 Kurzel 511.
 Kyser 7. 110.

Lacmann 627.
 Lafontaine 200.
 Lang 116.
 Langrehr 627.
 Lanino 18.
 Largiader 378.
 Lasche 19.
 Laßwitz 627.
 Latenser 16, 28, 411.
 Latour 184. 200.
 Lavanchy 627.
 Lawrence 55.
 Laying 217.
 Lebenbaum 115.
 Leboucher 97. 115. 239. 411.
 Lefebre 25.
 Leistikow 627.
 Leitzmann 411.
 Lentz 299.
 Leuthele 61.
 Levy-Lambert 536. 572.
 Leyvraz 24.
 Lhériaud 49.
 Lhermitte 69.
 L'Hoest 239.
 Lichtenstein 49. 52. 61.
 Lichtfeld 378.
 Liechty 24. 303. 411.
 Liljebblad 239.
 Lindström 61.
 Linebaugh 200.
 Linke 9.
 List 445.
 Listen 400.
 Lloyd-Köhler 514.
 Locher 548.
 Loebe 627.
 Loebner 110.
 Loenen-Martinet 14.
 Loewentraut 435.
 Lombard-Gerin 10. 20.
 Löwit 9.
 Luckey 626.

 Luder 9.
 Ludorf 12.
 Lübon 411.
 Luithlen 200.
 Luke 217.
 Lüthy, 49.
 Lydall 13.

Macholl 12.
 Mahir 12.
 Mailloux 358.
 Mandl 200. 626.
 Manke 11.
 Marchand 37.
 Marchena 14.
 Marcuse 62.
 Mardis 308.
 Marie 2.
 Marguerre 10. 62. 184. 439.
 Markt 9. 142. 158.
 Marquis 142.
 Marsh 544.
 Marshall 142.
 Martin 2.
 Mattersdorf 11. 12. 184. 217. 390.
 610. 622.
 Mauder 49.
 Mauduit 14. 62.
 Mauermann 217.
 Maurer 20.
 Mazen 13.
 Mecke 240.
 Mehtens 26.
 Meißner 239. 289.
 Meixner 23. 158. 529. 530.
 Mester 200.
 Metzelin 142.
 Meyer 11. 16. 390. 627.
 Meyfarth 445.
 Milch 8. 13.
 Mikuli 377.
 Milliken 37.
 Mirabelli 62.
 Mitchell 529.
 Moll 110.
 Moellendorf 102. 358.
 Monath 200.
 Morgenthaler 17. 24.
 Moser 184.
 Möller 24.
 Munroe 511.
 Murray 16. 115. 431.
 Musil 11. 12. 142.
 Mußwitz 15. 429.
 Mutzner 142.
 Müller 7. 24. 25. 69. 142. 184. 200.
 217. 240. 289. 378. 435. 527.
 Münster 33.

 Nagel 22.
 Nash 18.
 Naumann 200.
 Neidt 217.
 Neubert 69.

Neumann 110. 627.
 Neuenschwander 217.
 New 19.
 Newton 223.
 Nier 20. 512.
 Nieß 110.
 Nicolaus 9.
 Niethammer 8. 14. 37. 49. 184.
 200. 214. 308. 429.
 Nipkow 24.
 Nordefeldt 200.
 Nordmann 10. 16. 142. 373. 378.
 Nußbaum 142.

Obach 37.
 O'Brien 411.
 d'Ocagne 71. 626. 628.
 Oefverholm 17.
 Örley 142.
 Oesterreicher 7. 627.
 Oetling 511.
 Ohl 7.
 Ohnesorge 598.
 Ohrlich 626.
 Oltay 627.
 Oppizi 2. 14.
 Osnos 184. 214.
 Ossana 161. 184. 214.
 Ostertag 22.
 Ott 69. 627.
 Otto 69. 110.

Pahin 17. 18. 22. 429. 516.
 Palme 627.
 Pannel 184. 250.
 Parker-Smith 184.
 Parodi 18. 437. 616. 619. 621.
 Passauer 7.
 Pasternak 627.
 Paul 123.
 Pauli 574.
 Paulsen 22.
 Paz 10.
 Pender 69.
 Pernt 627.
 Perret 200.
 Perrochet 126.
 Perry 142.
 Peter 9. 24. 26. 549. 604. 627.
 Petersen 11. 126. 142. 604.
 Petit 12.
 Petizeau 627.
 Pfeiderer 240.
 Pflug 142.
 Pffor 9. 15. 28. 56. 142. 150. 175.
 437. 610.
 Pforte 240. 378.
 Philippi 7.
 Philipps 28.
 Pichelmayer 15. 184.
 Pietrkowski 27.
 Pirani 33. 626.
 Pirch 622.
 Platzmann 12. 390.

Popp 439.
 Porney 62.
 Pornin 217. 627.
 Potin 69.
 Pontecorvo 18. 439.
 Poschenrieder 16. 17. 69. 94.
 100.
 Pospischil 627.
 Priest 185. 240.
 Przygode 12. 20. 21.

Quinat 13.

Rachel 69.
 Ramsay 516. 518.
 Rasch 55. 185.
 Rathenau 429.
 Rau 240.
 Raven 16. 411. 431. 437.
 Reckenschuß 574.
 Reichel 11. 15. 19. 185. 240. 433.
 435. 441.
 Reichers 56.
 Reinhart 7. 8. 13. 16.
 Reinhold 627.
 Reishaus 115.
 Renaud 12.
 Renshaw 15.
 Reutener 200.
 Reyval 10. 15. 25.
 Rice 15.
 Richey 2. 8. 94.
 Richter 7. 184. 185.
 Riedlinger 69.
 Riep 7. 23.
 Riggensbach 545.
 Righi 15. 19.
 Risch 142.
 Roedder 15.
 Roffhak 378.
 Rohr 62.
 Roland 9. 22.
 Romeo 287.
 Rosa 138. 445.
 Rosenbaum 49. 69.
 Rosenberger 373.
 Rosenthal 126.
 Roß 19.
 Rothpelz 23.
 Röhl 24. 536.
 Rudolph 390.
 Ruegger 142.
 Ruprecht 574. 603. 607.
 Rusch 200.
 Rüdberg 62.
 Rüdiger 7.
 Rydberg 142. 160.
 Ryncki 24.
 Rziha 100.

Sabouret 16.
 Sachs 18. 19. 240. 429. 443. 445.
 527.
 Santi 18.
 Santoro 18.

Santuari 69.
 Sanzin 142. 157.
 Sármezey 22.
 Sauveur 200.
 Schäfer 37.
 Schaake 358.
 Schauer 69.
 Scheichl 17.
 Scheid 126.
 Scheinig 51. 140.
 Schendell 126.
 Schenk 308.
 Schenkel 37. 69. 185. 200.
 Scherbius 200.
 Schermerholm 217.
 Schiebeler 217.
 Schiemann 20. 21. 511. 514.
 Schimanek 22.
 Schimpff 11. 12. 13. 142. 161.
 Schmedes 25.
 Schmidlin 38.
 Schmidt 25. 142. 185.
 Schmidt-Grubers 126.
 Schmieder 37.
 Schneider 21.
 Schnetzler 185. 445.
 Schoop 140.
 Schopfer 200.
 Schörling 142. 378.
 Schreiber 62. 217. 626.
 Schrottke 62.
 Schröder 19. 33. 142.
 Schrödter 7.
 Schröter 62.
 Schuler 56. 62.
 Schulze 69.
 Schupfer 18.
 Schurig 511. 512.
 Schütt 25.
 Schwarz 26.
 Schwarzkopf 16. 61. 69. 115.
 Schwerdt 627.
 Scott 62.
 Seco de la Garza 627.
 Seefehlner 10. 15. 17. 24. 25. 26.
 69. 100. 115. 126. 161. 200. 217.
 240. 378. 411. 429. 431. 439. 547.
 575.
 Seehase 110.
 Seidener 100.
 Seidemann 69.
 Semenza 18.
 Sener 69.
 Sengel 69.
 Seyfert 184.
 Shepard 62.
 Sidler 11.
 Sieber 15. 56.
 Siedler 24.
 Siegel 200.
 Siegerist 627.
 Simeon 8.
 Simey 437.
 Simmon 21. 511.

Singer 69. 627.
 Smith 4. 15. 16. 31. 62.
 Smiths 411.
 Sneyder 11.
 Soberski 12. 18. 378. 511. 610.
 Soeder 7.
 Soreau 626.
 Sorelli 18.
 Sothmann 126.
 Soulavy 27.
 Spängler 378.
 Speer 12.
 Sperry 516.
 Sprague 15.
 Sproecke 26.
 Stahl 378. 610. 622. 627.
 Stauf 28.
 Stecher 62.
 Steigwald 110.
 Stein 12. 62.
 Steiner 12.
 Steinmetz 28. 185.
 Stengel 240. 435.
 Stephan 26.
 Stillwell 185.
 Stinemetz 15. 610.
 Stix 445.
 Stobrawa 21.
 Stocker 358.
 Stockert 411.
 Stoll 20. 514.
 Storer 15. 411.
 Storjehann 358.
 Strahl 158.
 Strauß 22.
 Strasser 23.
 Stritzl 627.
 Strub 24. 25. 26. 536. 545. 547.
 572.
 Studer 23. 443.
 Sulot 62.
 Suguet 12.
 Sumec 52. 69. 185.
 Sumerhayes 38.
 Sveinson 142.
 Symanzik 240.
 Szilas 69.
 Szabó 627.
 Sztrokay 8. 610.

 Taffs 21. 22. 511.
 Taylor 38.
 Tetmayer 100.
 Thielers 240.
 Thieme 18. 25.
 Thirlwall 15. 511.
 Thomann 25. 445.
 Thomson-Houston 7. 308.

Thomson 69.
 Thormann 18. 28. 62. 63. 142.
 185. 217. 445.
 Thun 627.
 Tischendörffer 240.
 Tobias 240.
 Törpisch 8. 11. 16. 115.
 Torres 608.
 Tracy 23. 133.
 Trautweiler 23.
 Trautwetter 16. 378. 529. 610.
 Treuler 627.
 Tripet 25.
 Troske 13.
 Truxa 49. 63. 69.
 Tschanz 251. 303.
 Tschudy 37.

 Unger 185. 217.
 Uppenborn 55.
 Usbeck 16. 28. 115.
 Uytbork 12. 17.

 Valatin 10. 22.
 Valensi 62.
 Vallauri 15. 23. 185. 193.
 van Nes 9. 441.
 Vaupel 69. 110.
 Vautier 494. 581.
 Verebely 18. 28. 439. 445.
 Le Vergenier 26.
 Verole 19. 308. 439.
 Vidéky 142.
 Vieser 627.
 Viglia 8.
 Vogel 7. 308. 627.
 Voit 511.
 Volkens 142. 200. 217.

 Wachsmann 11.
 Wachsmuth 308. 433. 435.
 Wagenknecht 22.
 Wahle 94.
 Wahn 110.
 Walloth 26. 572.
 Walter 8.
 Warner 627.
 Warren 62.
 Waskowsky 22.
 Watermann 19.
 Way 56.
 Webb 308.
 Weber 142. 411.
 Wechmann 13. 16. 17. 22. 49.
 390. 435. 437.
 Weel 49. 627.
 Weicker 126.
 Weil 69.
 Weiß 24.

Weißbach 33.
 Wensley 38.
 Wentzel 11. 110.
 Werkmeister 626.
 Wernecke 378.
 Werther 7.
 Werz 445.
 Westhues 378.
 Westinghouse 308.
 Westphal 10. 115.
 Wettich 26. 27.
 Weyand 22.
 Whittaker 200. 273.
 Wichert 10. 13. 24. 142. 161. 217.
 240. 289. 411.
 Wiesinger 8. 240.
 Wilcox 15.
 Willenberg 622.
 Wilson 49.
 Winkler 2. 12. 17. 23. 185. 221.
 288.
 Winterhalter 100.
 Wintermayer 26.
 Wist 10. 16. 441.
 Wiswell 622.
 Wittek 185.
 Wittfeld 15. 23. 240. 301.
 Wittig 12.
 Witthöft 12.
 Wittsack 142.
 Wlach 18. 69.
 Woernle 26.
 Wohlfahrt 25.
 Wolf 200. 217. 308.
 Wolters 240.
 Wood 9.
 Woods 217.
 Wykborn 17.
 Wynne 15. 16. 429. 431.
 WyBling 15. 28. 443.

 Ytterberg 62.

 Zallud 15.
 Zanger 62.
 Zehme 9. 11. 15. 16. 18. 27. 115.
 185. 296. 377. 378. 390. 411. 435.
 Zehnder-Spörry 19. 24. 26.
 Zeulmann 8. 9. 11. 69. 373.
 Zeuner 22.
 Zezula 27.
 Zickler 49. 50. 52.
 Zindel 24. 445.
 Ziffer 22.
 Zipp 15. 185. 411.
 Zogbaum 115.
 Zolland 443.
 Zuidweg 161.

Ortsverzeichnis.

- Aachen** 9.
Achenbach, Zeche Minister 6.
Aquarossa 8. 338. 358.
Aiguille du Midi 27.
Airolo 18.
Albtal 9. 43. 432.
Albula 24.
Alp-Sura 26. 27.
Alte Wiese, Karlsbad 25.
Altona 20.
Altstätten 551.
Amerika, Ver. Staaten 7. 9. 11.
 16. 62. 115. 378. 621.
Anaconda 15. 115. 428.
Annapolis 8. 9. 10.
Arad 8.
Areskutan 594. 604.
Argentina 9. 10.
Arlberg 238.
Arosa 9.
Arth 24. 357.
Asakumayama 576.
Augustusburg 25. 587.
Aurora 38. 372.
- Bad Dürkheim** 9.
Baden 25. 432.
Baden, Öst. 10. 199.
Baker-Street 12.
Ballston 10.
Baltimore 9. 10. 220. 428.
Barmen 12. 24. 357.
Basel 32.
Bayern 16. 28. 432.
Beatenberg 575.
Bechyne 9. 358.
Belfort 9.
Belgien 28.
Belleville 25.
Bellinzona 8. 328. 335.
Berchtesgaden 25.
Bergamo 9.
Berlin 7. 8. 12. 16. 21. 32. 183.
 378. 390. 398. 399. 610.
Bern 9. 20. 32. 37. 220. 357.
Berner Oberland 9. 24. 220. 551.
 564. 567.
Bernina 8. 155. 316. 357.
Bethlehem 8.
Bex 551.
Biasca 8. 220. 358.
Bielatal 21.
Biel 8. 575.
Bignasco 10. 356.
Bitterfeld 16. 115. 220.
Blankenese 13. 115. 220. 334. 356.
 390.
Blonay 24. 551.
- Bloomington** 356.
Bonn 36. 321. 331. 358.
Bordeaux 27.
Bodensee 32.
Borinage 7.
Bourboule 25.
Boston 11. 12. 399. 428.
Bourg-Madame 9. 220. 325. 358.
Bozen 8. 25. 27. 551. 595. 605.
Böckingen 21.
Brasilien 25.
Brematal 9.
Bremen 21. 378.
Brescia 8.
Brighton 13. 115. 356.
Brigue 19.
Brooklyn 398.
Brünig 547. 553.
Brünn 613.
Brunnen 24. 355. 552.
Buda 25.
Budapest 8. 12. 608.
Buenos-Aires 11. 183. 399.
Burgdorf 8. 18. 355. 442.
Bürgenstock 25. 575. 587. 595.
Bury 220.
Butte 15. 38. 115. 369. 428.
Buttler 9. 10. 357.
- Caldiero** 9.
California 9.
Calistoga 10.
Camargue 10.
Cambridge 399.
Canada 8. 455.
Capri 25. 576. 595.
Capucin 595.
Cascade Mountains 15. 115.
Cassarate 25. 595.
Castellana 10.
Ceres 9.
Chamonix 27.
Chaumont 25. 587. 600.
Champéry 24. 221. 222. 358. 551.
 563.
Châtelârd 24. 358. 551. 553. 558.
 561. 571.
Chesapeake-Bay 10. 356.
Chiapella 18.
Chiasso 5.
Chicago 5. 10. 15. 19. 31. 115.
 183. 199. 212. 216. 220. 222.
 357. 415.
Chile 7. 8. 15.
Chur 9.
Civitta-Castellana 10.
Cleveland 39.
Corcovado 24. 356. 548.
- Cöln** 9. 11. 358.
Cöpenick 199.
Croix-Paquet, Lyon 25.
Croix-Rousse, Lyon 25.
Cuba 9. 15.
Cure d'Air 25.
- Denver** 10. 363.
Dermullo 165.
Dessau 16. 115. 220.
Deutschland 6. 12. 18. 21.
Dolder 545.
Dresdner Heide 21.
Düsseldorf 387.
- Eisenerz** 213.
Elberfeld 12.
Elgin 38.
Engadin 18.
Engelberg 24. 25. 531. 545. 559.
 595.
England 6. 12. 14. 16. 20. 133.
 378.
Erdmannsdorf 25. 587.
Erie 9. 200.
Erstfeld 18. 220.
Erzberg 548.
Europa 9. 17.
Evian les Bains 7.
- Fidaz** 27.
Filder 24. 358. 558.
Filmserstein 27.
Fourvière 25.
Frankfurt 9. 317. 357.
Frankreich 6. 10. 12. 14. 15. 16.
 17. 326.
Frauenfeld 9.
Freundschaftshöhe Karlsbad 25.
 594. 600.
Fribourg 21.
Frutigen 18. 220.
Fürigen 576. 594.
Fusina 10. 357.
- Gablonz** 138.
Gais 551.
Les Garettes 27.
Garmisch 122. 432.
Genf 378.
Gergal 10. 19. 444.
Gerschnialp 25. 595.
Gießbach 575.
Giovi 18. 19. 113. 212. 220.
Glen Cove 10.
Glion 24. 357. 537. 562. 567. 587.
Gmunden 165.
Gödöllö 444.
Gornergrat 24.

- Gotthard 4. 17. 18. 19. 30. 100.
 115. 220. 442.
 Granada (Spanien) 24.
 Grasse 595.
 Graz 613.
 Grindelwald 607.
 Griefen 122.
 Groenendigh 7.
 Groß-Lichterfelde 11. 32. 183. 390.
 Gryon 551.
 Guntschnabahn 25.
 Gurten 595.
- Haag** 10. 115. 357.
 Haardt 9. 357.
 Hagen 378.
 Hall i. T. 9.
 Halle 16.
 Hamburg 12. 13. 183. 220. 332.
 334. 391. 394. 398. 399. 610.
 Hamilton 25.
 Hammetschwand 25.
 Harland 8.
 Hausdorf 8.
 Haut-Rhin 356.
 Haute-Vienne 10. 356.
 Heidelberg 25. 587. 595. 600.
 Heilbronn 21.
 Hermannstadt 21.
 Heysam 13.
 Hohenfurt 9.
 Hohensyburg 25.
 Holland 14. 17.
 Homburg 9. 317. 357.
 Hoosac-Tunnel 16. 115.
 Hudson 399.
 Hungerburg 25. 42. 587. 591. 595.
- Iglau** 165.
 Illinois 10.
 Indianapolis 9.
 Innsbruck 9. 42.
 Ins 8.
 Italien 6. 13. 17. 18. 20. 23. 220.
 352. 353. 355. 620.
- Jamestown** 10.
 Japan 16.
 Java 440.
 Johannisthal 21. 123.
 Jons 9.
 Jungfrau 24. 356. 547. 557. 561.
- Karlsbad** 25. 549.
 Karwin 386.
 Kiruna 17.
 Klarälfvens 10.
 Klosterneuburg 21.
 Königstein 21.
 Königstuhl 600.
 Königswinter 36. 321. 331.
 Königszelt 16.
 Kohlern 27. 605.
 Konstantinopel 14.
 Kristiania 12.
- La Cure** 9. 25.
 Lake-Shore 10. 115.
 Lana 606.
 Lancashire 9. 12.
 Lancaster 13.
 Lauban 16.
 Lausanne 25. 32. 595.
 Lecco 18.
 Leipzig 16.
 Les-Avants 25. 587. 595. 596. 599.
 Leuk 551. 564.
 Limmattal 38.
 Liverpool 12. 220.
 Locarno 10. 356.
 Loèche (Leuk) 24.
 Lötschberg 18. 30. 61. 121. 155.
 219. 220. 275. 289. 328. 354.
 355. 444.
 Lokken 10.
 Long-Island 32. 399.
 London 12. 13. 115. 133. 183.
 220. 242. 356. 358. 390. 399.
 Lookout 25.
 Louisville 9.
 Lucca 9.
 Ludwigshafen 9.
 Lugano 8. 9. 318. 357. 587.
 Luzern 5.
 Lyon 10. 25. 356. 595.
- Maastricht** 9.
 Madrid 13.
 Mähr. Ostrau 386.
 Magdeburg 16.
 Mahanoy 25.
 Mailand 9. 13. 18. 32. 220. 289.
 358.
 Malè 9. 358. 385.
 Manchester 220.
 Manhattan 399.
 Mannheim 9.
 Mariazell 10. 45. 274. 440.
 Martigny 10. 24. 155. 356. 358.
 553. 558. 561. 571.
 Meisterschwanden 9.
 Melbourne 12. 399.
 Mendel 25. 165. 587. 595.
 Merkur (Baden) 25.
 Mesocco (Misox) 8. 335.
 Michigan 9. 136. 357.
 Midland 115. 185.
 Milwaukee 9. 38.
 Miribel 10.
 Mittenwald 10. 115. 119. 120.
 155. 335. 355. 440.
 Monreale 576.
 Monsumano 9.
 Montana 26.
 Mont Blanc 27.
 Monte Brè 25. 587. 594.
 Mont Cenis 18. 43. 113.
 Mont Dore 26.
 Mont Salève 24.
 Mont Salvatore 573.
- Mont Ulia 27.
 Monthey 24. 221. 222. 358. 551.
 563.
 Montreal 11.
 Montreux 9. 24. 155. 220. 357.
 557. 562. 567.
 Monza 358.
 Morecamb 13.
 Morschach 24. 552.
 Moselhütte 408.
 Mottarone 24. 351.
 Mount Washington 548.
 Mülheim 22.
 Münsterschlucht 24. 358.
 Muri 37.
 Murnau 10. 354.
- Nancy** 25.
 Napa 10.
 Napoli 10. 131. 369.
 Neuchatel 25. 587. 600.
 New-Haven 16. 28. 30. 33. 122.
 199. 220. 243. 259. 354.
 Newport 12.
 New-York 4. 11. 16. 19. 21. 28.
 30. 33. 115. 117. 133. 134. 159.
 183. 199. 218. 220. 221. 242.
 358. 379. 390. 392. 395. 398.
 399. 415.
 Niagara 27.
 Nieder-Schöneweide 199.
 Niesen 25. 587. 595. 597. 602.
 Nordamerika 6.
 Nordmark 10. 440.
 Norfolk 5. 16. 108. 120. 350. 354.
 358.
 North-Eastern 4.
 North-Shore 38.
 North-Western 12.
 Norwegen 7. 12. 17. 23. 440.
 Nyon 9.
- Oberamergau** 10. 354.
 Oberweißbach 26.
 Örlikon 32.
 Österreich 6. 17. 221. 529.
 Ofen (Budapest) 25.
 Ohio 220.
 Ohlsdorf 13. 115. 356. 391.
 Opicina 24. 28. 165. 200. 551. 571.
 Oranienburg 355. 434.
 Orleans 13. 15. 18. 32. 289. 336.
 357.
 Orsières 10. 356.
 Ostia 9.
 Ouchy 25.
- Padua** 10. 357.
 Palermo 573. 576.
 Pamplona 10. 356.
 Panama 560.
 Paoli 13. 16. 115.
 Paris 12. 13. 15. 32. 134. 183.
 220. 289. 357. 368. 378. 390.
 392. 396. 397. 399.

- Parma 7. 356.
 Pau 26.
 Paulista 16. 199. 308. 430.
 Peggau 9.
 Pennsylvania 4. 134. 259. 430.
 Peoria 356.
 Perosa 9.
 Perpignan 62.
 Pescia 9.
 Philadelphia 5. 11. 13. 16. 115.
 119. 120. 135. 308. 399.
 Piedimonte d'Alifi 10. 131. 369.
 Piedmont-Northern 432.
 Pilatus 548.
 Pinerolo 9.
 Pirano 21.
 Pittsburg 9. 10. 11. 357.
 Planches 24.
 Pleiades 24. 551.
 Pöstlingberg 165.
 Pötzleinsdorf 21.
 Pontebrolla 10. 356.
 Pontresina 18.
 Portorose 21.
 Posieux 21.
 Preßburg (Pozsony) 10. 21. 63.
 119. 196. 440.
 Preußen 13. 23. 220. 329. 335.
 342. 354.
 Puget-Sound 15.
 Pyrenäen 17.

Rathausen 32.
 Rhätische Bahn 18. 30. 115. 155.
 196. 220. 355. 375. 444.
 Rhein 357.
 Richmond 10. 256.
 Rigi 24. 357.
 Riksgränsen 17. 327. 355. 440.
 Rio de Janeiro 27. 608.
 Ritom 26.
 Ritten 24. 155. 200. 357. 551.
 566. 570.
 Rjukanfos 10. 115. 354. 440.
 Roma 9. 10.
 Rombach 7.
 Rotterdam 10. 116. 199. 357.
 Ruhr 6.

Saarbrücken 378.
 Sachsen 21.
 Sacramento 38.
 Salève 24.
 Salmansdorf 21.
 Salò 8.
 Saltjöbaden 9. 330.
 Salvatore 572.
 Samaden 18.
 San Francisco 10. 378.
 Sangritana 9.
 Sanguesa 10. 356.
 Sao-Paulo 25. 573.
 Schaffhausen 32.
 Scharnitz 122.
 Schenectady 10.
 Scherzlingen 220.
 Scheveningen 10. 115. 199.
 Schlesien 9. 10. 16. 356. 357.
 Schöllenen 24. 357. 557.
 Schöneberg 11. 34. 390. 393.
 Schuls 18.
 Schweden 6. 17. 21. 23. 379. 440.
 Schweiz 6. 17. 24. 26. 28. 30. 32.
 39.
 Schynige Platte 546.
 Sea-Cliff 10.
 Seashore 9. 133. 135.
 Seattle 21. 26.
 Seebach 18. 63. 444.
 Seelisberg 26. 587. 594. 595. 603.
 Serra (Brasilien) 573.
 Shildon 12.
 Siders 26. 587. 595.
 Siegburg 321. 331.
 Simplon 19. 23. 32. 141. 221. 351.
 354. 355. 444.
 Sion (Sitten) 19.
 Solothurn 9. 32.
 Sonloup 25. 587. 595. 596. 599.
 South-Bend 10. 115.
 Southport 12. 13. 115. 220.
 Spanien 13. 16.
 Spiez 18. 220.
 Spindlersfeld 123.
 Spokane 10. 432.
 Stanserhorn 576. 587. 595.
 Stansstad 24. 545. 551. 559.
 St. Antoine 25.
 St. Avold 7. 356.
 St. Bonifacio 9.
 St. Cergue 9.
 St. Clair 363.
 St. Ellero 548.
 St. Fè 10. 19. 444.
 St. Just 25.
 St. Moritz 18.
 St. Paul 15.
 St. Pölten 8. 10.
 St. Sebastian 27.
 Steglitz 21.
 Stockholm 9. 358.
 Stockport 20.
 Stresa 551.
 Stubaital 10. 120. 220.
 Südafrika 6.
 Südamerika 6.
 Sumatra 6.

Tabor 9. 358.
 Tarajka 25. 26. 576. 587. 595.
 Tarasp 18.
 Tátra 9. 21. 333. 358. 587. 595.
 Täuffelen 8.
 Tempelhof 22. 531.
 Territet 587.
 Tesserete 9. 319. 357.
 Texas 9.
 Thamshavn 10.
 Thun 8. 18. 355. 442.
 Tirol 24.
 Toledo 10.
 Toge 24. 357. 553. 567.
 Toscolano 8.
 Trait 24.
 Treib 26. 587. 594. 595. 603.
 Treport 595.
 Trient 9. 358. 383.
 Triest 24. 28. 165. 200. 357. 551.
 571.
 Trümmelbach 26.
 Turin 9.

Überetsch 8.
 Ubelbach 9.
 Ungarn 12. 18. 28.
 Untra 22.
 Usui 24. 357. 553. 567.

Vác 444.
 Valle Maggia 319. 320. 355. 444.
 Valtellina (Veltlin) 18. 19. 32.
 220. 289.
 Varese 32. 220. 289.
 Vermala 26. 587. 595.
 Verona 9.
 Vesuv 24. 26. 551. 572.
 Vigiljoch 27. 606.
 Villars 551.
 Villefranche 9. 62. 220. 325.
 Virginia 16.
 Virgl 26. 595.
 Visalia 10.
 Vohwinkel 12.

Warren 10.
 Washington 9. 10.
 Waterloo 12.
 Weidling 21.
 Wendelstein 24. 357.
 Wengernalp 24. 357. 546. 554.
 556.
 Westchester 16. 364.
 Western 5. 350.
 West-Jersey 9. 133. 135.
 Wetterhorn 27.
 Wettingen 18. 63. 444.
 Wien 8. 10. 20. 63. 119. 183. 196.
 199. 357. 382. 613.
 Wiesental 43.
 Winnipeg 62.
 Wohlen 9.
 Wöllersdorf 19.
 Worb 37.
 Wüstewaltersdorf 8.

Yorkshire 9. 12.

Zaukerode 7.
 Zeche Achenbach 6.
 Zossen 19.
 Zuckerhut 608.
 Zürich 23. 32. 101. 378. 381. 383.

Sachverzeichnis.

- Abgezwigte Kompensation** 197.
Abkühlung 221.
Abkühlungslinie 224. 228.
Ablenkrolle 585.
Achsdruck 168.
 — von Industriebahnen 402.
Achsen, Elastizität der 253.
Achsfolge 411.
Achslager, Lebensdauer 623.
Achsmotor 306.
ÄEG-Kupplung 244.
Äquivalente Temperatur 83.
Akkumulatoren: siehe Speicher.
Akkumulatorenfahrzeuge: siehe Speicherfahrzeuge.
Aktionsradius: siehe Reichweite.
Allmähliche Geschwindigkeitsregelung 309.
Amperestabzahl 194.
Anfahrbeschleunigung 144. 150.
Anfahrt 145.
Anfahrverluste 189.
Anfahrwiderstände 160.
Anfahrzugkraft 189.
Anfangstemperatur 224.
Anhängelast 165.
Ankerumfangsgeschwindigkeit 241. 254.
Anlagekosten 617.
 — durchschnittliche, für die elektrische Einrichtung 618.
Anlassen 188.
Anlaßwiderstände, Bemessung der 349.
 — Flüssigkeits- 348.
 — metallische 353.
 — Zahl der Stufen 346.
 — zeichnerische Ermittlung der Stufen 347.
Anschaffungskosten für elektrische Lokomotiven 616.
 — für Unterwerke und Fahrleitung 617.
Anstoßschalter 594.
Arbeitsdraht: siehe Fahrdraht.
Arbeitsleitung: siehe Fahrleitung.
Armausleger 99.
Aufhängung, federnde, von Motoren 255.
Auftrieb (Zahnbahnen) 538.
Ausdehnung des elektrischen Vollbahnbetriebes 6.
Ausgleich der Belastung 42.
Ausgleichsverbindung 190.
Ausgleichswiderstand 191.
Auslauf 145.
Auslaufweg 146.
Auslaufzeit 146.
Ausleger 99.
Ausnützung der Kraftwerke 619.
Ausnützungsziffer (Bahnkraftwerke) 32.
 — (Licht- und Kraftzentralen) 32.
Ausrundung von Gefällsbrüchen 585.
Aussteigzeit 182.
Ausweiche, selbsttätige 574.
Außenlaschen-Stoßverbinder 51. 139.
Automaten: siehe Höchststromausschalter.
Automatische Ausweiche 574.
Backenzahnklemme 125.
Bahnarten, Einteilung der 2. 3.
Bahnen, eisenbahntechnischer Verwendungszweck 2. 3.
Bahnkraftwerke 32.
 — Ausnützungsziffer 32.
Bahnmotor 183. 245. 250. 264.
 — Anfahrverluste 189.
 — Anfahrzugkraft 189.
 — Anlassen 188.
 — Bauformen des 239. 306. 339.
 — Beanspruchungsgrad 254.
 — Bemessung der Leistung 217.
 — Dauerleistung 218.
 — Drehmoment, Abhängigkeit des von der Klemmenspannung 187.
 — Einphasenkollektormotor — siehe diesen.
 — Erwärmung des 221.
 — federnde Aufhängung 255.
 — Feldschwächung 188.
 — fremdbelüfteter 236.
 — Gehäuse 255.
 — gekapselter 234.
 — Gestell-: siehe Gestellmotoren.
 — Gewichtsangaben 255.
 — Höchstleistungen 250.
Bahnmotor Kennlinien des 185. 186. 231.
 — — für das Anfahren 189.
 — Kreuzschaltung 191.
 — Lüftung des 234.
 — Parallelbetrieb 190.
 — Regelung der Drehzahl 188.
 — Reihenebeneinanderschaltung 190.
 — Reihenschaltung 188. 191.
 — selbstlüftender 236.
 — Stromverbrauch 218.
 — Stundenleistung 218.
 — thermische Kennlinien 337.
 — thermo-elektromechanische Kennlinien 231.
 — Trambahnanordnung 417.
 — Untergestell 240.
 — Verwendungsgebiete 241.
 — Wendepole 255.
 — Zahnradübersetzung 241. 245.
Bahnwiderstand (siehe auch Fahrwiderstand) 141.
Batcheldermotor 243. 306.
Bauformen der benzinelektrischen Fahrzeuge 523.
 — der Straßenbahnwagen 380.
 — des Untergestellmotors 306.
 — von Vollbahnlokomotiven 418.
Baugewicht, spez. von Triebfahrzeugen 169.
 — von Zahnbahnlokomotiven 569.
Baulängen von Lokomotiven 426.
Bauregeln für Benzinmotoren 522.
 — für Triebfahrzeuge mit Reibungsbetrieb 377.
Baustoffwirtschaft 241.
BBC-Antrieb 302.
Beharrungszustand 144.
Belastung, Art der, von Kraftwerken 31.
Belastungstafel 174.
Belastungstafeln für Dampflokomotiven 178.
 — für elektrische Lokomotiven 180.
 — Straßenbahntriebswagen 166.
Beleuchtung 374.
Bemessung der Widerstände 349.
Benzonelektrische Fahrzeuge 21. 518.

- Benzinelektrische Fahrzeuge, Bauformen 523.
 Benzinmotoren, Bauregeln 522.
 Bergmann-Antrieb 279.
 Berührungsdruk von Bügelstromabnehmern 363.
 — v. Rollenstromabnehmern 360.
 — von Stromabnehmern für Stromschienen 372.
 — von Walzenstromabnehmern 369.
 Beschleunigung 144. 150.
 Beschleunigungskraft 417.
 Betonmaste 113.
 Betriebsarten von Standseilbahnen 573.
 Betriebsausgaben 611.
 Betriebsergebnisse von Straßenbahnen 613.
 Betriebsspannung gleisloser Bahnen 515.
 — für Stromschienen 135, 136.
 Betriebsstoffe, Kosten der 615.
 Betriebssysteme der Straßenbahnen 574.
 Beusch-Lagerfutter 623.
 Bewegungsbild 146.
 — Analyse des 143.
 Bewegungsgesetze der Züge 141.
 Bleiakkumulator: siehe Speicher Blindwelle 272.
 — federnde Lagerung der 287.
 — Parallelkurbelgetriebe mit 277.
 Blitzableiter, Hörner- 373.
 Blitzschutz-Drosselspule 373.
 — für Fahrzeuge 373.
 — für Kettenfahrlösungen 131.
 Bodenpressung 100.
 Bogenlänge einer Leitung 74.
 — der Parabel 583.
 Bogenschubkurbelgetriebe 294.
 Bremsarbeit 219.
 Bremsen-Anordnung bei Lokomotiven 425.
 — für Straßenbahnen 389.
 — für Zahnbahnen 553.
 — Hand- 554.
 — pneumatische, für Straßenbahnen 389.
 — Scheiben- 209.
 — Schienen- 210.
 — selbsttätige 556.
 — Solenoid- 206.
 Bremsgeschwindigkeit 147.
 Bremsklotzanordnung 75.
 Bremskupplungen 375.
 Bremsschaltungen 205.
 Bremsung 146.
 — elektrodynamische 199.
 — elektromagnetische 199.
 — gemischte 202.
 — Kurzschluß- 201.
 — mittelbare 203.
 — Nutz-: siehe diese.
- Bremsung, unmittelbare 201.
 — von Windwerken 599.
 Bremsverlust 146.
 Bremsverzögerung 147. 149.
 Bremswalze 311.
 Bremsweg 147. 603.
 Bremswiderstände 203. 349.
 — Berechnung der 203.
 — graphische Ermittlung der 204.
 Bremszahnrad 555.
 Bremszahnstange 574.
 Brennstoffe 615.
 Brückenkonstruktion (Fahrleitung) 110.
 Brückenschaltung 313.
 Bügeldruk 363.
 Bügeleisenform (Lokomotiven) 404.
 Bügel-Stromabnehmer 70. 362.
 — für große Höhenunterschiede 366.
 — Lebensdauer 363.
 — mit drehbarem Federbock 366.
 — mit Druckluftbetätigung 368.
 — mit durchdrückbarem Rohrsystem 365.
 — mit durchgehendem Rohrsystem 364.
 — mit Scherengestell 366.
 — mit 2 Schleifstücken 368.
 — mit teleskopartigem Rohrsystem 365.
 — nutzbare Breite 363.
 — Schleifstück 364.
 — zulässige Stromstärken 363.
 Bürsten, Lebensdauer der 624.
 Bürstenverschiebung, stufenlose Steuerung durch 343.
- Dampf**-elektrische Fahrzeuge 516.
 Dampflokomotive, Belastungstafel 180.
 — Vergleich mit der elektrischen Lokomotive 192.
 Dauerleistung 218, 226.
 Decksitzwagen 380.
 Deltaisolatoren 127.
 Dieselelektrische Fahrzeuge 518, 523.
 Direkte Speisung 33.
 Doppelbetrieb (Standseilbahnen) 573.
 Doppelgespeicher Motor 194.
 Doppelkettenwerk 122.
 Doppel-Luftführung 256.
 Doppelmotor 191, 250, 306.
 Doppeltes Schubkurbelgetriebe 293.
 Doppeltes Zweileitersystem 57.
 Drahtseil 587.
 — Berechnung 588.
 — Flechtarten 588.
 — Vorschriften 591.
 Drahtseilbahnen: siehe Standseilbahnen
- Drahtverbinder 123.
 — Drehgestell-Lokomotiven 405.
 Drehgestell-Triebwagen 386.
 Drehmoment, Abhängigkeit von der Klemmenspannung 187.
 Drehstrom-Bahnen 18.
 — -Fahrleitung 114.
 — -Lokomotiven 428, 438, 442, 444.
 — -Lokomotiven, Steuerung von 349.
 — -Motor 187, 350.
 — -Motor, Kaskadenschaltung 350.
 Drehtransformator 342.
 Drehzahl, Regelung der 188.
 Dreieckrahmen (Bergmann) 279.
 — (Kandó) 306.
 Dreileitersystem 57.
 Dreiphasenkurbelgetriebe 272.
 Dritte Schiene (siehe auch Stromschiene) 102.
 Drosselspulen 42, 373.
 Durchhang (Fahrleitung) 72.
 — Messung des 89.
 — verhältnismäßiger 74.
 — des Tragseiles 90.
 Dynamische Funkenspannung 194.
 Dynamotor 375.
- Effektiver Widerstand** 50.
 Eigenfrequenz 292.
 Einankerumformer 36.
 Einfachkettenwerk 120.
 Eingriffsdauer 546.
 Einphasenkollektormotor, Arten des 192.
 — doppelt gespeister 194.
 — mit abgezwigter Kompensation 197.
 — Stromwendung 193.
 — Vergleich mit dem Gleichstrommotor 199.
 Einpolige Erdung 45. 48.
 Einrichtung des Führerstandes 406.
 Einsteigzeiten 182.
 Einteilung der Bahnarten 2. 3.
 — der Getriebearten 306.
 Einzelachsenantrieb (Westinghouse) 259.
 — (BBC) 302.
 — (MFO) 303.
 — (SSW) 303.
 Einzelantrieb 302. 306. 418.
 Einzelschalter 321.
 — elektromagnetische 322.
 — elektropneumatische 324.
 — mit Nockensteuerung (PC) 336.
 — mit Wälzkontakten 322.
 Eisenbahn-Ministerialverordnung 412. [1.
 Eisenbahntechnik, Richtlinien der

- Eisenmaste 100. 112.
 Eislast 75. 81.
 Elastische Formänderung des Parallelkurbelgetriebes 267.
 Elastizität der Achsen 253.
 Elektrische Ausrüstung von benzin-elektrischen Fahrzeugen 525.
 — — von Lokomotiven 412.
 — — von Straßenbahntriebwagen 388.
 — — von Triebfahrzeugen 183.
 — — von Zahntriebfahrzeugen 567.
 — Einrichtung von Bahnen, durchschnittliche Kosten der 618.
 — Kennwerte (Fahrleitung) 50.
 — Nebeneinrichtungen von Zahntriebfahrzeugen 568.
 Elektrodynamische Bremsung 199.
 — — gemischte 202.
 — — mittelbare 203.
 — Stromwirkung 64.
 Elektromagnetische Induktion 68.
 Elektrostatische Induktion 63.
 Endschalter 594.
 Endtemperatur 224.
 Erddruck 100.
 Erdstromdichte 67.
 Erdstromvorschriften 64. 138.
 Erdung, einpolige 45, 48.
 Erdwiderstand 66.
 Erhaltungskosten für elektrische und Dampf-Lokomotiven 4.619.
 Erwärmung der elektrischen Maschinen 221.
 Erwärmungslinie 224.
 — geometrische Eigenschaften der 227.
Fahrdrabt 102.
 — -halter 107.
 — — zusammenstellbare 108.
 — Querschnittsformen 103.
 Fahrdiagramme: siehe Bewegungsbild.
Fahrleitung 49.
 — Abspannisolatoren 108.
 — äquivalente Temperatur 83.
 — Anschaffungskosten 617.
 — Ausleger 99.
 — Baustoffe 77.
 — Berechnung der Stützpunkte 98.
 — Brückenkonstruktion 110.
 — Drehstrom- 113.
 — Durchhang 72.
 — Eislast 75.
 — elektrische Kennwerte 50.
 — Erwärmung 55.
 — Fernwirkungen 61.
 — gegenseitige Induktion 52.
 — für gleislose Bahnen 513.
 — Gruben- 114.
Fahrleitung. Hautwirkung 50.
 — Impedanz 53.
 — induktiver Spannungsabfall 53
 — Isolator- 105.
 — Isolatorhalter- 105.
 — Kennweite, elektrische 50.
 — Ketten- (siehe auch diese) 115.
 — Klemmwerke 104.
 — Kreuzung 105.
 — kritische Spannweite 82.
 — kritische Temperatur 83.
 — Kurvenzug 95.
 — Längänderung, geometrische 76.
 — — physikalische 76.
 — Längsaufhängung 102.
 — Längsschnitt 70.
 — Lageplan 94. 95.
 — Lebensdauer 622. 623.
 — Leitungsbau 100.
 — Maste 99. 111.
 — Mastteilung 94. 95.
 — mechanische Eigenschaften 68.
 — Messung des Durchhanges 89.
 — Oberleitung 101.
 — Porzellanisolation 108. 114.
 — Queraufhängungen 98.
 — Regelquerschnitte 103.
 — Schalldämpfer 111.
 — Schaltung der 131.
 — für schienenlose Fahrzeuge 513.
 — Selbstinduktion 52.
 — selbsttragende 102.
 — schiefes Spannungsfeld 87.
 — Spannungsabfall 50. 58.
 — Spannerwerk 97.
 — Speisung der 56. 60.
 — Streckenisolatoren 105.
 — Stromschiene 133.
 — Stromverteilung 55.
 — Stützpunkte 110.
 — Systeme 70.
 — Theorie und Berechnung 49.
 — Tragwerk 110.
 — Tunnel- 115.
 — Vielfachaufhängung: siehe Kettenfahrleitung.
 — virtuelle Spannweite 87.
 — Widerstand, effektiver 50.
 — — Ohmscher 50.
 — Winddruck 75.
 — zulässige Beanspruchungen 77.
 — Zustandsgleichung, allg. 76.
 — Zweck der 100.
Fahrgeschwindigkeiten 182. 569. 593.
Fahrlinien 174.
Fahrtpreise (Straßenbahnen) 612.
Fahrschalter 309.
 — Funkenlöschung 311. 320.
 — direkte Steuerung mit 310. 314.
 — mit Vorgelege 317.
Fahrtrichtungswalze 311.
Fahrwiderstand 141. 142. 143. 157.
Fahrwiderstand, Auffahr- 160.
 — Ermittlung des 155.
 — von Lokomotiven 159.
 — von Straßenbahnfahrzeugen 155.
 — von Vollbahnfahrzeugen 157.
Fahrzeit 150.
 — reine 182.
Fahrzeuge, Lebensdauer der 623.
Fangvorrichtung für Rollenstromabnehmer 362.
Federbock 360. 366.
Federkupplung 424.
federnde Zahnräder 251.
Federung von Lokomotiven 416.
Feldschwächung 152. 188. 309.
 — selbsttätige 202.
Fernleitungen 48. 101.
Fernsteuerung (Seilbahnen) 600.
Fernwirkungen, elektrodynamische 64.
 — elektromagnetische 68.
 — elektrostatische 63.
Fischgrätenzahnstange 548.
Fliehkräfte, Beanspruchung der Anker durch 254.
Flechtarten (Seil) 587.
Fluchtlinientafeln: siehe Rechentafeln.
Flüssigkeitsgetriebe (Lentz) 399.
Flüssigkeitswiderstände 348.
Freiluftschalter 131.
Freitragende Fahrleitung 102.
 — Speisung 58.
Fremdlüftung 236.
Frequenz, Eigen- 292.
 — von Stadtbahnen 613.
 — von Straßenbahnen 611.
Führerlose Lokomotiven 535.
Führerstand, Einrichtung des 406.
Füllstoffumformer 298.
Funkenlöschung (Fahrschalter) 311. 320.
Funkenstrecke (Blitzschutz) 373.
Funkenspannung, dynamische 194.
Funktionsleiter 629.
Ganzkupplung 244.
Gefällsbrüche, Ausrundung der 585.
Gegenfunkenspannung 194.
Gegenkomoundwicklung 42.
Gegenseitige Induktion 52.
Gemischte Bahnen 550. 561.
Generator: siehe Stromerzeuger.
Generatorwirkung v. Motoren 191.
Geometrie des übersetzten Gestellmotors 262.
 — des Parallelkurbelgetriebes 263.
 — der Schlitzkuppelstange 273.
 — des Zahnradvorgeleges 249.
Geometrischer Mittelwert 50.
Geschobene Fahrzeuge (Zahnbahnen) 571.

- Geschlossenes Seil 588.
 Geschwindigkeitsregelung 188.
 — allmähliche 309.
 — — bei Umformerlokomotiven 528.
 — durch Feldschwächung 309.
 — durch Stufentransformator 309.
 — stufenweise 309.
 — durch Widerstände 309.
 Gestellmotor 240. 258.
 — für Einzelantrieb 302.
 — Geometrie des übersetzten 262.
 — Getriebearten mit 307.
 — Gewichtsangaben 261.
 — langsam laufender 259.
 — mit Zahnradübersetzung 261.
 Getriebearten, grundsätzliche Einteilung der 306.
 — mit Gestellmotoren 307.
 — mit stetiger Kraftübertragung 416.
 — mit Untergestellmotoren 306.
 — für Zahnbahn-Triebfahrzeuge 553.
 Gitterplatten (Speicher) 530. 532.
 Gleichgewichtsprofil (Standseilbahnen) 576.
 Gleichstrombetrieb mit Wechselstromeinrichtungen 199.
 Gleichstrommotor: siehe Bahnmotor.
 Gleisführung von Standseilbahnen 575.
 Gleislose Bahnen 20. 511.
 — — Fahrleitung 513.
 — — Fahrzeuge 515.
 — — Rollwiderstände von 511. 512.
 — — Stromabnehmer 513.
 — — Stromsystem 515.
 Gleiten, ideales 163.
 Gleitende Reibung 163.
 Gliedermaschine (Lokomotiven) 161.
 Gliederwagen (Zahnbahnen) 571.
 Glocken-Isolator 127.
 Goldschmidtsches Schweißverfahren 140.
 Gruben-Fahrleitung 114.
 Gruben-Lokomotiven 403.
 — — führerlose 535.
 Gruben-Lokomotivmotor 246.
 Grundgleichung des Elektromotors 308.
 Grundrisse von Stadtbahntriebwagen 397.
Halblogarithmisches Bezugssystem 227.
 Hängedraht 116.
 Hängeisolatoren 127.
 Hakenschloß 126.
 Haltezeiten 150. 182.
 Handbremse (Zahnbahnen) 554.
 Harmonische Eigenschwingung (Parallelkurbelgetriebe) 290.
 Hartgummiisolation, Lebensdauer 106. 623.
 Hauptschaltwalze 311.
 Hauptschlußcharakteristik 185.
 Hauptschlußmotor: siehe Bahnmotor und Reihenschlußmotor.
 Hautwirkung (Skineffekt) 50. 52.
 Hebearbeit 219.
 Hebungswiderstand 143.
 Heizung der Fahrzeuge 375.
 Hewlettisolator 129.
 Hintereinander-Anordnung (von Motoren) 404.
 Höchststrom-Ausschalter 374.
 Höhenplan, theoretischer (Seilbahnen) 576.
 Hörner-Blitzableiter 373.
 Hohlwelle, System Klien-Lindner 303.
 — System Liechty 303.
 — System Siemens-Schuckert 303.
 — System Westinghouse 243.
 Holzmaste 99. 111.
 — Verbundbauart 99. 112.
 Hüpfen (siehe auch Einzelschalter) 321.
 Hyperbel konstanter Leistung 186.
Impedanz 53.
 Induktion, elektromagnetische 68.
 — gegenseitige 52.
 — statische 63.
 Induktionsmotor 186. 192.
 — Nutzbremmung mit 214.
 Induktiver Spannungsabfall 53.
 Industriebahnen 6.
 — Reisegeschwindigkeit 182.
 Industriebahnlokomotiven 400.
 — Achsdruck 402.
 — besondere Kennzeichen 400. 402.
 — Drehgestell- 405.
 — mit Tandem-Anordnung 404.
 — Radstand 403.
 Innenrahmen 425.
 Instabilitätsgebiete (Parallel-Kurbelgetriebe) 291.
 Isolation der Stromabnehmer 372.
 — Lebensdauer 613.
 Isolatoren, Abspann- 108. 127.
 — Delta- 127.
 — Glocken- 127.
 — Hänge- 127.
 — Hewlett- 129.
 — Kelch- 129.
 — Kettenfahrleitungs- 126.
 — Kettenglied- 129.
 — für Stromschienen 136.
 — Trageil- 120.
 Isolatorbolzen 107.
 Isolatorhalter 105.
Jahresleistung 4. 613.
 Jährliche Zahl der Straßenbahnfahrten 611.
Kabel (für Fahrzeuge) 376.
 — für Seilbahnen 587.
 Kalorisch-elektrische Fahrzeuge 516.
 Kandórahmen 283.
 — Auflösung des 287.
 Kaskadenschaltung 350.
 Kastenbauart (Lokomotiven) 419.
 Kastengehäuse (Bahnmotoren) 255.
 Kastenplatten (Speicher) 532.
 Keilkopfschiene 576.
 Keilkopfs Zahnstange (Strub) 547.
 Kelchisolator 129.
 Kennlinien f. d. Anfahren 189.
 — des Bahnmotors 185.
 — der Scheibenbremse 210.
 — der Schienenbremse 211.
 — der Solenoidbremse 207.
 — thermische 236.
 — thermisch - elektromechanische 231.
 Kennzeichen, allgemeine der Bahnarten 6.
 Kettenfahrleitung 81. 115.
 — Backenzahnklemme 125.
 — Blitzschutz 131.
 — Drahtverbinder 123.
 — Durchhang des Trageiles 90.
 — Einfach- 120.
 — Hakenschloß 126.
 — Hängedraht 116.
 — Isolatoren für die 126.
 — Schaltung von 131.
 — selbsttätige Nachspannung 118.
 — Selbstspannende Seilklemme 126.
 — Seilverbinder 123.
 — Streckentrenner 131.
 — Trageil 90, 116.
 — Trageilisolatoren 120.
 — Würgebunde 123.
 Kettengliedisolator 108. 129.
 Kettenlinie 72. 115. 581.
 Kettenwerk (siehe auch Kettenfahrleitung).
 — Doppel- 122.
 — einfaches 120.
 — System Paul 123.
 — Verbund- 123.
 Klemmenspannung.
 — Abhängigkeit des Drehmoments von der 186.
 Klemmöse, frei bewegliche 104.
 Klemmwerk (siehe auch Fahrleitung) 104.
 Kletterzahnstange (Peter) 549.
 Kippmoment 100.
 Kohlenverbrauch von Dampfbahnen 615.
 — von Gebirgsbahnen 29.

- Kohlenverbrauch, Grenzwerte 618.
 — Vergleich zwischen Dampf- und elektrischem Betrieb 30.
 — Vershubdienst 618.
 Kollektor, Lebensdauer 624.
 Kollektormotor: siehe Einphasen-Kollektormotor.
 Kollektorregler von Döry 344.
 Kommutierung: siehe Stromwendung.
 Kompensation, abgezwigte 197.
 Kompensationswicklung 195.
 Kompensierter Reihenschlußmotor 197.
 Kompoundseil 588.
 Kontaktleine 361.
 Korrosionsbereich 65.
 Kraftbedarf (Seilbahn) 591.
 Kraftübertragung, Art der 2.
 — stetige, durch Stangen 280.
 — mit rein umlaufenden Teilen 264.
 Kraftwerke, Ausgleich der Belastung 42.
 — Ausnützung der 619.
 — bahnfremde 46.
 — Belastung der 31.
 — Schaltregeln 44.
 — Schutzzeineinrichtungen 45.
 Kräfteplan des Dreiphasenkurbelgetriebes 272.
 — des Parallelkurbelgetriebes 278.
 — des Schlitzkuppelrahmens 283. 286.
 — der Schlitzkuppelstange 275.
 — der Seilspannungen an einer Kurvenrolle 585.
 — von Triebzahnradern 537.
 — von Zahnbahnlokomotiven 540.
 — des Zahnradgetriebes 304.
 — des Zweistangenantriebes 282.
 Kräftepiel im Parallelkugelgetriebe 267.
 Kreisdiagramm zur Ermittlung des quadratischen Mittelwertes 237.
 Kreiselwirkung der Motormassen 416.
 Kreuzschaltung 191. 201. 205.
 Kreuzschlag (Drahtseile) 588.
 Kreuzungen (Fahrleitungen) 105.
 Kritische Geschwindigkeit (Lokomotiven) 289. 417.
 — Spannweite 82.
 — Temperatur 83.
 Krümmungswiderstand 144.
 Kugellager 160. 624.
 Kühlung (siehe auch Lüftung) 425.
 Kuppelrahmen 283.
 Kuppelungen, elektrische f. Fahrzeuge 375.
 Kurbelgetriebe der Dampflokomotiven 265.
 — doppeltes 293.
 Kurbelgetriebe, Dreiphasen- 272.
 — massenfreies 271.
 — massenreiches 288.
 — Parallel-: siehe dieses.
 — statisch bestimmtes 265.
 — statisch unbestimmtes 265.
 — Stetigkeitsstörungen im 296.
 — Vergleich zwischen Dampf- und elektrischer Lokomot. 266. 269.
 Kurbelviereck 294.
 Kurvenrollen 585.
 Kurvenzug 95.
 Kurzschlüsse 32.
 Kurzschlußbremsung, gemischte 202.
 — mit selbsttätiger Feldschwächung 202.
 — mittelbare 203.
 — unmittelbare 201.
 Längenprofil, theoretisches (Seilbahnen) 574. 576.
 Längsaufhängung 102.
 Längsschnitt (Fahrleitung) 70.
 Längsschnitt, theoretischer (Standseilbahn) 576.
 Lageplan einer Fahrleitung für Bügel und Walzenstromabnehmer 95.
 — für Rollenstromabnehmer 94.
 Lagerspiel im Parallelkurbelgetriebe 269.
 Lagerung, federnde (Blindwelle) 287.
 Lamellenzahnstange 547.
 Langschlag (Drahtseil) 588.
 Laufzeiten von Rollenstromabnehmern 362.
 — von Bügelstromabnehmern 363.
 Lebensdauer der der Benutzung unterworfenen Bestandteile 622.
 Leiergestell (Lyra) 364.
 Leistung je Achse 162.
 Leistungsdiagramm 31.
 Leitzahnstange (Riggenbach) 546.
 Leitfähigkeit (von Stromschienen) 137.
 Leitung: siehe Fahrleitung.
 Leitungsanlage 48.
 Leitungsbau 13.
 Lenkachsen 386.
 Lentz-Getriebe 299.
 Linienführung von Standseilbahnen 574.
 Lötöse 104.
 Lokalbahnen (siehe auch Überlandbahnen) 8.
 Lokomotiven-Achsfolge 411.
 — Angaben über ausgeführte 427 ff.
 — Anordnung der elektrischen Ausrüstung 412.
 Lokomotiven, Anschaffungskosten 616.
 — Bauformen 418.
 — Baulängen ausgeführter 426.
 — Belastungstafeln für 178. 180.
 — Bremse, Anordnung der 425.
 — Entwürfe 419.
 — Erhaltungskosten 619.
 — Fahrwiderstände 159.
 — Federung 416.
 — führerlose 535.
 — Führerstandseinrichtungen: siehe Führerstand.
 — für gemischte Bahnen 562.
 — Getriebe 416.
 — Gewichte 173, 415.
 — Gruben- 246.
 — Schwerpunktslagen 415.
 — für Industriebahnen: siehe Industriebahnlokomotiven.
 — kritisches Gewicht 289. 417.
 — Kreiselwirkung der Motormassen 37. 416.
 — Leistungen und Gewichte (Zahnbahnen) 569.
 — Maßbestimmungen 412.
 — Mechanik 413.
 — Nebenbewegungen, störende 414.
 — Rahmen 425.
 — Schwerpunktslage 415.
 — spezifische Gewichte 173.
 — Stetigkeitsstörungen 414.
 — Steuerungen 354, 357.
 — Vollbahn- 411.
 — für reine Zahnbahnen 556.
 — für gemischte Bahnen 561.
 Lotterantrieb 280.
 Lüftung der Bahnmotoren 234.
 — mit Doppelluftführung 256.
 — mit Einfachluftführung 255.
 — Fremd- 236.
 — Selbst- 236.
 Luftdruckbremse 389.
 Luftsaugbremse (für Straßenbahnen) 389.
 Luftwiderstand 143.
 Malletlokomotiven 161.
 Massen, rotierende 154. 542.
 Massenfreies Kurbelgetriebe 271.
 Massenreiches Kurbelgetriebe 288.
 Massenwirkung 154.
 Masseplatten (Speicher) 530.
 Maste 99.
 — Eisen- 100.
 — Holz- 99.
 — Holz-, Verbundbauart 99.
 — Lebensdauer 622.
 — Standsicherheit 100.
 — zulässige Beanspruchungen 99.
 Mastteilung 94. 95.
 Mauerhaken 98. 111.

- Mechanische Eigenschaften der Leitungen 68.
 Mehrachsenantrieb 241.
 Milderung der Spitzenbelastung 32.
 Mittelbare Speisung 56.
 — Steuerungen (siehe auch diese) 310. 321. 325.
 Mitteleinstieg 384.
 Motoren: siehe Bahnmotor.
 — Aufhängung 255.
 — Gehäuse 255.
 — Gestell: siehe Gestellmotor.
 — Lebensdauer der 623.
 — Obergestell: siehe Gestellmotor.
 — Untergestell: siehe Bahnmotor.
 — für Zahntriebfahrzeuge 553.
 Motor-Generatoren 37.
 Motorkennlinien: siehe Kennlinien.
 Motorwagen (siehe auch Triebwagen).
 — Stadtbahn- 390. 397. 399.
 — Straßenbahn- 378.
 — Überlandbahn- 379.
 — Untergrundbahn- 390. 397. 399.
 — Vollbahn- 327. 328.
 — für gemischte Zahnbahnen 561. 563.
 — für reine Zahnbahnen 558.
 — mit zwei Geschwindigkeitsgebieten 563.
 Nebenmotor 516.
 Nachspannung, selbsttätige, von Fahrleitungen 118.
 Nebenbewegungen von Lokomotiven 414.
 Nebeneinrichtungen (elektr. Ausrüstung) 373.
 Nebenschlußcharakteristik 185.
 Nebenschlußmotor 186.
 — Generatorwirkung 191.
 — Parallelschaltung 191.
 Neigungsgrenze 536.
 Nicken 414. 417.
 Nickel-Eisen-Akkumulator 530.
 Nockensteuerung 336.
 Nomogramme: siehe Rechentafel.
 Nomographie 626.
 Nüsse (Spannkugeln) 108.
 Nutzbare Breite von Schleifbügeln 363.
 Nutzbremmung 211.
 — mit Drehstrommotoren 214.
 — mit Nebenschlußmotoren 212.
 — mit Reihenschlußmotoren 213.
 — Vergleich zwischen Gleich- und Wechselstrom 216.
 — bei Zahnbahnen 567.
 Oberbau, Lebensdauer 622.
 — Systeme (Seilbahnen) 576.
 Obergestellmotor: siehe Gestellmotor.
 Oberleitung (siehe auch Fahrleitung) 101.
 Obertagbetrieb 7.
 Ölschalter 374.
 Öse, frei bewegliche 104.
 Offenes Seil 573.
 Parallelbetrieb von Motoren 190.
 Parallelkurbelgetriebe 263.
 — Analyse des 265.
 — mit Blindwelle 277.
 — elastische Formänderungen 267.
 — elementares 266.
 — Geometrie und Kräfteplan 263.
 — ideales 290.
 — Instabilitätsgebiete 290.
 — harmonische Eigenschwingung 290.
 — Lagerspiel 269. 270.
 — pseudo-harmonische Schwingung 290.
 — quasi-harmonische Schwingung 290.
 — Richtkonstante 291.
 — Schüttelschwingungen des maschinenreichen 289. 290.
 — Starrheitsgrad 292.
 — Stetigkeitsstörungen 296.
 — Stichmaßfehler 290.
 PC-Zugsteuerung der GEC. 336.
 Pendelbetrieb (Standseilbahnen) 573.
 Periodenumformer 41.
 Permeabilität von Schienen 53.
 — von Eisenleitern 53.
 Personalkosten 614.
 Pfeilräder 254.
 Phono-Electric-Draht 103.
 Piranischaltung 33.
 Plattformwagen 534.
 Pneumatische Bremsen f. Straßenbahnen 389.
 — Steuerungen 309.
 Polumschaltung 188. 350.
 Porzellanisolation 108. 114.
 Projektive Skalen 635.
 Produktnomogramm 628. 634.
 Pseudoharmonische Schwingung 290.
 Pufferbatterie 26. 42.
 Pufferung 42.
 Pulsierender Gleichstrom 37.
 Punktskala 629.
 Quadratischer Mittelwert (Kreisdiagramm) 237.
 Quasi-harmonische Schwingung (Parallelkurbelgetriebe) 290.
 Quecksilberdampf-Gleichrichter 527.
 Queraufhängung (Fahrleitung) 37. 98.
 Querfeld 194. 196.
 Querfeldspannung 195.
 Querschnitte, Regel- (Fahrleitungen) 103.
 Querschnitte von Stromschienen 133.
 Querverbinder (Schienen-) 140.
 Raddruck 168.
 Radreifen, Form des 167.
 — Lebensdauer der 623.
 Radstand (Industriebahnlokomotiven) 403.
 — fester (Vollbahnlokomotiven) 423.
 Rahmen (Lokomotiv-) 425.
 Rechentafel zur Bestimmung der Anhängelast 166.
 — — der Ausrundung von Gefällsbrüchen 583.
 — — der Auslauf- und Bremszeit 148.
 — — des Lokomotivgewichtes 174.
 — — der Motorleistung 170.
 — — der Standsicherheit von Zahnbahnlokomotiven 571.
 — — der Zugsgewichte 177. 178. 180.
 — — von Bewegungsbildern 176.
 — — von Rollwiderständen 156.
 — — Ermittlung von Fahrlinien 176.
 — für die allgemeine Zustandsgleichung einer freigespannten Leitung 78. 80. 81.
 — für die Montagespannungen einer freigespannten Leitung 85.
 — für Kettenfahrleitungen 86.
 — für Kurventeilungen 96. 97.
 — für 4 Veränderliche 637.
 — Produkten- 628. 634.
 — für Seiltriebe 596.
 Regelarten (Steuerungen, siehe auch diese) 309.
 Regelung der Geschwindigkeit und Drehzahl 188.
 — rein allmähliche 309.
 — stufenweise 309.
 Regelleistung 218.
 Regelquerschnitte 103.
 Reibung, gleitende 163.
 — im Zahnradgetriebe 305.
 Reibungsarbeit 219.
 Reibungsbahnen 6.
 — mit Zahntrieb 550.
 Reibungsgeschwindigkeit 169.
 Reibungsgewicht 150. 165.
 Reibungsgrenze 164.
 Reibungskraft 162.
 Reibungsschluß 161.
 Reibungswiderstand 142. 161.
 Reibungszahlen (Schienenbremsen) 211.
 — für Seiltrieb 593.
 Reibungsziffer 162. 166.

- Reichweite von Speicherfahrzeugen 530.
 Reihenbeneinanderschaltung 190. 309. 312.
 Reihenparallelschaltung 190. 309. 312.
 Reihenschaltung von Motoren 188. 191.
 — von Widerständen 321.
 Reihenschlußcharakteristik 185.
 Reihenschlußmotor (siehe auch Bahnmotor) 186.
 — doppelt gespeister 194.
 — Generatorwirkung des 191.
 — mit abgezweigter Kompensation 197.
 — Nutzbremmung 213.
 Reisegeschwindigkeit 182.
 — von Stadtbahnen 390.
 — von Straßenbahnen 390.
 Rentabilität: siehe Wirtschaftlichkeit.
 Resonanzerscheinungen von Stromerzeugern 44.
 Richtkonstante 291.
 Rohrmaste 113.
 Rohrsystem, durchdrückbares (Bügel-Stromabnehmer) 365.
 — teleskopartiges (Bügelstromabnehmer) 365.
 Rollen, ideales 163.
 Rollenlager 624.
 Rollenstromabnehmer 70. 359.
 — Abnutzung der 362.
 — Berührungsdruck 360.
 — Fangvorrichtung 362.
 — Federbock 360.
 — Laufzeiten 362.
 — mit Scherengestell 362.
 — zulässige Stromstärken 360.
 Rollwiderstand (siehe auch Fahrwiderstand) 142.
 — von gleislosen Bahnen 511. 512.
 — von Lokomotiven 159.
 — von Zügen 157.
 Rosetten 111.
 Rotierende Massen 154. 542.
 Rückleitung (Schienen-) 50. 138.
 — Lebensdauer der 623.
 — Widerstand der 51.
 — zulässiger Spannungsabfall 138.
 Rutschkupplung 424. 554.
 Sandstreuer 388.
 Schalldämpfer (Fahrleitung) 111.
 Schaltungsregeln für Fahrzeuge 310.
 — für Kraftwerke 44.
 — Grundsätze der 310.
 Schaltung der Widerstände 320.
 Schaltwalzen für Drehstrommotoren 352.
 Scheibenbremsen 209.
 — Kennlinien der 210.
 Scheinigscher Schienenschuh 140.
 Scherenstromabnehmer, Bügel- 366.
 — Doppel- 368.
 — mit Druckluftbetätigung 368.
 — Rollen- 362.
 Schienenbremse 210.
 — Kennlinien der 211.
 — Reibungszahlen 211.
 Schienen, Permeabilität von 53.
 Schienenquerschnitt 52.
 Schienenquerverbinder 140.
 Schienenrückleitung (siehe auch Rückleitung) 46. 50. 56.
 — Widerstand der 51.
 Schienenstoß 50.
 — verschweißter 139.
 Schienenstoßverbinder 50. 138.
 Schienenschuh, Scheinigscher 140.
 Schleifbügel: siehe Bügel.
 Schleifschuh 362.
 Schleifstück 362.
 — aufgesatteltes 364.
 — eingesetztes 364.
 — Lebensdauer 363.
 Schlingern 414.
 Schlitzkuppelrahmen 283.
 Schlitzkuppelstanze 273. 306.
 Schlüpfung 163.
 Schmelzsicherungen 374.
 Schmier- und Putzmaterial 619.
 Schmierung von Zahnrädern 539.
 — von Zahnstangen 539.
 Schnellschlußbremsen (Seilbahnen) 604.
 Schoopsches Spritzverfahren 51. 140.
 Schrägstangenantrieb 275. 306. 417.
 Schrägverzahnung 306.
 Schubkurbelgetriebe, doppeltes 293.
 — Stetigkeitsstörungen 296.
 Schüttelschwingungen 266.
 — des massenreichen Parallelkurbelgetriebes 288.
 Schützen 321.
 — elektromagnetische 322.
 — elektropneumatische 324.
 — Nocken- 336.
 — pneumatische 309.
 — -steuerung 321.
 Schutzdrosselpulen 373.
 Schutzeinrichtungen für Kraftwerke 45.
 Schwachstrombetriebe, Beeinflussung der 63.
 Schwanken 414.
 Schwebeseilbahnen 26. 604.
 Schwerpunktlage von Lokomotiven 415.
 Schwingung, harmonische Eigen- 290.
 — quasi-harmonische 290.
 Schwingung, pseudo-harmonische 290.
 Schwungradumformer 43.
 Seil 587.
 Seilbahnen (siehe auch Standseilbahnen) 572.
 — Betriebssysteme 574.
 Seileck 58.
 Seilführung 574.
 Seilklemme, selbstspannende 126.
 Seilschloß 125.
 Seilspannung 88. 585.
 Seilverbinder 123.
 Seilleitungswiderstand 592.
 Seilrollen 584. 585.
 Seitlicher Zahneingriff 565.
 Selbstinduktion 50.
 — der Fahrleitung 52.
 Selbstlüftung 236.
 Selbsttätige Ausweiche 574.
 Selbsttätiges Umformerwerk 38.
 Selbsttragende Fahrleitung 102.
 Seriencharakteristik (siehe auch Reihenschlußcharakteristik) 185.
 Serienmotor (siehe auch Reihenschlußmotor) 186.
 Serienparallelschaltung (siehe auch Reihenbeneinanderschaltung) 309. 312.
 Serienschaltung (siehe auch Reihenschaltung) von Motoren 188. 191.
 Sicherheitswiderstand 376.
 Sicherungen 374.
 Siemensantrieb 303.
 Signaleinrichtungen (Seilbahnen) 600.
 Skineffekt 50.
 Solenoidbremsen 206.
 — Kennlinien der 207.
 — Schaltung der 209.
 — mit Verbundwicklung 209.
 Spaltumformer 528.
 Spannfeld, schiefes 87.
 Spannkugeln (Nüsse) 103.
 Spannungsabfall in der Fahrleitung 50. 58.
 — induktiver 53.
 — in den Speiseleitungen 35.
 — in der Schienenrückleitung 64. 138.
 — wirtschaftlicher 48.
 Spannweite, kritische 82.
 — virtuelle 87.
 Spannwerk 97.
 — Lebensdauer des 623.
 Speicher 530.
 Speicherbatterie, abrollbare 532.
 Speicherfahrzeuge 22. 529.
 — Lokomotive, führerlose 535.
 — Reichweite 530.
 Speichergewichte 530.
 Speiseleitung 48. 101.

- Speisepunkt 60.
 Speisung, freitragende 58.
 — mehrfache 56. 60.
 — mittelbare 56.
 — unmittelbare 56.
 — zweiseitige 56.
 Sperrschaltung (Steuerungen) 325.
 Spezialbahnen 24. 536.
 Spezifisches Baugewicht, Lokomotiven 173.
 — — Triebfahrzeuge 169.
 Spezifische Wärme 221. 223.
 Spezifischer Wärmeverlust 223.
 S.S.W.-Antrieb 303.
 Stadtbahnen 11.
 — Entwurfsangaben 397.
 — Frequenz von 613.
 — Grundriß der Wagen 397.
 — Haltezeiten 182. 183.
 — Reisegeschwindigkeiten 182. 183. 390.
 — Triebwagen 390. 397. 399.
 — Wirtschaftlichkeit 613.
 Stahlseil, geschlossenes 588.
 Standseilbahnen 25. 572.
 — automatische Ausweiche 575.
 — Betriebsarten 573.
 — Betriebssysteme 574.
 — Fahrzeuge 601.
 — Gefällsausrundungen 581.
 — Gleisführung 575.
 — Höhenplan 576.
 — Keilkopfschiene 576.
 — Kraftbedarf 591.
 — Längenprofil 576.
 — Linienführung 574.
 — mit geschlossenem Seil 574.
 — mit motorischem Antrieb 574.
 — mit offenem Seil 573.
 — Oberbausysteme 576.
 — Seil 587.
 — Signaleinrichtungen 600.
 — Wasserballast- 574.
 — Windwerk (Antrieb) 595.
 Standsicherheit (Maste) 100.
 — Zahnbahnlokomotiven 539.
 — Zahnbahnlokomotive, Rechentafel für die 541.
 Stangenantrieb 263. 273. 275. 280.
 Stangenkräfte (Parallelkurbelgetriebe) 270.
 Starrheitsgrad 292.
 Statische Induktion 63.
 Steigung, wirtschaftliche 536.
 Steigungsgrenze 536.
 Stetige Kraftübertragung durch Stangenantrieb 263. 273. 275. 280.
 Stetigkeitsstörungen bei Lokomotiven 414.
 — im Parallelkurbelgetriebe 290. 296.
 — im Zahnradgetriebe 303.
 Steuerungen 308.
 Steuerungen, Angaben über ausgeführte 354.
 — Arten der 310.
 — elektromagnetische 322.
 — elektropneumatische 324.
 — für Drehstromlokomotiven 349.
 — mittelbare 310. 321.
 — Nocken- 336.
 — Schützen- 321.
 — unmittelbare 310. 346.
 Stichmaßfehler 290.
 Stoßverbinder 50. 138.
 — Außenlaschen- 51. 139.
 — Unterlaschen- 51. 139.
 — Widerstand der 51.
 Strahlentafel 639.
 Straßenbahnen 7.
 — Betriebsergebnisse 613.
 — Fahrpreise 612.
 — Fahrwiderstand 155. 157.
 — Frequenz von 611.
 — Haltezeiten 182.
 — jährliche Zahl der Fahrten 611.
 — Motoren (siehe auch Bahnmotoren) 247.
 — — Lebensdauer 623.
 — pneumatische Bremsen 389.
 — Reisegeschwindigkeiten 182. 183. 390.
 — Schutzvorrichtungen 388.
 — Stromsysteme 19.
 — Triebwagen 378.
 — — Bauformen 380.
 — — Belastungstafel für 166.
 — — Bemessung 379.
 — — Gewichte 387.
 Streckenisolatoren 105.
 Streckenlänge, virtuelle 219.
 Streckentrenner für Kettenfahrlleitung 131.
 Streuströme 64.
 Stromabnehmer 358.
 — Bügel- 362.
 — Isolation der 372.
 — Rollen 359.
 — — Berührungsdruk 360.
 — — Fangvorrichtung 362.
 — — Scherengestell 362.
 — Schleifbügel- 362.
 — schienenlose Fahrzeuge 513.
 — für Stromschiene 371.
 — für Unterleitung 370.
 — Walzen- 369.
 — zulässige Stromstärken 359.
 Stromart in der Fahrleitung 2.
 Stromerzeugung 58.
 Stromerzeuger, elastisches Verhalten der 33.
 Stromerzeugung 2. 28.
 Stromkosten 617.
 Stromschiene 102.
 — Betriebsspannung 135. 136.
 — Isolatoren für 136.
 — Leitfähigkeit der 137.
 Stromschiene mit oberer Bestreichung 134.
 — mit unterer Bestreichung 134.
 — Querschnittsformen 133.
 — Spurweite 135.
 Stromstärke, zulässige, für Bügel 363.
 — zulässige, für Rollen 360.
 Stromsystem für schienenlose Fahrzeuge 515.
 — — Stadtbahnen 19.
 — — Straßenbahnen 19.
 — — Überlandbahnen 19.
 — — Vollbahnen 20.
 Stromumformung mit Quecksilberdampfgleichrichter 37.
 Stromverbrauch 218. 220. 617.
 Stromverdrängung (Hautwirkung) 50.
 Stromverteilung 55.
 Stromwendespannung 193.
 Stromwendung 193.
 Stützpunkte (Fahrleitungen) 98. 110.
 Stufenlose Steuerung mit Bürsterverschiebung 343.
 — — mit Drehtransformator 342.
 — — für Gleichstrom 337.
 — — mit Kollektorregler von Döry 344.
 — — für Wechselstrom 342.
 Stufenschalter 324. 346.
 Stufentransformator 188. 190.
 Stufenzahl 346.
 Stundenleistung 218.
 Summenrechentafel 630.
 Systeme der elektrischen Zugförderung 2.
 Tandem-Anordnung von Motoren 404.
 Technische Einheit 412.
 — Vereinbarungen 412.
 Teilung (Fahrleitung) für Bügel 95.
 — — für Rolle 94.
 — für Seilrollen 585.
 — Rechentafel zur Ermittlung der 96. 97.
 Telefonstörungen 37.
 Temperatur, äquivalente 83.
 — kritische 83.
 Temperaturkurven: siehe Erwärmung.
 Theoretischer Höhenplan (Seilbahnen) 576.
 Thermische Kennlinien 236.
 — Zeitkonstante 224. 225.
 Thermisch - elektromechanische Kennlinien des Bahnmotors 231.
 Thermit-Schweißung 140.
 Tonnendach 384.
 Traglager, Lebensdauer von 623.

- Tragrollen 584.
 Tragseil 90.
 — -Isolatoren 120.
 Tragwerk (Fahrleitung) 110.
 Trambahnanordnung 417.
 Treibgewicht 150. 165.
 Treibstangen, schiefe 275. 306. 417.
 Treidellokomotive 560.
 Triebfahrzeuge, Arten der für Zahnbahnen 550.
 — elektrische Ausrüstung der 183.
 — für gemischte Bahnen 561.
 — für Zahnbahnen 550.
 — spezifische Baugewichte 169.
 Triebgestell 564.
 Triebmaschinen, Vereinheitlichung der 304.
 Triebwagen, Bemessung der Wagengröße 379.
 — für gemischte Bahnen 561, 563.
 — für reine Zahnbahnen 558.
 — für Stadt-(Untergrund-)bahnen 390. 397. 399.
 — für Straßenbahnen 378.
 — für Überlandbahnen 379.
 — für Vollbahnen 327. 328.
 — Gewichtsangaben 387. 397. 399.
 — mit Drehgestellen 386.
 — mit Lenkachsen 386.
 — mit Mitteleinstieg 348. 387.
 — Steuerungen für 356. 357.
 — Untergestell, separates, für 384. 387.
 Tschanz-Antrieb 303.
 Tunnel-Fahrleitung 115.
- Überhöhung** (Stangenantrieb) 273.
Überlandbahnen 8.
 — Haltezeiten 182.
 — Reisegeschwindigkeit 182.
 — Stromsysteme für 19.
 — Triebwagen 379.
Übersetzung (Einphasen-Kollektormotor) 196.
Übersteuer-Ausschalter 374.
Umfang des elektrischen Vollbahnbetriebes 5.
Umformer für stufenlose Steuerung 337.
Umformerlokomotiven 20. 23. 350. 527.
Umformerwerke, selbsttätige 38.
Umformung, Art der 2.
Umlaufende Massen, Wirkung der 154. 542.
Umschaltwalze 311.
Unmittelbare Speisung 56.
 — Steuerung 310. 346.
Untergestelle (Triebwagen) 384. 387.
Untergestellmotor (siehe auch Bahnmotor) 240.
 — Angaben über 250.
 — Bauformen des 239. 306. 339.
- Untergestellmotor, Höchstleistungen von** 250.
 — Trambahnanordnung 417.
Untergrundbahnen: siehe Stadtbahnen.
Unterlaschen-Stoßverbinder 51. 139.
Unterleitung 137.
Untersuchungsfahrzeuge 534.
Untertagbetrieb 7.
Unterwerke, Anschaffungskosten 617.
 — selbsttätige 38.
- Ventilation: siehe Lüftung**
Verbundkettenwerk 120.
 — -maste 99, 112.
 — -wicklung (Solenoidbremsen) 209.
Verdrehung der Achsen 253.
Vereinheitlichung der Triebmaschinen 304.
Vereisung 75, 81.
Verhältnistafel 638.
Verkehrsbedürfnis 611.
Verkehrsleistung 611.
 — von Vollbahnlokomotiven 615.
Verkehrsziffer 611.
Verriegelung (Einzelschalter) 325.
Verschublokomotiven 406.
Verspannung (Fahrleitung) 94, 95.
Vielachsenantrieb 306, 418.
Vielfachaufhängung (siehe auch Kettenwerk) 122.
Vielfachsteuerung: siehe Steuerungen.
Virtuelle Streckenlänge 219.
Vollbahnen 14.
 — Ausdehnung der elektrischen 5.
 — Fahrwiderstände 157.
 — Haltezeiten 182.
 — Lokomotiven: siehe Lokomotiven
 — mit Zahnbetrieb 566.
 — Reisegeschwindigkeiten 182
 — Stromsystem 20.
 — Triebwagen 327, 328.
 — Verkehrsleistungen 615.
 — Wirtschaftlichkeit der elektrischen Zugförderung auf 614.
Vollbahnlokomotiven: siehe Lokomotiven.
Vollbahnverkehr auf Zahnbahnen 566.
Vorgelegemotor (siehe auch Bahnmotor) 245, 254.
Vor- und Nachteile der elektrischen Zugförderung 2.
Vorortbahnen: siehe Stadtbahnen.
- Wälzkontakte (Einzelschalter)** 322.
Wälzlager 159, 161.
Wärmeinhalt 223.
Wärmekapazität 221.
- Wärmeverlust, spezifischer** 223.
Walzenstromabnehmer 70.
 — mit Scherengestell 370.
Wanderkontakt 346.
Wanken 414.
Wasserballast (Seilbahnen) 574.
Wechselstrom - Drehstrom - Umformerlokomotiven 528.
Wechselstromkollektormotor: siehe Einphasenkollektormotor.
Wechselstromwiderstand 50.
Wendepole 255.
Widerstand, Anfahr- 160.
 — effektiver 50.
 — induktiver 52.
 — Ohmscher 50.
 — Brems- 349.
Widerstands-Regelung, stufenweise 309.
Widerstände, Schaltung der 320. 321.
 — zeichnerische Ermittlung der 347.
Winddruck 75, 81.
Windwerke 595.
 — Bremsung der 599.
Wirtschaftlichkeit 610.
 — Anlagekosten 617.
 — Anschaffungskosten von Lokomotiven 616.
 — von Unterwerken 619.
 — Ausnutzung der Kraftwerke 619.
 — Beispiele 620.
 — der elektrischen Zugförderung auf Vollbahnen 614.
 — durchschnittliche Anlagekosten 618.
 — Erhaltungskosten für elektrische und Dampflokomotiven 619.
 — Fahrleitung 617.
 — Grenzwerte des Kohlenverbrauches 618.
 — Kohlenverbrauch von Dampflokomotiven 615.
 — Kohlenverbrauch für Vershubdienst 618.
 — Kosten der Betriebsstoffe 615.
 — Lebensdauer 622.
 — Personalkosten 614.
 — Pufferung 42.
 — Stromkosten 617.
 — Stromverbrauch 617.
 — Systemfrage 619.
 Wogen 414, 417.
 Würgebund 123.
- Zahnbahnen** 336.
 — Arten der 549.
 — Arten der Triebfahrzeuge 550.
 — Auftrieb 539.
 — Berechnung der Lokomotivleistung und Gewichte 569.

- Zahnbahnen, Bremsen 553.
 — — selbsttätige 556.
 — elektrische Ausrüstung 567.
 — elektrische Nebeneinrichtungen 568.
 — gemischte 549.
 — geschobene Fahrzeuge 571.
 — Gliederwagen (Rowankomposition) 551, 571.
 — Lokomotiven, Berechnung der Leistung und Gewichte 569.
 — — für gemischte 562.
 — — für reine 556.
 — Motoren und Getriebe 558.
 — Motorwagen für reine 558.
 — Motorwagen mit 2 Geschwindigkeitsgebieten 563.
 — Nutzbremmung 567.
 — Rechentafel zur Bestimmung der Standsicherheit 571.
 — Rutschkupplung 554.
 — Sicherheitszange 555.
 — Triebfahrzeuge 550.
 — — gemischte 561.
 — — für seitlichen Zahneingriff 565.
 — Vollbahnverkehr auf 566.
 Zahndruck 538.
- Zahnkranz, gefederter 251.
 Zahnräder, gefederte 251.
 — System Duffing 252.
 Zahnradgetriebe, Kräfteplan 304.
 — Reibung im 305.
 — mit Schrägverzahnung 306.
 — Stetigkeitsstörungen im 303.
 — mit versetzter Teilung 306.
 Zahnradübersetzung 150.
 — Änderung der 151.
 Zahnradvorgelege 150, 151.
 — Geometrie des 245, 249.
 Zahnreibung 304.
 Zahnstange, Fischgräten- (Locher) 548.
 — Kletter- (Peter) 549.
 — Lamellen- (Abt) 517, 547.
 — System Pauli 546.
 — System Riggenbach 546.
 — System Strub 547.
 — Schmierung der 539.
 Zahnteilung 545.
 Zange, Sicherheits- 555.
 Zangenbremse 602.
 Zeichnerische Ermittlung der Motorkennlinien 348.
 — — der Widerstandsstufen 347.
- Zeitkonstante, thermische 224, 225, 236.
 Zeitrückhalt 150.
 Z-Tafel 633.
 Zucken 414.
 Zugfolge 612.
 Zugkraft 161.
 — am Haken 171, 417.
 — am Radumfang 161.
 — Zugsbrutto 165.
 Zugsteuerung 310.
 Zugwiderstand (siehe auch Fahrwiderstand) 143.
 Zusammenstellbare Fahrdrachthalter 108.
 Zusatzmaschine 57.
 Zusatzspannung, stufenlose Steuerung durch 339.
 Zusatztransformator 345.
 Zustandsgleichung, allgemeine, einer freigespannten Leitung 61, 88.
 Zweileitersystem 57.
 — doppeltes 57.
 Zweistangenantrieb mit Blindwelle 281, 306.
 — ohne Blindwelle 288, 306.
 — Kräfteplan 282.

Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung. Eine Einführung für Studierende und Ingenieure. I. Band: Die Ausrüstung der elektrischen Fahrzeuge. Von Dr. **W. Kummer**, Ingenieur, Professor an der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich. Mit 108 Abbildungen im Text. (194 S.) 1915. Gebunden 6.30 Goldmark / Gebunden 1.50 Dollar

Die Energieverteilung für elektrische Bahnen. Von Dr. **W. Kummer**, Ingenieur, Professor an der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich. (II. Band der „Maschinenlehre“.) Mit 62 Abbildungen im Text. (IV u. 158 S.) 1920. Gebunden 5 Goldmark / Gebunden 1.20 Dollar

Linienführung elektrischer Bahnen. Von Oberingenieur **Karl Trautvetter**, Hilfsarbeiter im Ministerium der öffentlichen Arbeiten. (VI u. 184 S.) 1920. 4.80 Goldmark / 1.15 Dollar

Elektrische Straßenbahnen und straßenbahnähnliche Vorort- und Überlandbahnen. Vorarbeiten, Kostenanschläge und Bauausführungen von Gleis-, Leitungs-, Kraftwerks- und sonstigen Betriebsanlagen. Von Oberingenieur **Karl Trautvetter**, Beuthen (O.-S.). Mit 334 Textfiguren. (VIII u. 240 S.) 1913. 6.50 Goldmark / 1.55 Dollar

Die Feldschwächung bei Bahnmotoren. Von Dr.-Ing. **Leonhard Adler**, Oberingenieur der Großen Berliner Straßenbahn. Mit 37 Textabbildungen. (IV u. 44 S.) 1919. 2.50 Goldmark / 0.60 Dollar

Die geplante elektrische Zugförderung auf den Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. Von Reg.-Baumeister **Wechmann**, Dezernent bei der Eisenbahndirektion Berlin. (3 S.) 1919. 0.50 Goldmark / 0.15 Dollar

Sicherungsanlagen im Eisenbahnbetriebe auf Grund gemeinsamer Vorarbeit mit Dr.-Ing. **M. Oder** †, weil. Professor an der Technischen Hochschule zu Danzig, verfaßt von Dr.-Ing. **W. Cauer**, Geh. Baurat, Professor an der Technischen Hochschule zu Berlin. Mit einem Anhang: **Fernmeldeanlagen und Schranken** von Dr.-Ing. **F. Gerstenberg**, Regierungsbaurat, Privatdozent an der Technischen Hochschule zu Berlin. Mit 484 Abbildungen im Text und auf 4 Tafeln. (XVI u. 460 S.) 1922. (Otzen, Handbibliothek für Bauingenieure Bd. VII. Teil 2). Gebunden 15 Goldmark / Gebunden 3.60 Dollar

E. Schubert, Die Sicherungswerke der Eisenbahnbetriebe. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für Eisenbahn-Betriebsbeamte und Studierende des Eisenbahnfaches. Fünfte, vollständig neubearbeitete Auflage. Von **Oscar Roudolf**, Ober-Regierungs- und Baurat.
Erster Band: Elektrische Telegraphen, Fernsprechanlagen, Läutewerke, Kontaktapparate, Blockeinrichtungen. Mit 404 Textabbildungen. 1921. Gebunden 10 Goldmark / Gebunden 2.40 Dollar
Zweiter Band: Mit etwa 475 Abbildungen. Etwa 128 Seiten. Erscheint im Herbst 1924.

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 (Darmstadt). Mit 291 Abbildungen, einer Verschußtafel und einem Sachregister. 1920. Gebunden 6 Goldmark / Gebunden 1.45 Dollar

Die Dampflokomotiven der Gegenwart. Hand- und Lehrbuch für den Lokomotivbau und -betrieb, für Eisenbahnfachleute und 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 lithograph. Tafeln mit den Bauzeichnungen neuer, erprobter Heißdampflokomotiven des In- und Auslandes. (XVII u. 859 S. u. IV S.) 1920.
Gebunden 64 Goldmark / Gebunden 15.50 Dollar

Die zeitgemäße Heißdampflokomotive. Betrachtungen über wirtschaftlichen Bau und Betrieb. Von Geh. Baurat Dr.-Ing. e. h. **Robert Garbe**. Mit Abbildungen.
Erscheint im Sommer 1924.

Die Dampflokomotive in entwicklungsgeschichtlicher Darstellung ihres Gesamtbaues. Von Prof. **J. Jahn**, Technische Hochschule der freien Stadt Danzig. Mit 332 Abbildungen im Text und auf 4 Tafeln. (IX u. 356 S.) 1924.
Gebunden 18 Goldmark / Gebunden 4.30 Dollar

Die elektrische Kraftübertragung. Von Dipl.-Ing. **Herbert Kyser**. In 3 Bänden.
Erster 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. (XV u. 417 S.) 1923.
Gebunden 15 Goldmark / Gebunden 3.60 Dollar
Zweiter Band: **Die Niederspannungs- und Hochspannungs-Leitungsanlagen. Ihre Projektierung, Berechnung, elektrische und mechanische Ausführung und Untersuchung.** Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 319 Textfiguren und 44 Tabellen. Unveränderter Neudruck. (VIII u. 405 S.) 1923.
Gebunden 15 Goldmark / Gebunden 3.60 Dollar
Dritter Band: **Die maschinellen und elektrischen Einrichtungen des Kraftwerkes und die wirtschaftlichen Gesichtspunkte für die Projektierung.** Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 665 Textfiguren, 2 Tafeln und 87 Tabellen. (XII u. 930 S.) 1923.
Gebunden 28 Goldmark / Gebunden 6.70 Dollar

Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Theoretische Grundlagen und Anwendung. Von **W. O. Schumann**, a. o. Professor der Techn. Physik an der Universität Jena. Mit 80 Textabbildungen. (VII u. 246 S.) 1923.
7.20 Goldmark; gebunden 8.40 Goldmark / 1.75 Dollar; gebunden 2 Dollar

Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Vortragsreihe, veranstaltet von dem Elektrotechnischen Verein E. V. und der Technischen Hochschule, Berlin. Herausgegeben im Auftrage des Elektrotechnischen Vereins E. V. von Professor Dr. **H. Schering**. Mit 197 Abbildungen im Text. (IV u. 392 S.) 1924.
Gebunden 16 Goldmark / Gebunden 3.85 Dollar

Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. Herausgegeben von **Walther Demuth**, Obergeringieur. Vorstand des Mechan.-Techn. Laboratoriums der Porzellanfabrik Hermsdorf i. Th., unter Mitarbeit der Obergeringieure **Hermann Franz** und **Kurt Bergk**. Zweite vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 132 Abbildungen im Text. (VIII u. 254 S.) 1923.
Gebunden 12 Goldmark / Gebunden 2.90 Dollar

Die Heißdampf-Lokomotiven mit einfacher Dehnung des Dampfes. Dritte, umgearbeitete Auflage. Bearbeitet von Dipl.-Ing. **Eugen Brückmann**. Mit 696 Abbildungen im Text und 11 lithographischen Tafeln. (Aus: „Die Eisenbahntechnik der Gegenwart.“ 1. Band, 2. Hälfte, 1. Lieferung.) 1920.
45 Goldmark; gebunden 48 Goldmark / 10.75 Dollar; gebunden 11.50 Dollar

Berechnung und Konstruktion von Dampflokomotiven mit einem Anhang über Elektrische Lokomotiven. Ein Nachschlagewerk für die Praxis und das Studium von Dipl.-Ing. **W. Bauer**, Ingenieur bei J. A. Maffei, München und Dipl.-Ing. **X. Stürzer**, Ingenieur b. d. Sächs. Maschinenfabrik vorm. Rich. Hartmann A.-G., Chemnitz. Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage von Dipl.-Ing. **W. Bauer**, Heidelberg. Mit 428 Textabbildungen und auf 10 Tafeln nebst 8 Tabellentafeln. (IX und 412 S.) 1923.
Gebunden 20 Goldmark / Gebunden 4.80 Dollar

Arnold-la Cour, Die Wechselstromtechnik. Herausgegeben von Direktor Professor Dr.-Ing. E. Arnold, Karlsruhe. In fünf Bänden. Unveränderter Neudruck.

Erster Band: **Theorie der Wechselströme.** Von J. L. la Cour und O. S. Bragstad. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 591 in den Text gedruckten Figuren. (XIV u. 922 S.) 1923. Gebunden 30 Goldmark / Gebunden 7.15 Dollar

Zweiter Band: **Die Transformatoren.** Ihre Theorie, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von E. Arnold und J. L. la Cour. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 443 in den Text gedruckten Figuren und 6 Tafeln. (XII u. 450 S.) 1923. Gebunden 20 Goldmark / Gebunden 4.80 Dollar

Dritter Band: **Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen.** Von E. Arnold. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 463 Textfiguren und 5 Tafeln. (XII und 371 S.) 1923. Gebunden 16 Goldmark / Gebunden 3.85 Dollar

Vierter Band: **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. (XX u. 896 S.) 1923. Gebunden 28 Goldmark / Gebunden 6.70 Dollar

Fünfter Band: **Die asynchronen Wechselstrommaschinen.**

1. Teil: **Die Induktionsmaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von E. Arnold u. J. L. la Cour unter Mitarbeit von A. Fraenckel. Mit 307 in den Text gedruckten Figuren und 10 Tafeln. (XVI u. 592 S.) 1923. Gebunden 24 Goldmark / Gebunden 5.75 Dollar

2. Teil: **Die Wechselstromkommutatormaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von E. Arnold, J. L. la Cour und A. Fraenckel. Mit 400 in den Text gedruckten Figuren und 8 Tafeln. (XVI u. 660 S.) 1923. Gebunden 26 Goldmark / Gebunden 6.20 Dollar

Arnold-la Cour, Die Gleichstrommaschine. Ihre Theorie, Untersuchung, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. In 2 Bänden.

I. Band: **Theorie und Untersuchung** von J. L. la Cour. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 570 Textfiguren. Unveränderter Neudruck. (XII u. 728 S.) 1923. Gebunden 24 Goldmark / Gebunden 5.75 Dollar

II. Band: **Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise.** In Vorbereitung.

Theorie der Wechselströme. Von Dr.-Ing. Alfred Fraenckel. Zweite, erweiterte und verbesserte Auflage. Mit 237 Textfiguren. (VIII u. 352 S.) 1921. Gebunden 11 Goldmark / Gebunden 2.65 Dollar

Die Transformatoren. Von Prof. Dr. techn. Milan Vidmar. Zweite Auflage. Mit etwa 297 Textabbildungen. In Vorbereitung.

Elektrische Maschinen. Theorie und Berechnung. Von Prof. R. Richter, Direktor des Elektrotechnischen Instituts Karlsruhe.

Erster Band: **Grundbegriffe, Berechnungselemente, die Gleichstrommaschine.** Mit 453 Textabbildungen. Erscheint im Sommer 1924.

Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Ein Lehrbuch von Prof. Rudolf Richter, Karlsruhe. Mit 377 Textabbildungen. Berichtigter Neudruck. (XI u. 425 S.) 1922. Gebunden 14 Goldmark / Gebunden 3.35 Dollar

Die Hochspannungs-Gleichstrommaschine. Eine grundlegende Theorie. Von Elektroingenieur Dr. A. Bolliger in Zürich. Mit 53 Textfiguren. (IV u. 82 S.) 1922. 3 Goldmark / 0.75 Dollar

Die asynchronen Wechselfeldmotoren. Kommutator- und Induktionsmotoren. Von Professor Dr. Gustav Benischke. Mit 89 Abbildungen im Text. (IV u. 114 S.) 1920. 4.20 Goldmark / 1 Dollar

Die asynchronen Drehstrommotoren und ihre Verwendungsmöglichkeiten. Von Jakob Ippen, Betriebsingenieur. Mit 67 Textabbildungen. (VII u. 90 S.) 1924. 3.60 Goldmark / 0.90 Dollar

Der Drehstrommotor. Ein Handbuch für Studium und Praxis. Von Professor Julius Heubach, Direktor der Elektromotorwerke Heidenau, G. m. b. H. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 222 Abbildungen. (XII u. 599 S.) Gebunden 20 Goldmark / Gebunden 4.80 Dollar

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. Von Prof. Dr. **Gustav Benischke**. Sechste, vermehrte Auflage. Mit 633 Abbildungen im Text. (XVI u. 682 S.) 1922.
Gebunden 18 Goldmark / Gebunden 4.30 Dollar

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik. Von Prof. Dr. **Adolf Thomälen**, a. o. Professor an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Neunte, verbesserte Auflage. Mit 555 Textbildern. (VIII u. 396 S.) 1922.
Gebunden 9 Goldmark / Gebunden 2.15 Dollar

Anlaß- und Regelwiderstände. Grundlagen und Anleitung zur Berechnung von elektrischen Widerständen. Von **Erich Jasse**. Zweite, verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 69 Textabbildungen. (VII u. 177 S.) 1924
6 Goldmark; gebunden 6.80 Goldmark / 1.45 Dollar; gebunden 1.65 Dollar

Die Elektrotechnik und die elektromotorischen Antriebe. Ein elementares Lehrbuch für Technische Lehranstalten und zum Selbstunterricht. Von Dipl.-Ing. **Wilhelm Lehmann**. Mit 520 Textabbildungen und 116 Beispielen. (VI u. 452 S.) 1922.
Gebunden 9 Goldmark / Gebunden 2.15 Dollar

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. Sechste, durchgesehene und ergänzte Auflage. Mit 296 Textfiguren. (XII u. 330 S.) 1923.
5.50 Goldmark; gebunden 6.50 Goldmark / 1.35 Dollar; gebunden 1.60 Dollar

Schaltungen von Gleich- und Wechselstromanlagen. Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren, Lichtanlagen, Kraftwerke und Umformerstationen. Ein Lehr- und Hilfsbuch. Von Studienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Magdeburg. Mit 226 Textabbildungen. (VIII u. 156 S.) 1922.
5 Goldmark / 1.20 Dollar

Grundzüge der Starkstromtechnik. Für Unterricht und Praxis. Von Dr.-Ing. **K. Hoerner**. Mit 319 Textabbildungen und zahlreichen Beispielen. (V u. 257 S.) 1923.
4 Goldmark; gebunden 5 Goldmark / 0.95 Dollar; gebunden 1.20 Dollar

Elektrische Schaltvorgänge und verwandte Störungserscheinungen in Starkstromanlagen. Von Prof. Dr.-Ing. und Dr. Ing. e. h. **Reinhold Büdenberg**, Chef-Elektriker, Privatdozent, Berlin. Mit 477 Abbildungen im Text und 1 Tafel. (VIII u. 504 S.) 1923.
Gebunden 20 Goldmark / Gebunden 4.80 Dollar

Elektrotechnische Meßkunde. Von Dr.-Ing. **[P. B. Arthur Linker**. Dritte, völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 408 Textfiguren. Unveränderter Neudruck. (XII u. 571 S.) 1923.
Gebunden 11 Goldmark / Gebunden 2.70 Dollar

Das Entwerfen von graphischen Rechentafeln. (Nomographie.) Von Prof. Dr.-Ing. **P. Werkmeister**, Privatdozent an der Technischen Hochschule in Stuttgart. Mit 164 Textabbildungen. (VII u. 194 S.) 1923.
9 Goldmark; gebunden 10 Goldmark / 2.15 Dollar; gebunden 2.40 Dollar

Die Grundlagen der Nomographie. Von Ing. **B. M. Konorski**. Mit 72 Abbildungen im Text. (86 S.) 1923.
3 Goldmark / 0.75 Dollar

Die Herstellung gezeichneter Rechentafeln. Ein Lehrbuch der Nomographie. Von Dr.-Ing. **Otto Laemann**. Mit 68 Abbildungen im Text und auf 3 Tafeln. (VIII u. 100 S.) 1923.
4 Goldmark / 0.95 Dollar

Lehrbuch der Nomographie. Von Studienrat **H. Schwerdt**. Mit etwa 137 Abbildungen. Erscheint im Sommer 1924

Die Nomographie oder Fluchtlinienkunst. Ein technischer Leitfaden von **Fritz Krauß**, Ingenieur in Wien. Mit 26 Textfiguren. (VIII u. 56 S.) 1922. 2 Goldmark / 0.50 Dollar