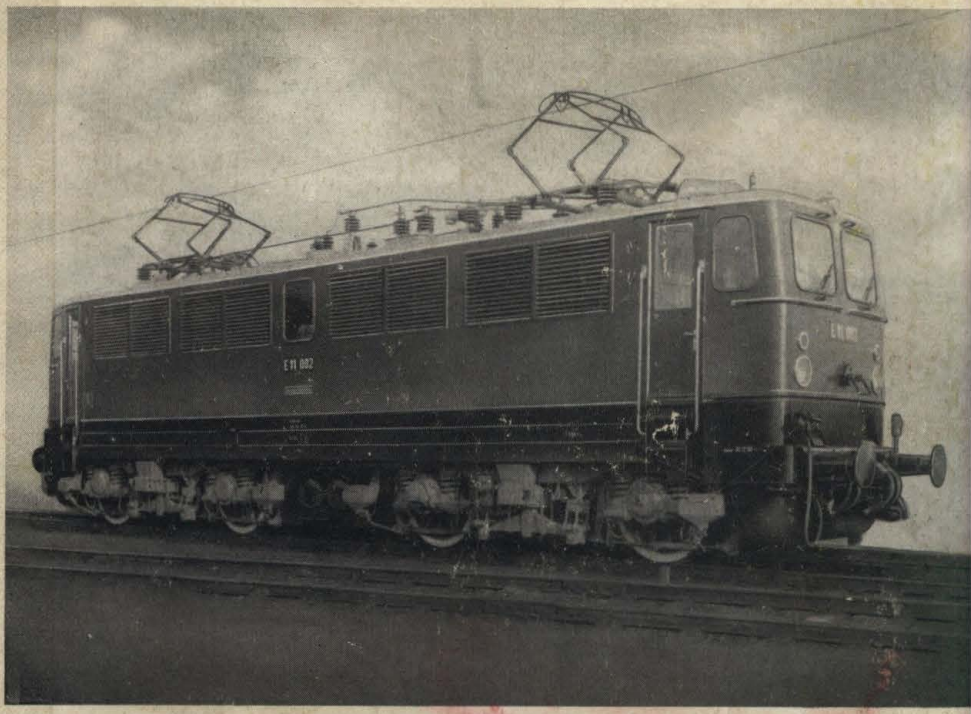
DEUTSCHE REICHSBAHN

WERNER DEINERT

Elektrische Lokomotiven für Vollbahnen



TRANSPRESS VEB Verlag für Verkehrswesen

Herausgegeben vom Ministerium für Verkehrswesen

— Lehrmittelstelle —

TRIEBFAHRZEUGKUNDE

ELEKTRISCHE TRIEBFAHRZEUGE

Heft 1

Elektrische Lokomotiven für Vollbahnen

Stufe II/III

von Dipl.-Ing. Werner Deinert

Mit 280 Bildern und 6 Tabellen

TRANSPRESS

VEB Verlag für Verkehrswesen Berlin

Manuskript abgeschlossen 1. 7. 1960

TRANSPRESS VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin W 8, Französische Straße 13/14
Veröffentlicht 1961 — Lizenz-Nr. VLN 162 — Druckgenehmigungs-Nr. 925/105/61
Alle Rechte vorbehalten • Einbandentwurf: O. Kietzmann
Satz und Druck: VOB Fachbuchdruck Naumburg (Saale) IV/26/14 Auftr.-Nr. 1177
Preis: 8,50 DM

VORBEMERKUNGEN

Für das Fachgebiet **„Triebfahrzeugkunde – Elektrische Triebfahrzeuge"** hat die Hauptverwaltung der Maschinenwirtschaft des Ministeriums für Verkehrswesen in Zusammenarbeit mit der Lehrmittelstelle des Ministeriums für Verkehrswesen und dem TRANSPRESS VEB Verlag für Verkehrswesen eine Fachbuchreihe entwickelt, zu der folgende Hefte gehören:

Heft 1: Elektrische Lokomotiven für Vollbahnen	Stufe II/III
Heft 2: Elektrische Triebwagen	Stufe II/III

Für das Fachgebiet „Triebfahrzeugkunde – Dampflokomotiven" liegt bereits eine Fachbuchreihe (6 Hefte) vor.
Für das Fachgebiet „Triebfahrzeugkunde – Dieseltriebfahrzeuge" ist eine Fachbuchreihe (6 Hefte) in Vorbereitung.

Die Stufen I bis III bezeichnen das Niveau des Fachbuchinhalts:

Stufe I = Facharbeiter
Stufe II = Meister / Techniker
Stufe III = Ingenieur / Diplomingenieur

Das vorliegende Fachbuch wird als Lehrbuch an den Ingenieurschulen für Eisenbahnwesen eingeführt.

Darüber hinaus ist es bestimmt für:

Ellokführer und Beimänner und alle im Ellokbetrieb und in der Ellokunterhaltung beschäftigten Ingenieure, Meister und Brigadiere.
Alle Hefte dieser Fachbuchreihe sind mit einem *blauen* Buchrücken versehen.
Die verschiedenen Farben bezeichnen die Dienstzweige entsprechend der Struktur der Deutschen Reichsbahn:

rot = Betriebs- und Verkehrsdienst
blau = Maschinenwirtschaft
grau = Wagenwirtschaft
grün = Bahnanlagen
gelb = Sicherungs- und Fernmeldewesen.

Möge dieses Fachbuch zur Verbesserung der beruflichen Arbeit der im Verkehrswesen Beschäftigten zum Wohle unseres Arbeiter-und-Bauern-Staates beitragen.

Berlin, im Juli 1960

Ministerium für Verkehrswesen
Abteilung
Schulung und Berufsausbildung

Ministerium für Verkehrswesen
Hauptverwaltung der Maschinenwirtschaft
der Deutschen Reichsbahn

VORWORT

Die in der Deutschen Demokratischen Republik ständig steigende Produktion an industriellen und landwirtschaftlichen Gütern stellt an das gesamte Verkehrswesen hohe Anforderungen. Die Deutsche Reichsbahn als der wichtigste Verkehrsträger kann diese großen Aufgaben nur erfüllen, wenn der gesamte Fahrzeugpark ebenso wie die baulichen und sicherungstechnischen Anlagen auf den neuesten technischen Stand gebracht wird.

Aus diesem Grunde muß auch die Dampflokomotive, die in betrieblicher und wirtschaftlicher Hinsicht den hohen Anforderungen nicht mehr entspricht, in Kürze durch moderne Triebfahrzeuge abgelöst werden. Hier kommt neben dem Einsatz von Dieseltriebfahrzeugen dem weiteren Ausbau der elektrischen Zugförderung und der Entwicklung leistungsfähiger elektrischer Lokomotiven eine besondere Bedeutung zu.

Daher ist es auch erforderlich, bei der Ausbildung der Eisenbahner die modernen Zugförderungsarten wesentlich mehr als bisher zu berücksichtigen. Denn nur hochqualifizierte Kader mit einem umfangreichen Wissen und Können werden künftig in der Lage sein, die großen Aufgaben zu meistern.

Die nachstehenden Abhandlungen beschäftigen sich ausschließlich mit elektrischen Lokomotiven für Vollbahnen, die ihre Antriebsenergie dem Fahrdraht entnehmen. Industriebahnlokomotiven, Oberleitungstriebwagen und elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die als Energiequelle Speicherbatterien oder einen Dieselmotor mitführen, bleiben hier unberücksichtigt und sollen später in besonderen Fachbüchern behandelt werden.

Das vorliegende Buch weist auf die große Bedeutung der elektrischen Zugförderung hin und behandelt den Aufbau der elektrischen Lokomotiven. Es soll die Nachwuchskräfte mit den theoretischen und praktischen Grundlagen vertraut machen und sie zum gründlichen Studium und schöpferischen Arbeiten anregen. Durch Gegenüberstellung des Alten mit dem Neuen soll es aber auch den erfahrenen Praktiker über die ständigen Verbesserungen und Weiterentwicklungen der elektrischen Lokomotiven unterrichten und den neuesten technischen Stand im Weltmaßstab aufzeigen.

Dank gebührt all denen, die mich durch Ratschläge unterstützten und Bildmaterial zur Verfügung stellten. An den Leser ergeht die Bitte, auf eventuell vorhandene Mängel hinzuweisen und Wünsche zu äußern, die bei einer späteren Auflage berücksichtigt werden können.

Dresden, den 26. April 1960

Der Verfasser

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einführung 13

1.1 Geschichtliche Entwicklung des elektrischen Zugbetriebes . . 13

1.11 Die ersten Versuche mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen 13

1.12 Die ersten elektrischen Straßenbahnen 15

1.13 Die Anfänge der elektrischen Zugförderung auf Vollbahnen 19

1.14 Jetziger Stand der elektrischen Zugförderung 25

1.2 Gegenüberstellung der verschiedenen Stromsysteme 27

1.21 Gleichstrom 28

1.22 Drehstrom 29

1.23 Einphasen-Wechselstrom 16⅔ Hz 29

1.24 Einphasen-Wechselstrom 50 Hz 31

1.25 Zusammenfassung 32

1.3 Stromversorgung 33

1.31 Primärerzeugung von Bahnstrom 33

1.32 Sekundäre Stromversorgung über Umarterwerke . . . 35

1.33 Stromzuführung 35

1.4 Vergleich des elektrischen Zugbetriebes mit Dampfbetrieb . 36

1.41 Vorteile des elektrischen Zugbetriebes 36

1.411 Energetische Vorteile 37

1.412 Betriebliche Vorteile 38

1.413 Betriebswirtschaftliche Vorteile 41

1.414 Sonstige Vorteile 42

1.42 Nachteile des elektrischen Zugbetriebes 42

1.43 Auswertung 43

1.5 Einteilung und Bezeichnung der elektrischen Lokomotiven . 44

1.6 Umgrenzung des lichten Raumes und Begrenzung der Triebfahrzeuge bei elektrischem Zugbetrieb 46

2 Aufbau des mechanischen Teiles 48

2.1 Fahrgestell 48

2.11 Laufwerk 48

2.111 Radsätze 48

2.112 Achslager 49

2.113 Tragfedern 52

2.12 Mittel zur Verbesserung des Fahrzeuglaufes 53

2.121 Lenkachsen 54

2.122 Drehgestelle 55

2.13 Mechanische Bremsen 59

2.131 Druckluftbremse 60

2.132 Schleuderschutzbremse 60

2.133 Handbremse. 60

2.14 Rahmen 61

2.141 Zug- und Stoßvorrichtung. 62

2.142 Abstützung des Lokomotivkastens 63

2.2 Lokomotivkasten 63

2.21 Aufbau des Kastens 63

2.22 Führerstand 65

2.23 Maschinenraum 66

2.3 Triebwerk 66

2.31 Stangenantrieb 67

2.311 Stangenantrieb ohne Vorgelege 67

2.3111 Einfacher Stangenantrieb 68

2.3112 Stangenantrieb mit Blindwelle. 68

2.3113 Zweistangenantrieb 70

2.3114 Zweimotorenantrieb 72

2.312 Stangenantrieb mit Vorgelege 72

2.3121 Kuppelantrieb 73

2.3122 Kurbelschleifenantrieb 74

2.3123 Schrägstangenantrieb 74

2.3124 Antrieb mit hochliegendem Motor 75

2.32 Einzelachsantrieb 76

2.321 Antrieb durch Achsmotor 77

2.3211 Direkter Achsmotorantrieb 77

2.3212 Achsmotorantrieb mit gefederter Hohlwelle 77

2.322 Antrieb durch Tatzlagermotor 78
2.3221 Direkter Tatzmotorantrieb 79
2.3222 Gummiringfederantrieb 82

2.323 Antrieb durch Gestellmotor 84
2.3231 Buchli-Antrieb. 85
2.3232 Gelenkstangen-Antrieb 89
2.3233 Westinghouse-Antrieb 91
2.3234 Sécheron-Antrieb 92
2.3235 Federtopf-Antrieb 94
2.3236 Federantrieb 98
2.3237 Kardan-Scheibenantrieb 99
2.3238 Kardan-Lamellenantrieb 103
2.3239 Kardan-Gummiringantrieb 104

2.324 Sonstige Antriebe 105

3 Elektrische Ausrüstung einer Wechselstromlokomotive für 16⅔ Hz 105

3.1 Hochspannungsteil 105
3.11 Stromabnehmer 106
3.12 Oberspannungsleitung 115
3.13 Trennschalter 116
3.14 Hauptschalter 116
3.141 Ölschalter. 117
3.142 Expansionsschalter 119
3.143 Druckgasschalter 122
3.144 Druckluftschnellschalter 124
3.145 Schalterantrieb und -auslösung 125

3.2 Hauptumspanner. 128
3.21 Aufgaben und Wirkungsweise. 129
3.22 Aufbau 130
3.23 Schaltung der Wicklungen 132
3.24 Kühlung 135
3.25 Übliche Bauarten 137

3.3 Hilfsumspanner und Meßwandler 140

3.4 Steuerung 141
3.41 Leistungssteuerungen. 141
3.411 Schaltungsarten bei Niederspannungssteuerung . 144
3.4111 Einfache Schaltung. 144
3.4112 Schaltung mit einem Stromteiler 145
3.4113 Schaltung mit mehreren Stromteilern . . 147

3.4114 Ausgleichschaltungen 148
3.4115 Schaltung mit Zusatzumspanner 149
3.4116 Schaltung mit Zusatzumspanner und Feinregler 150
3.4117 Schaltung mit Transduktoren 155

3.412 Schaltungsarten bei Hochspannungssteuerung . . 156

3.42 Steuerelemente der Leistungssteuerungen 157
3.421 Schütze 157
3.422 Schlittenschaltwerke 160
3.423 Nockenschaltwerke 162
3.424 Wandernocken- und Wanderwalzen-Schaltwerke 164

3.43 Übertragungssteuerungen 166
3.431 Mechanische Handsteuerung 166
3.432 Schützensteuerung 166
3.433 Auf-Ab-Steuerung mit Stellmotor 168
3.434 Nachlaufsteuerung 169
3.435 Mehrfach-, Fern- und Funksteuerung 171

3.44 Steuereinrichtungen 172
3.441 Fahrmotoren-Trennschalter 172
3.442 Fahrtwender. 173
3.443 Bremsumschalter. 174
3.444 Verriegelung 174

3.5 Fahrmotor. 175
3.51 Aufbau des Ständers und Läufers 176
3.52 Stromwendung 179
3.53 Kühlung 183
3.54 Betriebsverhalten 184

3.6 Elektrische Bremsen 187
3.61 Widerstandsbremse 187
3.62 Nutzbremse. 189

3.7 Hilfseinrichtungen 189
3.71 Stromversorgung der Hilfsbetriebe. 189
3.72 Lüfter 190
3.73 Ölpumpe 192
3.74 Drucklufterzeugung 193
3.75 Beleuchtung. 194
3.76 Heizung 196
3.77 Sicherheitsfahrschaltung 198
3.78 Meß- und Schutzeinrichtungen 200
3.79 Zubehör 203

4. Elektrische Ausrüstung einer Gleichstromlokomotive 203
4.1 Allgemeines 204
4.2 Steuerung 204
4.3 Fahrmotor 210
4.4 Elektrische Bremse 212
4.5 Sonstige Besonderheiten der Gleichstromlokomotiven 213

5. Aufbau der Wechselstromlokomotiven für 50 Hz 213
5.1 Direktmotor-Lokomotiven 214
5.2 Umformer-Lokomotiven 215
5.21 Umformer-Lokomotiven mit Drehstromfahrmotoren . . 215
5.22 Umformer-Lokomotiven mit Gleichstromfahrmotoren . 219
5.3 Gleichrichter-Lokomotiven 219
5.31 Gleichrichter-Lokomotiven mit mehranodigen Gleichrichtern 220
5.32 Gleichrichter-Lokomotiven mit einanodigen Gleichrichtern 221
5.33 Gleichrichter-Lokomotiven mit Trockengleichrichtern . 223

6 Elektrische Lokomotiven für verschiedene Stromsysteme 225
6.1 Mehrspannungs-Lokomotiven 226
6.2 Mehrfrequenz-Lokomotiven 226
6.3 Mehrstrom-Lokomotiven 228
6.4 Allstrom-Lokomotiven 228
6.5 Sonstige Bauarten 229

7 Bewährte Elektrische Lokomotiven des In- und Auslandes 229
7.1 Wechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn für 16⅔ Hz 230
7.2 Wechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Bundesbahn für 16⅔ Hz 239
7.3 Ausländische Wechselstrom-Lokomotiven für 16⅔ Hz 243
7.4 Gleichstrom-Lokomotiven 252
7.5 Deutsche Wechselstrom-Lokomotiven für 50 Hz 260
7.6 Ausländische Wechselstrom-Lokomotiven für 50 Hz 261

8 Betrieb mit elektrischen Lokomotiven 270

8.1 Zugkraft und Leistung einer elektrischen Lokomotive. . . . 270

8.2 Fahrwiderstände 271

8.21 Bahnwiderstand der elektrischen Lokomotive 272
8.22 Bahnwiderstand der Wagen 273
8.23 Steigungswiderstand 274
8.24 Krümmungswiderstand 274
8.25 Beschleunigungswiderstand 274

8.3 Fahrtechnik 275

8.4 Unregelmäßigkeiten 277

8.41 Störungen an der Fahrleitung 277
8.42 Unterbrechung der Stromzuführung 277
8.43 Schäden an der elektrischen Lokomotive 277

8.5 Gefahren des elektrischen Zugbetriebes und Unfallschutz . . 278

Anhang 1: Wechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn für 16⅔ Hz 281

Anhang 2: Wechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Bundesbahn für 16⅔ Hz 282

Anhang 3: Ausländische Wechselstrom-Lokomotiven für 16⅔ Hz . 283

Anhang 4: Gleichstrom-Lokomotiven 284

Anhang 5: Deutsche Wechselstrom-Lokomotiven für 50 Hz 285

Anhang 6: Ausländische Wechselstrom-Lokomotiven für 50 Hz . . 286

Literaturverzeichnis 287

Bildquellenverzeichnis 288

Sachwortverzeichnis 289

1 Einführung

1.1 Geschichtliche Entwicklung des elektrischen Zugbetriebes

1.11 Die ersten Versuche mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

Die Bestrebungen, Fahrzeuge durch elektrische Energie anzutreiben, sind schon recht alt und reichen etwa bis in die Jahre zurück, in denen die Dampflokomotive in Deutschland ihren Einzug hielt. Bereits im Jahre 1834 baute der Potsdamer Physiker Jacobi ein Boot, das er in dem damaligen Petersburg auf der Newa erprobte. Es wurde durch einen Elektromotor und galvanische Elemente angetrieben. Wenige Jahre später konstruierten die Amerikaner Davenport und Cook eine kleine elektrische Lokomotive, die sich jedoch ebensowenig durchsetzen konnte wie ein elektrisches Triebfahrzeug, das der Schotte Davidson im Jahre 1838 auf der Strecke Edinburgh–Glasgow in Betrieb nahm. Im Jahre 1840 beschäftigte sich dann der Frankfurter Mechanikermeister Johann Philipp Wagner, der Erfinder des Wagnerschen Hammers, mit dem Bau einer elektrischen Lokomotive. In seiner Werkstatt in Fischbach (Nassau) setzte er auf einer kleinen ovalen Versuchsstrecke ein elektrisches Fahrzeug in Betrieb, das bei einer Eigenmasse von knapp 20 kg einen angehängten Wagen mehrere Stunden mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von etwa 7 km/h gezogen haben soll. Er erregte damit viel Aufsehen, und der damalige Deutsche Bund versprach ihm eine Belohnung von 100 000 Gulden, falls ihm der Bau einer brauchbaren elektrischen Lokomotive gelänge. Als Wagner daraufhin nach dem Vorbild seiner Modellbahn ein großes Triebfahrzeug baute, bewegte sich dieses jedoch nicht von der Stelle, da die eingebauten galvanischen Elemente zu schwer waren und zum Antrieb eines solch großen Fahrzeuges nicht ausreichten. Die Öffentlichkeit stellte Wagner als einen Betrüger hin, seine Erfindung geriet bald in Vergessenheit.

Ebensowenig bewährten sich Fahrzeuge, die der Leipziger Mechaniker Stöhrer mit elektromagnetischen Antriebsmaschinen und den dazugehörigen Batterien ausrüstete und im Jahre 1841 auf der Strecke Leipzig–Dresden erprobte. Auch die im Jahre 1865 von den Franzosen Bellet und Reuvre durchgeführten Versuche, die Elemente neben dem Gleis aufzustellen und dem Fahrzeug den Strom über eine Fahrleitung zuzuführen, verliefen ergebnislos, da die Stromquelle zu schwach war.

Erst die Erfindung der Dynamomaschine im Jahre 1866 durch Werner von Siemens schuf die Grundlage für eine wirtschaftliche elektrische Zugförderung. Im Jahre 1876 führte der russische Ingenieur A. F. Pirotzki Versuche mit einem kleinen elektrischen Triebwagen durch, den er auf einer kurzen Strecke bei Sestrorezk einsetzte. Der Strom wurde wahrscheinlich über eine Kontaktleitung von einer stationären Maschine zugeführt, die nach dem Siemens-Prinzip arbeitete. Die Rückleitung erfolgte durch die Fahrschienen. Die Versuche wurden später im damaligen Petersburg fortgesetzt.

Die erste elektrische Eisenbahn, die über den Versuchsbetrieb hinauskam und bereits dem öffentlichen Verkehr diente, war eine Ausstellungsbahn, die am 31. Mai 1879 auf der

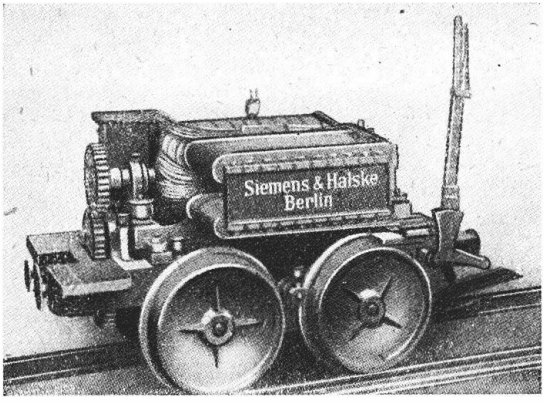


Bild 1. Erste elektrische Lokomotive von Werner v. Siemens

Berliner Gewerbeausstellung dem Verkehr übergeben wurde. Die Lokomotive war nach Entwürfen von Siemens von der Firma Siemens & Halske erbaut worden und ist heute noch im Deutschen Museum in München zu sehen (Bild 1). Der zweipolige Gleichstrommotor war ein Reihenschluß-Kommutatormotor und hatte eine Leistung von etwa 2,2 kW. Er war in Fahrtrichtung angeordnet und übertrug die Antriebskraft über Stirn- und Kegelräder auf die Treibachsen. Die Änderung der Fahrtrichtung erfolgte durch ein mechanisches Wechselgetriebe, da die Änderung der Motordrehrichtung durch Umpolung der Wicklung noch unbekannt war. Die Leistung dieses kleinen Triebfahrzeuges reichte aus, um drei Wagen mit je 6 Fahrgästen mit einer Geschwindigkeit von 7 km/h zu befördern (Bild 2). Dem Triebfahrzeug wurde Gleichstrom mit einer Spannung von 150 V über eine isolierte

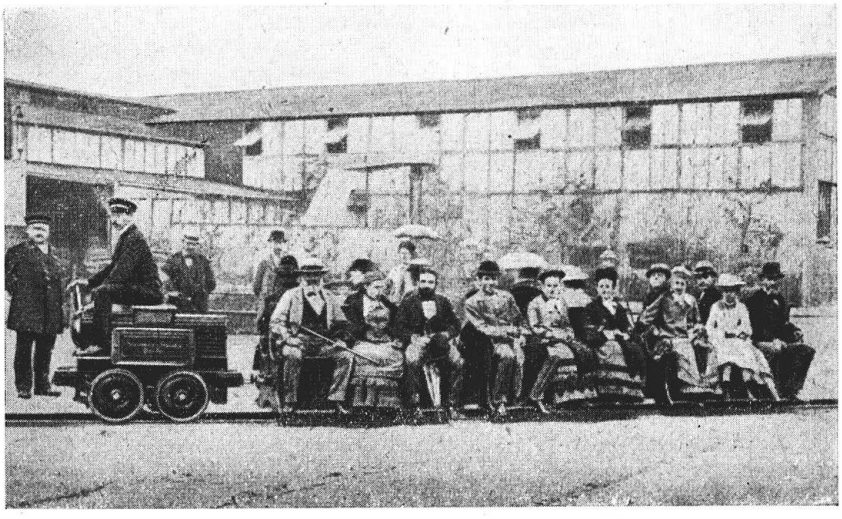


Bild 2. Ausstellungsbahn auf der Berliner Gewerbe-Ausstellung

Flacheisenschiene zugeführt, die hochkant stehend zwischen den Fahrschienen angeordnet war. Für die Stromabnahme verwendete man anfangs Kontaktrollen, später kleine Drahtbürsten, die das Flacheisen von beiden Seiten berührten. Die Dynamomaschine, die den Strom erzeugte, wurde nur dann in Betrieb gesetzt, wenn der Zug fahren sollte.
Die Ausstellungsbahn hatte eine Spurweite von 490 mm und war etwa 300 m lang. Fast 90 000 Personen wurden in nur vier Monaten auf dieser Ausstellungsbahn befördert und waren darüber begeistert, daß diese kleine Lokomotive ohne Zischen, Puffen und Fauchen still und ruhig ihre Kreise zog und niemanden durch Rauch und Ruß belästigte.

1.12 Die ersten elektrischen Straßenbahnen

Ermutigt durch die guten Erfahrungen, die man mit der Ausstellungsbahn gesammelt hatte, schlug Siemens vor, durch die Friedrichstraße in Berlin eine elektrische Hochbahn zu bauen. Dieser Vorschlag wurde zwar infolge der Einsprüche der betroffenen Grundstücksbezitzer abgelehnt, doch Siemens verfolgte die Idee der Einführung des elektrischen Zugbetriebes beharrlich weiter. Bald darauf rüstete die Firma Siemens & Halske die Anschlußbahn vom Bahnhof Groß-Lichterfelde bei Berlin zur damaligen Kadettenanstalt für den elektrischen Zugbetrieb aus. Als diese meterspurige Bahn von etwa 2 km Länge am 16. Mai 1881 dem öffentlichen Verkehr übergeben wurde, war sie die erste elektrische Straßenbahn der Welt (Bild 3).
Der Motor war quer zur Fahrtrichtung am unteren Teil des gefederten Wagenkastens aufgehängt. Durch einen riemenartigen Antrieb aus Wickelfederschnüren konnte das Feder-

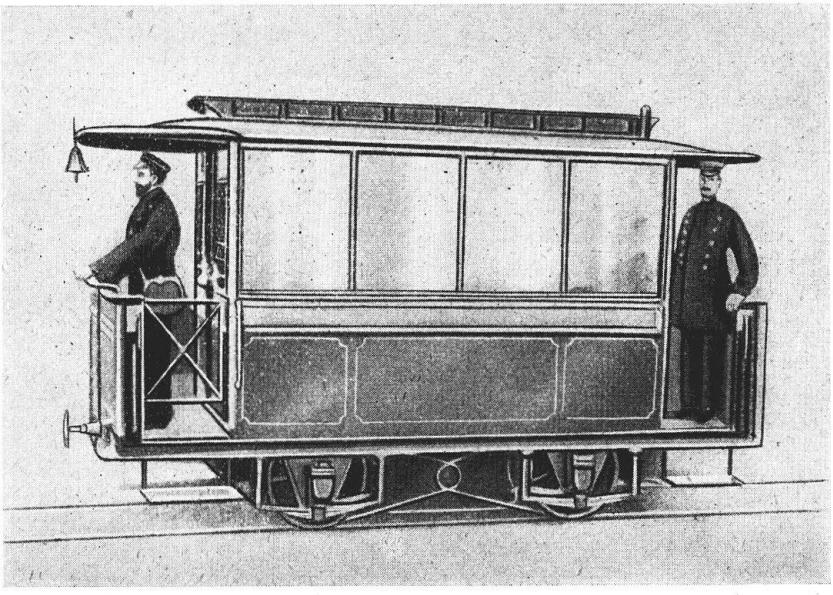


Bild 3. Erste elektrische Straßenbahn

spiel ausgeglichen werden. Die Fahrtrichtung wurde hier zum erstenmal dadurch verändert, daß man durch Verstellen der Bürsten am Kommutator die Drehrichtung des Motors wechselte. Der Wagen hatte eine Motorleistung von etwa 3,7 kW und erreichte bei voller Besetzung mit 26 Personen eine Geschwindigkeit bis zu 40 km/h. Dadurch wurde diese erste Straßenbahn bei den Fahrgästen sehr schnell beliebt. Nach der ersten Probefahrt schrieb Siemens an seinen Bruder in London: „Gestern ist unsere elektrische Bahn in Lichterfelde mit großem Glanz eröffnet worden. Der Eisenbahnminister erklärte unter dem Eindruck dessen, was er hier zu sehen bekam, daß er jetzt an den Ernst und die große Zukunft der elektrischen Lokomotive glaube." Die Anerkennung für diese neue Erfindung blieb also nicht aus.

So ist es verständlich, daß in den nächsten Jahren viele vorhandenen Pferdebahnen umgebaut und zahlreiche neue elektrische Straßenbahnen gegründet wurden. Wenig später setzte man auch in Bergwerken elektrische Triebfahrzeuge ein.

Bei der ersten Straßenbahn in Lichterfelde verwendete man die eine Fahrschiene für die Zuführung und die andere für die Rückleitung des Stromes (Gleichstrom 180 V). Dabei war es erforderlich, die beiden Schienen gegeneinander und gegen Erde durch Holzschwellen zu isolieren und Holzräder mit stählernen Radreifen zu verwenden. Bei feuchter Witterung traten große Energieverluste auf, auch verursachte diese recht einfache Art der Stromzuführung einige schwere Unfälle. Trat zum Beispiel an einem Übergang ein Pferd mit zwei Füßen gleichzeitig auf die Fahrschienen, so wurde es sofort getötet. Bei der Anlage weiterer Straßenbahnen ordnete man daher eine besondere, gegen Berührung geschützte Stromschiene an, die jedoch an Wegübergängen zu Schwierigkeiten führte.

Als dann die Firma Siemens & Halske im Jahre 1882 eine elektrische Grubenlokomotive

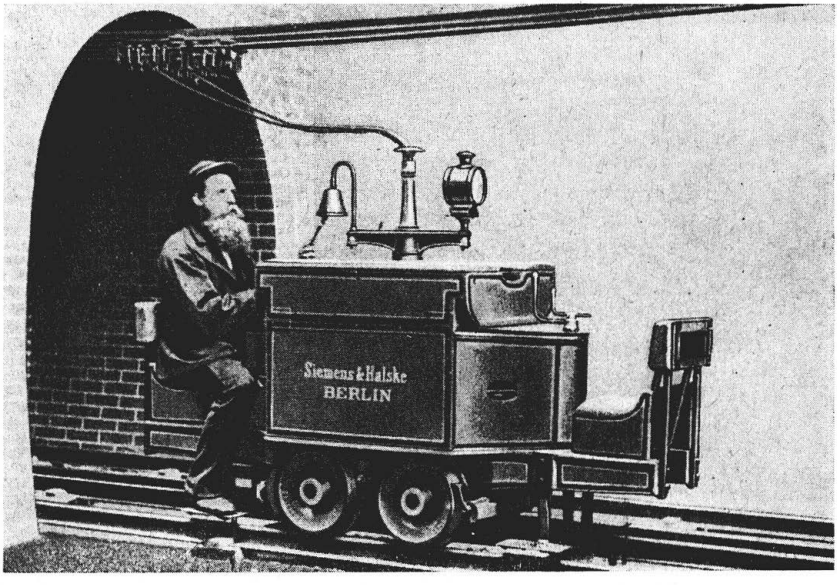


Bild 4. Elektrische Grubenbahn aus dem Jahre 1882

für die Bergwerke Zauckerode und Neu-Staßfurt lieferte, wurde der Strom über eine doppelpolige Oberleitung zugeführt (Bild 4). Diese kam auch zur Anwendung, als etwa zur gleichen Zeit die neue Straßenbahn Charlottenburg–Spandauer Bock in Betrieb genommen wurde. Die Hin- und Rückleitung des Stromes erfolgte durch zwei parallel verlaufende Drähte, auf denen ein kleiner Kontaktwagen vom Fahrzeug nachgeschleppt wurde. Dieser entgleiste aber oft in Weichen und Kreuzungen, so daß man auch dieses System der Stromzuführung nicht lange beibehielt.

Als im Jahre 1884 für den Ausflugsverkehr in der Nähe von Wien die erste elektrische Straßenbahn gebaut und auch eine Straßenbahn von Frankfurt (Main) nach Offenbach in Betrieb genommen wurde, verwendete man für die zweipolige Fahrleitung geschlitzte Kupferrohre, in denen ein kleines Kontaktschiffchen entlang glitt (Bild 5).

Da diese etwa 20 mm starken Rohre das Straßenbild verunzierten, untersagten manche Stadtverwaltungen die Genehmigung für den Bau von Oberleitungen. Daraufhin verlegte man in einigen Großstädten, zum Beispiel in Budapest, Berlin und Dresden die Stromzuführung in einen unterirdischen Schlitzkanal, der unter einer Doppelfahrschiene angeordnet war (Bild 6). Bei Regen und Schnee erwies sich jedoch diese Anlage als äußerst störanfällig und wurde aus diesem Grunde bald wieder aufgegeben.

Es war daher ein großer Erfolg, als man im Jahre 1888 für die Zuführung des Stromes erstmalig einen dünnen Fahrdraht verwendete. Die Stromabnahme erfolgte durch eine

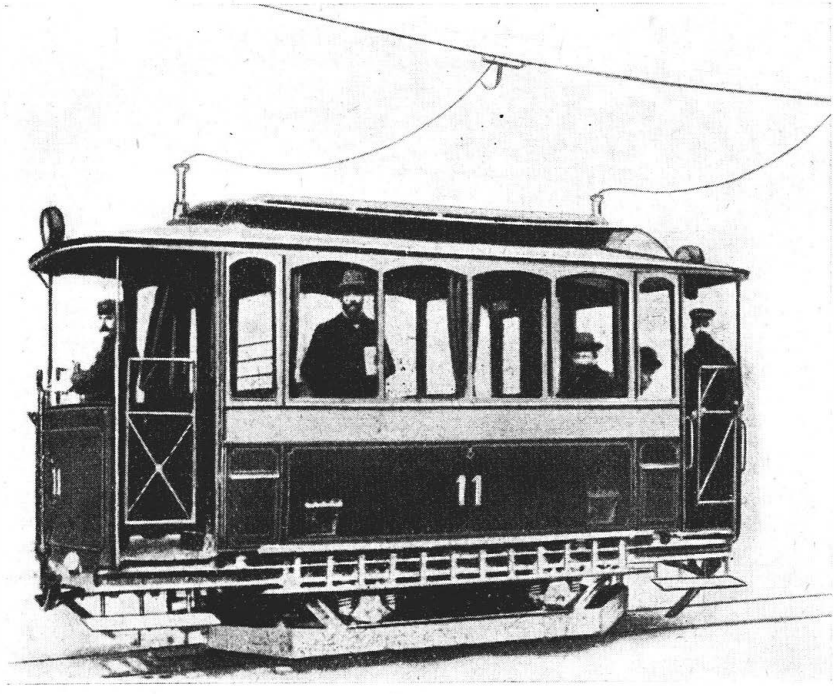


Bild 5. Straßenbahn Frankfurt (Main)–Offenbach mit Schlitzrohr-Fahrleitung

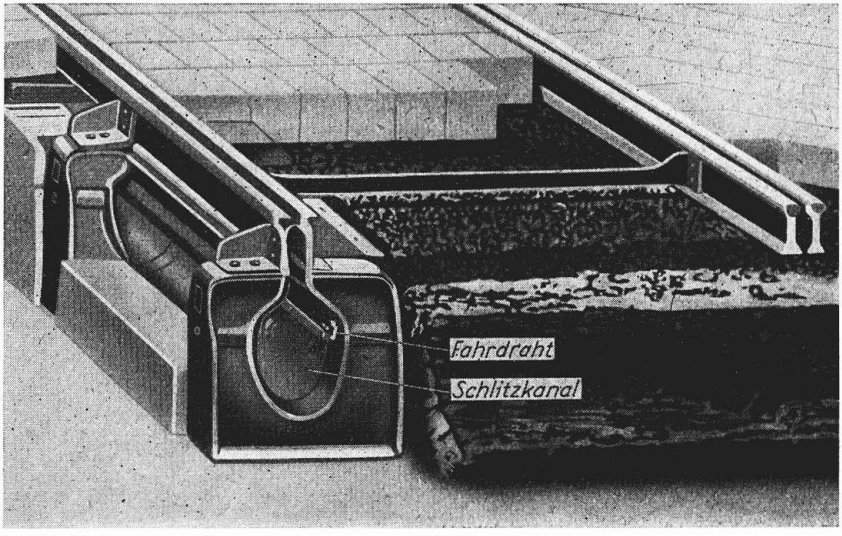


Bild 6. Unterirdische Stromzuführung mit Schlitzkanal

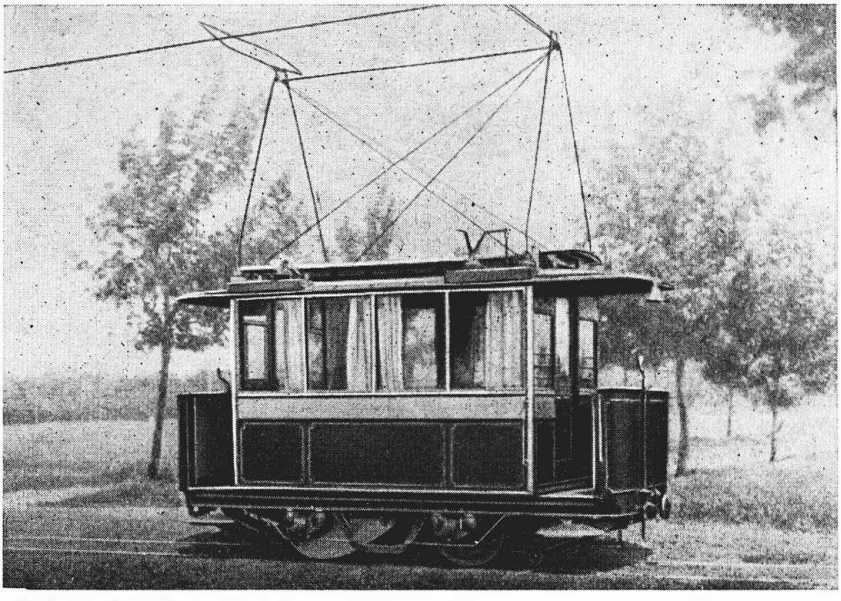


Bild 7. Straßenbahn mit Bügelstromabnehmern

Kontaktrolle, wie sie heute noch bei einigen Straßenbahnen verwendet wird. Zur Rückleitung des Stromes dienten die Fahrschienen. Der im Jahre 1889 von Reichel (Siemens) entwickelte Schleifbügel wurde erstmalig bei der Lichterfelder Straßenbahn erprobt (Bild 7). Er ist der Vorgänger des heute allgemein gebräuchlichen Scherenstromabnehmers. Auf Grund der guten Erfolge mit den bereits vorhandenen Straßenbahnen entschloß man sich, weitere Straßenbahnen und Überlandbahnen im Ausland und auch in den verschiedensten Teilen Deutschlands zu eröffnen. So führte als erste deutsche Großstadt Halle im Jahre 1891 den elektrischen Straßenbahnbetrieb ein. Bald darauf folgten weitere Städte, so zum Beispiel im Jahre 1892 Bremen. Im Juli 1893 fuhr die erste „Elektrische" in Dresden vom Schloßplatz über Blasewitz nach Loschwitz. Dagegen wurde erst im Jahre 1895 die erste elektrische Straßenbahn im Stadtgebiet von Berlin eröffnet.

Mit zunehmendem Verkehr machte man sich auch Gedanken über einen wirtschaftlichen Stromverbrauch, und es war ein großer Erfolg, als im Jahre 1894 die Barmenbergbahn als erste Bahn mit Stromrückgewinnung in Betrieb genommen wurde. Durch Einführung der Wendepole war es inzwischen auch gelungen, die Spannung und damit auch die Leistung der Fahrmotoren zu erhöhen. Man konnte nun mit Aussicht auf Erfolg an größere Aufgaben herangehen und baute die erste elektrische Überlandbahn von Düsseldorf nach Krefeld. Auch für den Schnellverkehr in Großstädten schien der elektrische Zugbetrieb besonders geeignet, da hier und besonders auf Tunnelstrecken die Rauchentwicklung der Dampflokomotiven sehr unangenehm empfunden wurde. Es war ein großes Ereignis, als im Jahre 1896 die Untergrundbahn in Budapest als erste unterirdische Schnellbahn Europas in Betrieb genommen wurde, die übrigens heute noch ohne wesentliche Änderung ihren Dienst verrichtet. Bald darauf begann man auch mit dem Bau der Stammstrecke der Berliner Hochbahn Gleisdreieck–Schlesisches Tor.

1.13 Die Anfänge der elektrischen Zugförderung auf Vollbahnen

An die Elektrifizierung von Fernbahnen wagte man sich zunächst nicht heran. Es fehlten noch die technischen Voraussetzungen, um schwere Züge mit hohen Fahrgeschwindigkeiten über weite Strecken zu befördern. Trotz erfolgreicher Entwicklungsarbeiten in Europa wurden die ersten elektrischen Vollbahnlokomotiven in Amerika hergestellt und auf der Chikagoer Weltausstellung im Jahre 1893 gezeigt. Zwei Jahre später konnte auf einer 2,4 km langen Strecke der Baltimore–Ohio-Bahn zum erstenmal ein planmäßiger elektrischer Zugbetrieb mit 650 V Gleichstrom aufgenommen werden. Da Gleichstrom jedoch nicht transformiert werden kann und die Fahrdrahtspannung daher in ihrer Größe begrenzt ist, tritt bei weiten Entfernungen ein starker Spannungsabfall auf. Dieser kann nur durch große Leitungsquerschnitte und geringe Unterwerksabstände in erträglichen Grenzen gehalten werden.

Wegen dieser Mängel wurden in Deutschland auch Versuche mit Wechselstrom durchgeführt. Hier ist es möglich, die Spannung in der Fahrleitung hoch zu wählen und auf dem Fahrzeug selbst durch einen Transformator auf den für die Fahrmotoren günstigsten Wert herabzusetzen.

Zur Klärung der zahlreichen noch offenstehenden Fragen legte die Firma Siemens & Halske bereits in den Jahren 1891/92 auf ihrem Werkgelände in Charlottenburg eine Versuchsstrecke an. Man verwendete Drehstrom von 550 V, der über zwei Oberleitungsdrähte und die Fahrschienen der Lokomotive zugeführt wurde. Bald daraufhin ging man zu höheren

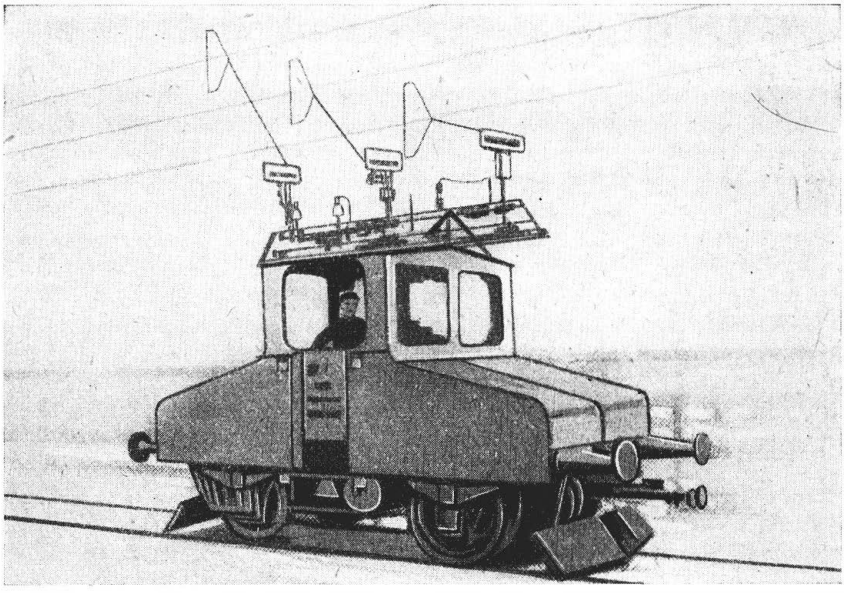


Bild 8. Drehstrom-Versuchslokomotive 10000 V, Lichtertelde 1898

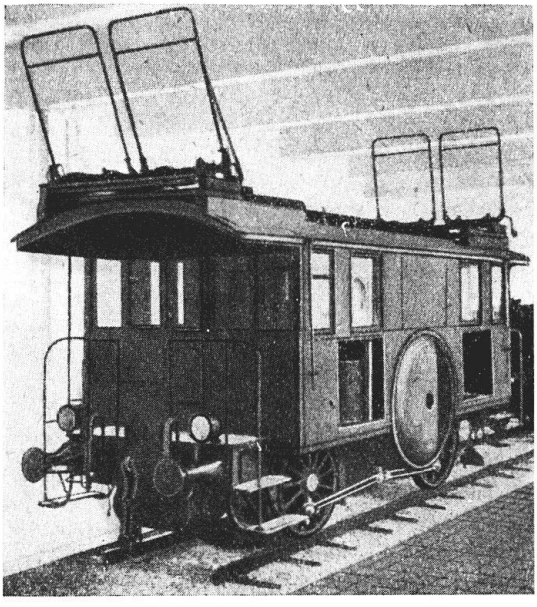


Bild 9
Erste europäische Vollbahn-Lokomotive, Baujahr 1899

Spannungen über und im Jahre 1897 errichtete die Firma Siemens & Halske in Groß-Lichterfelde eine neue Versuchsbahn, bei der man die Fahrdrahtspannung von 10000 V in der Lokomotive auf eine Motorspannung von 650 V herabsetzte (Bild 8). Die dreipolige Oberleitung war neben der Strecke verlegt.

Im Jahre 1899 wurde dann die erste elektrische Vollbahnlokomotive Europas in den Dienst gestellt, die von der Schweizer Lokomotiv- und Maschinenfabrik Winterthur und der Firma Brown, Boverie & Cie. gebaut worden war (Bild 9). Sie wurde in der Schweiz auf der etwa 40 km langen Strecke Burgdorf–Thun eingesetzt, die mit einer Fahrdrahtspannung von 750 V und einer Frequenz von 40 Hz betrieben wurde. Die Lokomotive hatte zwei Drehstrommotoren je 110 kW und legte bis zum Jahre 1933 rund 600 000 km zurück. Das Original ist im Deutschen Museum in München ausgestellt.

Um die Jahrhundertwende setzte man auch in Deutschland die Versuche mit Drehstrom fort und gründete unter Beteiligung der Firmen AEG und SSW die „Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen". Ihre Aufgabe war, alle noch offenstehenden Fragen, z. B. auch auf dem Gebiet der Fahrdynamik, zu klären. Als Versuchsstrecke wurde die etwa 23 km lange Militärbahn von Marienfelde nach Zossen für elektrischen Betrieb mit Drehstrom ausgebaut. Man wählte drei seitliche Oberleitungen und eine Fahrdrahtspannung von 10 kV. Zum Einsatz kamen außer einer Lokomotive (Bild 10) zwei Triebwagen, in denen der hochgespannte Strom durch einen Umspanner auf eine Motorspannung von 1000 V herabgesetzt wurde (Bild 11). Jeder Wagen hatte zwei dreiachsige Drehgestelle und war mit vier Drehstrom-Fahrmotoren je 500 kW Höchstleistung bei 45 Hz ausgerüstet.

Bei Versuchsfahrten im Oktober 1903 konnte die für die damalige Zeit recht beachtliche

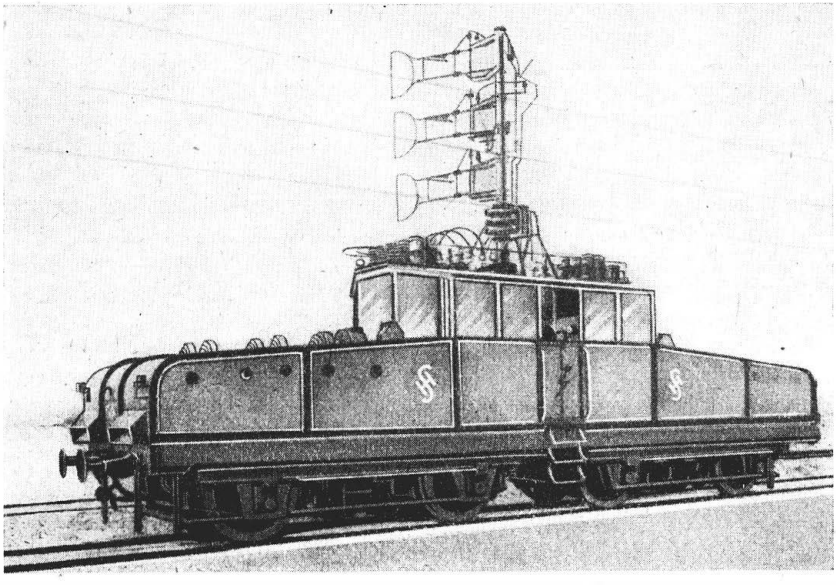


Bild 10. Drehstromlokomotive 10000 V, Marienfelde–Zossen, Baujahr 1902
$V_{max} = 150$ km/h

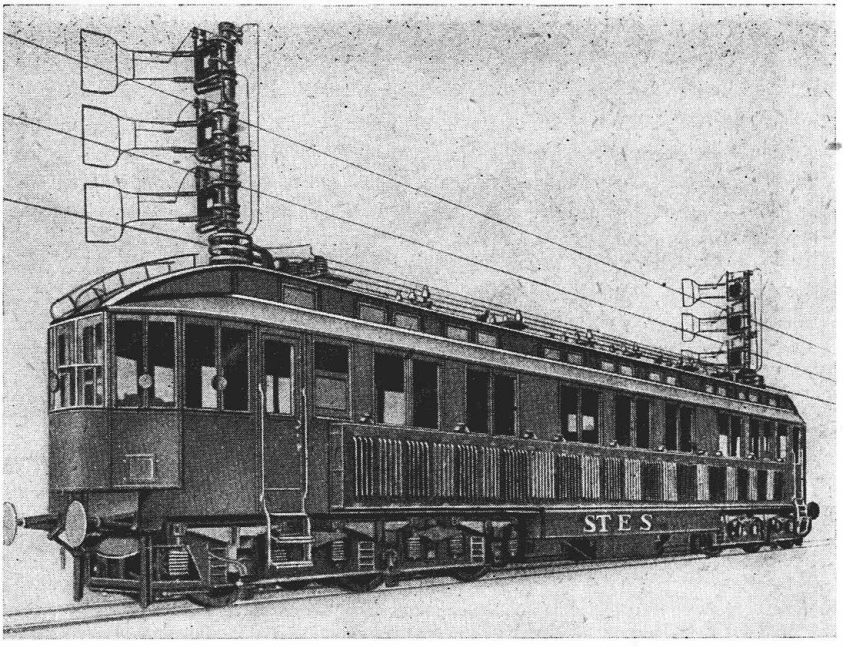


Bild 11. Elektrischer Schnelltriebwagen, Baujahr 1903, $V_{max} = 210$ km/h

Höchstgeschwindigkeit von 210 km/h erreicht werden. Diesem Erfolg gebührt besondere Anerkennung, zumal es trotz der ständigen technischen Verbesserung auf dem Gebiete der elektrischen Zugförderung innerhalb der nächsten 50 Jahre nicht gelang, diesen Rekord zu brechen.

Auch in Italien wurden seinerzeit mehrere Drehstromstrecken angelegt, bei denen zwei Phasen durch Oberleitungen zugeführt, für die Zuleitung der dritten Phase jedoch die Schienen herangezogen wurden. Dadurch wurde zwar die Brauchbarkeit des Systems nachgewiesen, doch gaben die immer noch vorhandenen zwei Fahrleitungen, besonders beim Befahren von Kreuzungen und Weichen, zu Störungen Anlaß.

Außerdem ist der Drehstrom-Asynchronmotor wegen seiner starren Drehzahlcharakteristik und der schlechten Steuerbarkeit für den schweren Bahnbetrieb nicht recht geeignet. Hierfür braucht man Motoren, die eine wirtschaftliche Geschwindigkeits- bzw. Zugkraftsteuerung zulassen.

Bei der Elektrifizierung der Valtellina-Bahn in Oberitalien wählte man anfangs eine Fahrdrahtspannung von 1000 V, die später auf 3000 V erhöht wurde. Die Frequenz betrug erst 15 Hz, später 16⅔ Hz. Aus dieser Bahn entstand in den folgenden Jahren das einzige größere mit Drehstrom betriebene Vollbahnnetz der Welt.

Auf der Suche nach einem Stromsystem, das die Vorteile des Gleichstrom-Reihenschlußmotors und die Transformierbarkeit des Drehstromes in sich vereinigt, entschloß man sich, nunmehr auch Versuche mit Einphasen-Wechselstrom durchzuführen. Eine etwa 4 km lange

Probestrecke von Berlin-Niederschöneweide nach Spindlersfeld wurde im Jahre 1903 eröffnet und mit Einphasen-Wechselstrom von 6 kV und 25 Hz betrieben. Man verwendete Triebwagen mit Fahrmotoren der Bauart Winter-Eichberg. Es waren Einphasen-Kommutatormotoren je 74 kW Leistung in Tatzlagerbauart. Hier benutzte man auch erstmalig die Kettenfahrleitung, die sich später allgemein durchsetzte. Die auf dieser Strecke gesammelten Erfahrungen bewiesen die Vorteile dieses Stromsystemes, so daß bald leistungsfähigere Lokomotiven mit etwa 750 kW Leistung gebaut wurden. Inzwischen hatte auch der Schweizer Ingenieur Behn-Eschenburg den Einphasenwechselstrom-Reihenschlußmotor mit Wendepol-Parallelwiderstand entwickelt, der sich besser als alle anderen Konstruktionen bewährte und bis heute die führende Motorbauart geblieben ist. Die erste elektrische Lokomotive, die mit den von Behn-Eschenburg entwickelten Motoren ausgerüstet war, wurde bereits im Jahre 1905 auf der Schweizer Strecke Seebach — Wettingen in Dienst gestellt. Sie war damit die erste Einphasenlokomotive der Welt (15 kV, 15 Hz).

Auf Grund der guten Erfahrung entschloß man sich, bald weitere Stadt- und Vorortbahnen auf elektrischen Betrieb umzustellen, wie zum Beispiel die Hamburger Stadtbahnstrecke Blankenese–Ohlsdorf, die mit Einphasen-Wechselstrom von 6,3 kV und 25 Hz betrieben wurde. Wenig später wurde auch auf der Hamburger Hafenbahn der elektrische Zugbetrieb eingerichtet, jedoch mit einer Fahrdrahtspannung von nur 3 kV und 25 Hz.

Als dann im Jahre 1905 auf der Lokalbahn Murnau–Oberammergau mit Einphasen-Wechselstrom von 5,5 kV und 16⅔ Hz gute Betriebsergebnisse erzielt wurden (Bild 12), beschloß man wenige Jahre später, auch auf den Strecken Freilassing–Berchtesgaden, Mittenwald–Garmisch und auf der Wiesentalbahn im Schwarzwald den elektrischen Zugbetrieb einzuführen. Nach dieser umfangreichen Umstellung in Süddeutschland, die durch den Ausbau der Wasserkräfte begünstigt wurde, stand Deutschland an führender Stelle der Bahnelektrifizierung in Europa.

Auch die Entwicklung leistungsfähiger Lokomotiven hatte inzwischen beachtliche Fortschritte gemacht. So baute die Firma AEG im Jahre 1906 die erste Einphasen-Wechselstrom-Güterzugslokomotive Deutschlands, die bei einer Eigenmasse von 63 t eine Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h erreichte (Bild 13). Diese Lokomotive wurde später auf der Hafenbahn

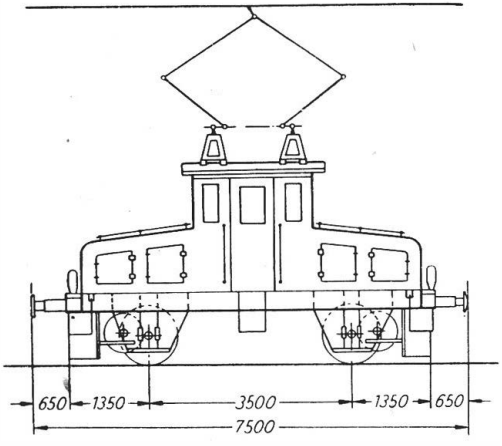


Bild 12
Einphasenwechselstrom-Lokomotive, der Strecke Murnau-Oberammergau, Baujahr 1905

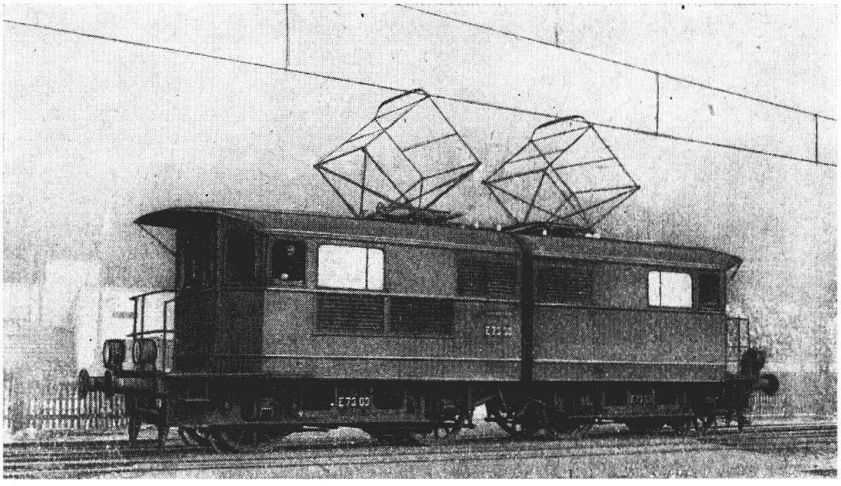


Bild 13. Erste Einphasen-Güterzuglokomotive Deutschlands,
Leistung 660 kW, Baujahr 1906

Altona eingesetzt und war bis zum Jahre 1932 in Betrieb. Heute ist sie im Verkehrsmuseum in Nürnberg zu sehen.

Die guten Betriebsergebnisse, die man auf den elektrifizierten Bahnen sammeln konnte, und besonders die große Wirtschaftlichkeit des elektrischen Zugbetriebes ließen es ratsam erscheinen, auch einige stark belastete Strecken des mitteldeutschen Industriegebietes auf elektrische Zugförderung umzustellen. Bereits im Jahre 1911 waren die Arbeiten so weit abgeschlossen, daß auf dem Abschnitt Bitterfeld–Dessau der elektrische Zugbetrieb aufgenommen werden konnte. Innerhalb der nächsten drei Jahre wurde diese Strecke bis Leipzig und Magdeburg ausgedehnt und auch der Abschnitt Leipzig–Halle elektrifiziert. Der erste Weltkrieg verzögerte jedoch die Inbetriebnahme dieser Strecken, die erst im Jahre 1922 stattfand.

Im Jahre 1914 begann man auch mit der Einführung des elektrischen Zugbetriebes im damaligen Schlesien, da auf den schwierigen Streckenabschnitten der Riesengebirgsbahn der Einsatz von elektrischen Lokomotiven besonders zweckmäßig erschien. Wenn auch die weitere Elektrifizierung durch den ersten Weltkrieg vorübergehend unterbrochen wurde, so führten die guten Erfahrungen, die man mit der elektrischen Zugförderung sammeln konnte, doch dazu, daß bald viele weitere, bis dahin dampfbetriebene Strecken auf elektrischen Zugbetrieb umgestellt wurden.

Ende des Jahres 1925 war das elektrisch betriebene Netz der Deutschen Reichsbahn auf etwa 700 km Streckenlänge angewachsen, und es bestand das Bestreben, die vier weit auseinanderliegenden Netze in Mitteldeutschland, Schlesien, Bayern und Baden miteinander zu verbinden. Der am 1. April 1920 durchgeführte Zusammenschluß der deutschen Länderbahnen zur Deutschen Reichsbahn bot hierfür eine günstige Voraussetzung. Im Jahre 1936 wurde mit der Elektrifizierung der Strecke Nürnberg–Leipzig begonnen, von welcher der Teilabschnitt Nürnberg–Saalfeld im Mai 1939 dem Betrieb übergeben werden

konnte. Als dann Ende 1940 auf der gesamten ungefähr 345 km langen Strecke der elektrische Zugbetrieb aufgenommen wurde, traten die Vorteile der elektrischen Zugförderung klar in Erscheinung. Infolge der höheren Fahrgeschwindigkeit erreichte man eine beträchtliche Verkürzung der Reisezeit, im mitteldeutschen Raum eine größere Zugdichte und auf den starken Steigungen des Thüringer Waldes höhere Schlepplasten. Durch den zweiten Weltkrieg wurden dann jedoch die weiteren Bauvorhaben vereitelt, und es war nicht mehr möglich, die Hauptstadt Berlin an das elektrisch betriebene Netz anzuschließen.

Im Jahre 1945 betrug die Betriebslänge der mit Einphasen-Wechselstrom und 16⅔ Hz betriebenen Vollbahnen:

in Süddeutschland	1460	Strecken-km
in Mitteldeutschland	495	„
in Schlesien	390	„
insgesamt:	2345	Strecken-km

Dieser Streckenlänge entsprach, da es sich meist um zwei- und mehrgleisige Strecken handelte, eine Gleislänge von insgesamt 6452 km.

Die Weiterentwicklung der elektrischen Lokomotiven brachte neben einer ständigen Steigerung der Leistung und der Geschwindigkeit eine beträchtliche Erhöhung der Betriebssicherheit, und so ist es verständlich, daß sich der elektrische Zugbetrieb mit großer Schnelligkeit bald in fast allen Ländern der Welt durchsetzte.

1.14 Jetziger Stand der elektrischen Zugförderung

Infolge der Auswirkungen des zweiten Weltkrieges betrug im Jahre 1946 das elektrisch betriebene Netz Deutschlands nur etwa 1500 Strecken-km. In der Deutschen Demokratischen Republik wurde der elektrische Zugbetrieb auf der Strecke Halle–Köthen am 1. September 1955 wieder aufgenommen und Ende 1956 bis Magdeburg ausgedehnt.

Im Laufe des Jahres 1958 wurden die Strecke Roßlau–Dessau–Bitterfeld–Leipzig und der Abschnitt Leipzig–Halle auf elektrischen Betrieb umgestellt, so daß sich ein zusammenhängendes Netz von etwa 200 Strecken-km ergab. Im Jahre 1959 folgten die Strecken Halle–Weißenfels und Merseburg–Mücheln. Im Anschluß daran wurde mit der Umstellung der Strecken Leipzig–Altenburg, Böhlen–Espenhain und Neukieritzsch–Borna begonnen. Die Elektrifizierung weiterer Strecken ist bereits in Arbeit oder in Vorbereitung.

Die nachfolgende Zusammenstellung (Tafel 1) gibt eine Übersicht über den Stand der Elektrifizierung in den einzelnen Ländern Europas. Da es sich bei den elektrisch betriebenen Strecken jedoch im allgemeinen um Strecken mit sehr hoher Verkehrsdichte handelt, ist der Anteil der elektrischen Zugförderung an der gesamten Verkehrsleistung bedeutend größer als der prozentuale Anteil der Streckenlänge.

Eine weitere Zusammenstellung (Tafel 2) läßt den Anteil der elektrisch betriebenen Strecken der einzelnen Erdteile erkennen (Stand 1959).

Dabei erscheint der Anteil der elektrisch betriebenen Strecken am gesamten Streckennetz mit 6,0 % sehr gering. Trotz der vielen betrieblichen und wirtschaftlichen Vorteile der elektrischen Zugförderung darf man jedoch die ungewöhnlich hohen Anlage-

kosten nicht übersehen, auf die es zurückzuführen ist, daß im allgemeinen nur auf besonders stark belasteten Strecken der elektrische Zugbetrieb wirtschaftlich ist (siehe Abschnitt 1.43).

TAFEL 1

Elektrischer Zugbetrieb in Europa (in km Streckenlänge)
– Stand 1958 –

Land	Betriebslänge insges.	davon Gleichstrom	elektrisch betriebene Strecken 1 ~ 16⅔	1 ~ 50	Drehstrom	Sonst. u. Priv.	insges.	%
Albanien	130	—	—	—	—	—	—	—
Belgien	6716	868	—	—	—	1125	1993	29,7
Bulgarien	4300	—	—	—	—	—	—	—
Dänemark	4509	60	—	—	—	—	60	1,3
Deutschland DR	16121	357[1])	188	—	—	—	545	3,4
„ DB	36480	80	3230	56	—	594	3960	10,8
Finnland	5255	—	—	—	—	—	—	—
Frankreich	44962	4786	58	1451	7	340	6642	14,8
Griechenland	2665	18	—	—	—	—	18	0,7
Großbritannien	32135	2034	—	70	—	29	2133	6,6
Irland	4127	—	—	—	—	—	—	—
Italien	22041	5926	—	—	1273	1835	9034	40,9
Jugoslawien	11735	178	5	—	—	—	183	1,6
Niederlande	3223	1625	—	—	—	—	1625	50,5
Norwegen	4494	—	1626	—	—	—	1626	36,2
Österreich	6615	—	1766	—	—	241	2007	30,3
Polen	26997	647	—	—	—	—	647	2,4
Rumänien	10768	—	—	—	—	—	—	—
Schweden	15945	127	7179	—	—	—	7306	45,9
Schweiz	5227	1109	3970	—	42	—	5121	98,4
Spanien	17758	2664	—	—	47	—	2711	15,3
Tschechoslowakei	13446	569	—	—	—	—	569	4,2
UdSSR[2])	121185	7593	—	137	—	—	7730	6,3
Ungarn	8350	146	—	270	—	—	416	5,0
insgesamt	425184	28787	18022	1984	1369	4164	54326	12,8
		53,0 %	33,2 %	3,6 %	2,5 %	7,7 %	100 %	

[1]) einschl. Berlin-S-Bahn.
[2]) einschl. asiatischer Teil.

TAFEL 2

Elektrischer Zugbetrieb auf den einzelnen Erdteilen – Stand 1959 –

Erdteil	Betriebslänge insgesamt Strecken-km	davon elektrisch betrieben Strecken-km	%
Europa (ohne UdSSR) . .	310018	46150	15,55
Afrika	73498	4071	5,54
Asien (einschl. UdSSR) . .	298124	18669	6,25
Australien.	48787	909	1,86
Nord- und Mittelamerika .	475137	3779	0,79
Südamerika	104847	3059	3,06
	1310411	78637	6,00

1.2 Gegenüberstellung der verschiedenen Stromsysteme

Aus der Entwicklung des elektrischen Zugbetriebes ging bereits hervor, daß man anfangs ausschließlich Gleichstrombahnen anlegte. Später führte man auch Versuche mit Drehstrom durch, die jedoch wegen der komplizierten Fahrleitung nicht recht befriedigten. Kurz nach der Jahrhundertwende gelang es, durch Verbesserung der Fahrmotoren auch mit Einphasen-Wechselstrom recht beachtliche Erfolge zu erzielen. Während man anfangs niedrige Frequenzen, d. h. 25 Hz, später 15 Hz und zuletzt 16⅔ Hz anwendete, führte man später auch Versuche mit Einphasen-Wechselstrom der Industriefrequenz (50 Hz) durch, um die Stromversorgung der Eisenbahn unmittelbar aus dem Landesnetz zu ermöglichen. Alle vier Stromarten waren für Bahnzwecke geeignet und hatten gewisse Vorteile. Sie wiesen jedoch auch beträchtliche Mängel auf, so daß es damals nicht leicht war, das für die elektrische Zugförderung günstigste Stromsystem zu erkennen. Technische, betriebliche und volkswirtschaftliche Gesichtspunkte mußten dabei Berücksichtigung finden. Neben der unbedingten Forderung nach Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit sollten die elektrischen Lokomotiven, den ständig wechselnden Betriebsverhältnissen entsprechend, noch anderen Ansprüchen genügen. Man verlangte:

1. hohes Anlaufmoment und große vorübergehender Überlastbarkeit der Motoren,
2. feinstufige und weitgehende Steuerbarkeit von Zugkraft bzw. Geschwindigkeit,
3. guten Wirkungsgrad und bei Wechselstrom hohen Leistungsfaktor bei allen Belastungen und Geschwindigkeiten,
4. geringe Masse der Fahrmotoren und der sonstigen elektrischen Ausrüstung,
5. einfache Bedienung und leichte Zugänglichkeit aller Teile,
6. Schonung der Radreifen und Bremsklötze durch elektrische Bremsung.

Mit der Klärung dieser Probleme wurde die „Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen" beauftragt. Sie hatte außerdem die Aufgabe, durch praktische Versuche die erreichbare Höchstgeschwindigkeit zu ermitteln. Auch in anderen Ländern wurden umfangreiche Erprobungen mit den verschiedenen Stromsystemen durchgeführt, wobei für den gesamten elektrischen Bahnbetrieb wichtige Erkenntnisse gesammelt und entscheidende

technische Verbesserungen erreicht wurden. Es erscheint daher zweckmäßig, unter den obengenannten Gesichtspunkten die einzelnen Stromsysteme miteinander zu vergleichen und das Charakteristische jeder Stromart einmal klar herauszustellen.

1.21 Gleichstrom

Aus der geschichtlichen Entwicklung des elektrischen Zugbetriebes ist bekannt, daß bei den ersten Versuchsbahnen ausschließlich Gleichstrom verwendet wurde. Da es sich seinerzeit nur um geringe Leistungen und kurze Streckenlängen handelte, genügte dieses Stromsystem durchaus den gestellten Anforderungen. Es hat sich bis heute bei sämtlichen elektrisch betriebenen Nahverkehrsmitteln erhalten. Fast alle Straßenbahnen arbeiten mit Gleichstrom von 600 V, während Stadt-, Vorort- und Überlandbahnen im allgemeinen eine höhere Fahrdrahtspannung (bis 1200 V) verwenden.

Für die Elektrifizierung von Fernbahnen war Gleichstrom jedoch zunächst nicht geeignet, da es sich hier um große Entfernungen und wesentlich höhere Leistungen handelte. Gleichstrommotoren konnten damals nur für Spannungen bis 600 V und eine Leistung von 30 kW gebaut werden. Verwendete man bei einer Fahrdrahtspannung von 600 V eine kupferne Fahrleitung von 100 mm² Querschnitt, so mußte man bei einer Übertragung von 100 kW bereits nach einer Entfernung von 5 km einen Spannungsabfall von 120 V in Kauf nehmen. Um die dadurch erforderliche große Anzahl von Speisepunkten zu vermeiden, erhöhte man bei Fernbahnen die Fahrdrahtspannung zunächst auf 1500 V, später auf 3000 V. Eine weitere Steigerung ist aber nicht ohne weiteres möglich, da den Fahrmotoren bei der höchsten Schaltstufe die volle Fahrdrahtspannung zugeführt wird. Wählt man als oberste Grenze für die Motorspannung etwa 1500 V, so ergibt sich bei Hintereinanderschaltung zweier Motoren eine Fahrdrahtspannung von 3000 V. Diese kann auf maximal 4000 V gesteigert werden, doch ergeben sich dann bereits gewisse Schwierigkeiten bei der Herstellung der Schaltgeräte. Diese Spannungsbeschränkung bedingt bei schweren elektrischen Lokomotiven mit großer Leistung hohe Stromstärken, so daß große Fahrdrahtquerschnitte von 300···400 mm² erforderlich sind. Da der größte Fahrdrahtquerschnitt etwa 150 mm² beträgt, müssen dann zwei Fahrleitungen verlegt werden. Dadurch ergibt sich bei Gleichstrombahnen ein hoher Kupferbedarf, der bei einem Querschnitt von 400 mm² pro 1 km Doppelgleis etwa 8 t ausmacht. Dennoch beträgt bei 3000 V und 1000 A der Spannungsabfall auf eine Entfernung von 10 km immer noch etwa 20 %, so daß es nicht ratsam ist, den Abstand der Unterwerke über 20···25 km hinaus zu steigern.

Ein weiterer Nachteil des Gleichstromsystems besteht darin, daß sich bei der Stromrückführung leicht sogenannte „vagabundierende Ströme" bilden, die außerhalb der Fahrschienen fließen und zu schweren Schäden an unterirdischen Kabeln und Rohrleitungen führen. Gegen diese elektrolytische Korrosion gibt es zwar eine Reihe von Gegenmaßnahmen, doch diese sind mit einem hohen Kostenaufwand verbunden.

Von den Gleichstrommotoren ist der Reihenschluß-Motor für Bahnzwecke besonders geeignet. Er arbeitet zuverlässig und erfordert niedrige Anschaffungs- und Unterhaltungskosten. Außerdem weist er ein kräftiges Anzugsmoment und eine mit steigender Belastung sinkende Drehzahl auf. Diese Eigenschaften besitzen zwar auch die anderen Elektromotorarten in mehr oder minder großem Maße, jedoch hat der Reihenschlußmotor den entscheidenden Vorteil, daß sein Drehmoment und somit auch die Zugkraft bis zu etwa einem Siebentel seiner Stundendrehzahl konstant bleiben. Daher kann es trotz natürlich sinkender Dreh-

zahl bzw. Fahrgeschwindigkeit kein unerwartetes Liegenbleiben auf der Strecke geben. Seine Leistung läßt sich jedoch nur durch Vorschalten von Widerständen bzw. durch Feldschwächung verändern, d. h. auch bei Anwendung der Reihen-Parallelschaltung ist seine Steuerung nur in zwei Dauerfahrstufen verlustlos. Die Kommutierung ist verhältnismäßig einfach und bereitet im Gegensatz zu Wechselstrommotoren keinerlei Schwierigkeiten. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Überlastbarkeit des Gleichstrommotors und die Möglichkeit der Stromrücklieferung beim elektrischen Bremsen.
Auch die Stromversorgung ist verhältnismäßig einfach, da sie kein eigenes Bahnstromnetz erfordert und bei Verwendung von Gleichrichtern direkt aus dem Landesnetz erfolgen kann. Bei Störungen ist es ohne weiteres möglich, mehrere Speiseabschnitte miteinander zu verbinden.
Das Gleichstromsystem ist daher zur Zeit in der ganzen Welt verhältnismäßig stark verbreitet und findet, wie aus Tafel 1 zu ersehen ist, bei mehr als 50 % aller elektrischen Bahnen Europas Anwendung. Mit einer Fahrdrahtspannung von 3000 V arbeiten die Eisenbahnen in der Sowjetunion, in der Volksrepublik Polen, in der Tschechoslowakischen Sozialistischen Republik, in Italien, Spanien, Belgien, Südafrika und Südamerika, während Gleichstrom von nur 1500 V Spannung die Bahnen in Frankreich, England, Indien, Holland und Japan verwenden. Außerdem werden in Deutschland die Stadtbahnen in Berlin und Hamburg und einige Nebenbahnen mit Gleichstrom von 600···1200 V betrieben.

1.22 Drehstrom

Um die Mängel des Gleichstromsystems zu vermeiden, führte man bereits seit dem Jahre 1891 umfangreiche Versuche mit Drehstrom durch. Dabei wurde der Strom im allgemeinen durch zwei voneinander isolierte Fahrleitungen und die Fahrschienen der Lokomotive zugeführt. Bei der Versuchsstrecke Marienfelde–Zossen wurden sogar drei Fahrleitungen verwendet, die übereinander seitlich vom Gleis angeordnet waren. Die Fahrdrahtspannung betrug hierbei, ebenso wie bei einer Fernbahn in Mittelitalien 10000 V, bei einem größeren Netz in Norditalien jedoch nur 3600 V. Da die komplizierte Fahrleitung an Kreuzungen und Weichen zu vielen betrieblichen Schwierigkeiten führte und die Unterhaltungskosten dementsprechend hoch waren, konnte sich dieses Stromsystem nicht durchsetzen.
Hinzu kommt, daß auch der Drehstrommotor mit seiner starren Drehzahlcharakteristik und mangelhaften Steuerbarkeit schwerwiegende Nachteile aufweist. Da er auch gegen Spannungsschwankungen sehr empfindlich ist und der zulässige Spannungsabfall 10···15 % der Nennspannung nicht übersteigen darf, sind große Fahrdrahtquerschnitte und geringe Unterwerksabstände erforderlich. Der Drehstrommotor ist daher trotz seines robusten, kommutatorlosen Aufbaues, seines geringen Gewichtes und seiner Verwendbarkeit für höhere Leistungen und Betriebsspannungen als Bahnmotor nicht recht geeignet.
Da das Drehstromsystem bei Talfahrten eine Stromrücklieferung in das Netz ermöglicht, versprach es auf steilen Alpenstrecken wirtschaftliche Vorteile. Es fand lange Zeit auf einigen italienischen Strecken Anwendung, doch konnte es sich auch hier wegen der zahlreichen Mängel nicht behaupten, so daß auch diese Bahnen neuerdings auf Gleichstrom mit 3000 V umgestellt werden.

1.23 Einphasen-Wechselstrom 16⅔ Hz

Günstigere Ergebnisse zeigten Versuche mit Einphasen-Wechselstrom, die um die Jahrhundertwende in Deutschland durchgeführt wurden. Diese Stromart übernimmt vom

Gleichstromsystem die einpolige Fahrleitung und den Kommutatormotor mit Reihenschlußcharakteristik. Sie ist ihm aber dadurch überlegen, daß die Fahrdrahtspannung bis auf 15000 V und mehr gesteigert werden kann. Bei diesen hohen Spannungen wird die von der elektrischen Lokomotive benötigte Leistung bei verhältnismäßig niedrigen Strömen übertragen, wodurch die Möglichkeit besteht, mit einem Fahrdrahtquerschnitt von nur 80···100 mm^2 auszukommen und den Abstand der Unterwerke auf 60···80 km und gegebenenfalls darüber zu steigern.

Im Stufentransformator der Lokomotive wird die Spannung dann auf eine zweckmäßige Motorspannung gesenkt, so daß es möglich ist, die Leistung der Fahrmotoren fast verlustlos zu steuern und somit die Geschwindigkeit der Lokomotive den jeweiligen Betriebsverhältnissen anzupassen.

Bei den Wechselstrom-Reihenschlußmotoren größerer Leistungen bereitete jedoch zunächst die Kommutierung gewisse Schwierigkeiten, besonders wenn der Landesstrom mit der üblichen Frequenz von 50 Hz verwendet werden sollte. Durch das wechselnde Magnetfeld im Motor entsteht nämlich unter anderem in der Erregerwicklung eine Selbstinduktionsspannung, die proportional der Windungszahl und der Frequenz ist. Um einen erträglichen Leistungsfaktor zu erzielen, mußte man also den Motoren eine schwache Erregung geben und die Frequenz so weit herabsetzen, wie das wegen der damit verbundenen Vergrößerung der Generatoren und Transformatoren vertretbar war. Andererseits durfte mit Rücksicht auf die Verwendung dieses Stromes für Beleuchtungszwecke die Frequenz auch nicht zu niedrig sein. Man legte daher zunächst eine Probestrecke mit einer Frequenz von $50/2 = 25$ Hz an und führte auch Versuche mit einer Frequenz von $50/3 = 16\frac{2}{3}$ Hz durch. Als diese besonders günstige Ergebnisse zeigten, kamen im Jahre 1912 die damaligen Staatsbahn-Verwaltungen von Preußen, Bayern und Baden überein, bei der Elektrifizierung weiterer Strecken in Zukunft einheitlich Einphasen-Wechselstrom mit einer Spannung von 15 kV und einer Frequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz zu verwenden. Sie schufen damit eine wichtige Voraussetzung für den späteren Zusammenschluß der einzelnen Bahnnetze.

Die Wechselstrommotoren arbeiten genauso zuverlässig wie die Gleichstrommotoren, sind diesen sogar noch aus Gründen, die in der Spannungsfestlegung bedingt sind, durch eine geringere Masse je Leistungseinheit überlegen. Neben der gleichartigen Charakteristik stimmen die Wechselstrommotoren auch hinsichtlich ihrer Unempfindlichkeit gegen Spannungsschwankungen mit den Gleichstrommotoren überein. Sie sind allerdings komplizierter im Aufbau und dadurch etwas teurer. Auch macht sich infolge der ungünstigeren Kommutierung öfter ein Überdrehen des Kommutators und ein Auswechseln der Bürsten erforderlich.

Ein weiterer Nachteil ist, daß man bei Einphasen-Wechselstrom niedrigerer Frequenz ein eigenes Bahnstromnetz und meist auch besondere Kraftwerke oder Umarterwerke oder zumindest eigene Bahnmaschinen in den Kraftwerken der Landesversorgung braucht (siehe Abschnitt 1.3).

Umfangreiche Versuche haben gezeigt, daß dieses Stromsystem mit einer Fahrdrahtspannung von 15 kV und einer Frequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz besonders für schweren Fernbahnbetrieb geeignet ist. Es hat sich in Deutschland, Norwegen, Schweden, Schweiz und Österreich bestens bewährt, so daß zur Zeit auf etwa einem Drittel sämtlicher elektrisch betriebener Eisenbahnstrecken Europas diese Stromart verwendet wird. Auch in den Vereinigten Staaten von Amerika werden mehrere stark belastete Bahnstrecken mit Einphasen-Wechselstrom niedriger Frequenz, jedoch mit 11 kV und 25 Hz betrieben.

1.24 Einphasen-Wechselstrom 50 Hz

Trotz der befriedigenden Ergebnisse mit Gleichstrom und Einphasen-Wechselstrom 16⅔ Hz fehlte es nie an Versuchen, den Industriestrom des Landesnetzes mit der Regelfrequenz von 50 Hz für Bahnzwecke zu verwenden. Bereits im Jahre 1904 baute die schweizerische Firma Oerlikon eine Probelokomotive, bei welcher der Einphasen-Wechselstrom von 50 Hz in einem auf der Lokomotive untergebrachten Motor-Generator in Gleichstrom umgeformt wurde. Auch die von dem ungarischen Ingenieur Kandó im Jahre 1917 entworfene elektrische Lokomotive, die mit einem Umformer zur Phasenspaltung und mit Drehstrommotoren arbeitete, lieferte günstige Betriebsergebnisse.

Im Jahre 1935 richtete dann die Deutsche Reichsbahn auf der Höllentalbahn im Schwarzwald einen Probebetrieb mit einer Fahrdrahtspannung von 22 kV ein, um auf dieser kurvenreichen und steilen Strecke (Steigungen bis 55‰, d. h. 1:18) die Brauchbarkeit des 50-Hz-Systemes für Bahnzwecke zu untersuchen. Zum Einsatz kamen vier elektrische Lokomotiven, die von den Firmen AEG (Betriebs-Nr. E 244 01), BBC (E 244 11), SSW (E 244 21) und Krupp (E 244 31) entwickelt worden waren. Sie ähnelten in ihrem Aufbau der Baureihe E 44 (siehe Bild 227), wichen in ihrer elektrischen Ausrüstung jedoch grundsätzlich voneinander ab (s. Abschnitt 5 und Anhang 5). Im Jahre 1950 lieferte die Firma AEG noch eine fünfte elektrische Lokomotive für die Höllentalbahn mit der Betriebs-Nr. E 244 22. Sämtliche Lokomotiven wurden unter schwierigsten Betriebsverhältnissen gründlich erprobt und bewiesen die grundsätzliche Brauchbarkeit des 50-Hz-Systemes, wenn ihnen auch noch eine Reihe von Mängeln anhafteten.

Auch in anderen Ländern wurden Großversuche mit Einphasen-Wechselstrom 50 Hz durchgeführt, so z. B. in Frankreich, in der Sowjetunion und in der Ungarischen Volksrepublik. Hierbei bewiesen elektrische Lokomotiven mit Quecksilberdampf-Gleichrichtern und Gleichstrommotoren, Lokomotiven mit 50-Hz-Einphasen-Reihenschluß-Kommutatormotoren und auch Periodenumformer-Lokomotiven mit Asynchronmotoren erneut die Vorteile des 50-Hz-Systems. Günstige Ergebnisse zeigten auch Versuche mit Ignitrons, die im Jahre 1931 erfunden, während des Krieges in Amerika weiterentwickelt und im Jahre 1949erstmalig in Triebfahrzeuge eingebaut wurden. Ignitrons sind einanodige Gleichrichter mit einer besonderen Zündeinrichtung, die den 50-Hz-Wechselstrom der Fahrleitung in Gleichstrom umwandeln (siehe Abschn. 5.32).

Für die Entwicklung der 50-Hz-Lokomotiven haben auch die neuesten Erfolge mit Halbleitergleichrichtern große Bedeutung. Wie umfangreiche Versuche beweisen, arbeiten diese bei geringer Masse und kleinem Platzbedarf äußerst betriebssicher und sind im Aufbau viel einfacher als die bisher verwendeten Einrichtungen. Recht zahlreich sind also die konstruktiven Möglichkeiten, die bei diesen „Umarter-Lokomotiven" bestehen, um den aus dem Fahrdraht entnommenen Einphasen-Wechselstrom mit 50 Hz durch Umformung in umlaufenden Aggregaten oder durch Umrichtung in ruhenden Einheiten für Bahnzwecke nutzbar zu machen. Die dann für den Antrieb verwendeten Drehstrom- oder Gleichstrommotoren zeigen in ihrer Charakteristik gewisse Vorteile und lassen je nach Aufbau der Lokomotive eine größere Anfahrleistung, eine geringere Masse des Motors, eine bessere Steuerbarkeit oder sonstige Vorzüge erkennen. Da diese jedoch durch einen wesentlich komplizierteren Aufbau der Lokomotive und demzufolge auch höhere Unterhaltungskosten erkauft werden müssen, konnte sich das 50-Hz-System bisher noch nicht allgemein durchsetzen und wird die Fachleute in aller Welt auch weiterhin vor schwierige Aufgaben stellen.

Dazu kommt noch, daß auch die Stromversorgung gewisse Schwierigkeiten bereitet, da *Drei*phasenstrom im Landesnetz zur Verfügung steht und *Ein*phasenstrom gebraucht wird. Die Einführung des 50-Hz-Systems erscheint daher vor allem in den Ländern angebracht, die über ein leistungsfähiges Drehstromnetz verfügen und überhaupt oder auf einem großen Teil ihres Eisenbahnnetzes den elektrischen Betrieb neu einrichten wollen.
Die Umstellung von einem anderen Stromsystem auf Einphasen-Wechselstrom 50 Hz kommt praktisch nur für solche Länder in Frage, bei denen das bisher angewendete System (z. B. Gleichstrom 1500 V) den erhöhten Anforderungen nicht mehr genügt. Wenn sich die Sowjetunion neuerdings dazu entschlossen hat, anstelle des bisherigen Gleichstromsystems in Zukunft Einphasenwechselstrom mit 25 kV und 50 Hz zu verwenden, so ist einer der bestimmenden Gründe hierfür, daß die Unterwerke gleichzeitig zur Versorgung der angrenzenden Gebiete und somit zur Elektrifizierung der Landwirtschaft dienen sollen.

1.25 Zusammenfassung

Vergleicht man die einzelnen Stromsysteme miteinander, so erkennt man, daß alle gewisse Vor- und Nachteile aufweisen und daß keines dabei ist, das sämtlichen Anforderungen entspricht. Man wird daher bei der Wahl der Stromart jeweils genau überprüfen müssen, welche Streckenverhältnisse vorliegen, wie groß die Verkehrsdichte ist und ob das Landesnetz genügend leistungsfähig ist, um auch die Stromversorgung der Eisenbahnen mit zu übernehmen. Auch darf man sich bei derartigen Überlegungen nicht nur von rein technischen Gesichtspunkten leiten lassen, sondern man muß auch volkswirtschaftliche Betrachtungen anstellen, da diese die Wahl des Stromsystems häufig entscheidend beeinflussen. Für Vollbahnen mittlerer Belastung kommen drei Stromsysteme in Frage, nämlich Gleichstrom, Einphasenwechselstrom 50 Hz und Einphasenwechselstrom 16⅔ Hz. Unterscheidet man beim 50-Hz-System noch zwischen den Direkt- und den Umarter-Lokomotiven und betrachtet man im Zusammenhang mit der Systemfrage nicht nur die elektrischen

	Energiebezug aus Landesnetz 50 Hz ≈ 110 kV						Bahneigenes Kraftwerk 16⅔ ≈ 110 kV
Anlage-Teil	Gleichstrom-Lok 3 kV		Kommut.-Lok 50 ≈	25 kV	Umf.-Lok 50 ≈	25 kV	Kommut.-Lok 16⅔ ≈	15 kV
Triebfahrzeuge	48,0	58	62,2	71,8	61,7	68,5	57,5	
Fahrleitungen	16,5	20	10,1	11,6	10,2	11,6	11,2	
Unterwerke	14,0	17	4,2	4,7	3,1	3,4	3,5	
Fernleitungen	1,6	2	1,4	1,6	1,5	1,7	1,6	
Kraftwerke	7,5	9	7,7	9,0	8,4	9,4	10,6	
Änderungs-Arb. u. a.	12,4	15	14,4	16,6	15,1	16,6	15,6	
zus	100 %		100 %		100 %		100 %	
bezogen auf 16⅔ Hz		121 %		115,3 %		111,2 %		100 %
— gegenüber 16⅔ Hz stark erhöhte Anlagekosten								

Bild 14. Anlagekosten für verschiedene Stromsysteme (nach Prof. H. Kuntze, Dresden)

Lokomotiven mit ihren Einrichtungen, sondern auch die gesamten dazugehörigen technischen Anlagen, d. h. Fahrleitungen, Unterwerke, Fernleitungen und Kraftwerke, so ergibt sich auf Grund einer von Prof. Kuntze, Dresden, im Jahre 1955 durchgeführten Untersuchung für ein bestimmtes Elektrifizierungsprojekt etwa folgende Aufteilung der gesamten Anlagekosten (Bild 14). Dabei sind die drei Stromsysteme mit Energiebezug aus dem Landesnetz dem $16\frac{2}{3}$-System mit bahneigenem Kraftwerk gegenübergestellt. Die linke Zahl läßt jeweils den prozentualen Anteil der Beschaffungskosten erkennen, während die rechte Zahl die im Vergleich zum $16\frac{2}{3}$-Hz-System entsprechend höheren Werte angibt. Besonders gekennzeichnet sind jene Zahlen, die wesentlich höher liegen als bei $16\frac{2}{3}$ Hz. Bei Gleichstrom sind das die Kosten für Fahrleitungen und Unterwerke, beim 50-Hz-System die Kosten der Triebfahrzeuge.

Im Gegensatz dazu zeigen neuere Untersuchungen der Hochschule für Verkehrswesen in Dresden, daß unter günstigen Voraussetzungen die Elektrifizierungskosten für 50 Hz etwas niedriger sind als die für $16\frac{2}{3}$ Hz.

Daraus geht hervor, daß bei Vollbahnen mit geringem bis mittelstarkem Verkehrsvolumen das 50-Hz-System gewisse Vorteile verspricht, da der wertmäßige Anteil der Fahrzeuge gegenüber den Kosten für Energieerzeugung und -verteilung in den Hintergrund tritt. Mit steigendem Verkehrsvolumen wächst jedoch der Wertanteil der Fahrzeuge, und die höhere Wirtschaftlichkeit liegt mehr auf der Seite des $16\frac{2}{3}$-Hz-Systems. Da dieses auch in technischer Hinsicht für schweren Vollbahnbetrieb am besten geeignet ist, liegt für die Deutsche Reichsbahn zunächst keine Veranlassung vor, das bisher im mitteldeutschen Raum verwendete Stromsystem umzustellen.

1.3 Stromversorgung

Die für den elektrischen Zugbetrieb benötigte Energie wird entweder in besonderen Bahnkraftwerken erzeugt oder aus dem öffentlichen Landesnetz bezogen. In diesem Falle ist es jedoch erforderlich, den Industriestrom zunächst noch in die für den Bahnbetrieb gewählte Stromart und Frequenz bzw. Phasenzahl umzuwandeln. Da in einem industrialisierten Land der Bahnbedarf nur etwa 5···8 % der gesamten Stromerzeugung beträgt, kann er im allgemeinen vom Landesnetz mit übernommen werden.

Da Wasserkraftwerke viel wirtschaftlicher sind als Wärmekraftwerke, ist das Vorhandensein ergiebiger Wasserkräfte für die Einführung des elektrischen Zugbetriebes von großer Bedeutung. Dampfkraftwerke sind nur wirtschaftlich, wenn billige Brennstoffe zur Verfügung stehen und durch keine allzu hohen Transportkosten verteuert werden.

Um Betriebsstörungen durch Stromausfall zu vermeiden, soll ein großes Bahnstromversorgungsnetz nach Möglichkeit von verschiedenartigen Stromquellen gespeist werden, d. h., es ist zweckmäßig, Wasserkraft-, Dampfkraft- und Umarterwerke zur Stromerzeugung heranzuziehen, die sich in wirtschaftlicher Weise gegenseitig ergänzen. So wurde z. B. bis zum Jahre 1945 der Strombedarf der Deutschen Reichsbahn zu 62 % aus Wasserkraftwerken, zu 6 % aus Dampfkraftwerken und zu 32 % aus Umarterwerken gedeckt.

1.31 Primärerzeugung von Bahnstrom

Als in Deutschland der elektrische Zugbetrieb aufgenommen wurde, war es erforderlich, die hierfür benötigte elektrische Energie in bahneigenen Kraftwerken zu erzeugen, da das

Landesnetz nicht über die erforderlichen Reserven verfügte. Als dann jedoch in den 30er Jahren für die allgemeine Landesversorgung ein weitverzweigtes Verbundnetz mit modernen Großkraftwerken zur Verfügung stand, konnte erstmalig die für Bahnzwecke benötigte Energie aus dem Drehstromnetz bezogen werden.

Zur Zeit wird das mitteldeutsche Eisenbahnnetz durch das Bahnkraftwerk Muldenstein versorgt. Es verfügt über drei Einphasen-Turbosätze und zwei Umformersätze 50 Hz/16⅔ Hz mit einer Gesamtleistung von 53,9 MW. Die Generatorspannung von 6 kV wird in den Kraftwerkstransformatoren auf eine Spannung von 60 bzw. 110 kV heraufgesetzt, um die Übertragungsverluste möglichst klein zu halten (Bild 15). Dann wird der Bahnstrom, d. h. Einphasenwechselstrom mit einer Frequenz von 16⅔ Hz, über ein eigenes Fernleitungsnetz

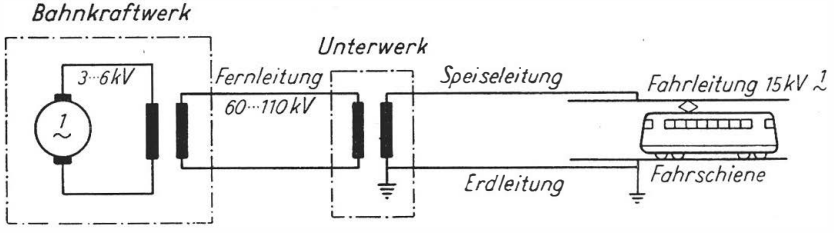


Bild 15. Stromverlauf bei Erzeugung von Einphasenwechselstrom im bahneigenen Kraftwerk

den Unterwerken zugeführt. Diese sind wieder mit Umspannern ausgerüstet, um die hohe Spannung der Fernleitungen auf die Fahrdrahtspannung von 15 kV herabzusetzen. Es ist darauf zu achten, daß die Frequenz von 16⅔ Hz mit einer Genauigkeit von ± 2 % eingehalten wird und daß auch nur geringe Spannungsschwankungen auftreten, da man sonst mit einer allzu starken Leistungsminderung und einem Versagen der Hilfsbetriebe rechnen muß. Vorteilhaft ist, daß für die gesamte Energieübertragung von den Klemmen der Generatoren im Kraftwerk bis zu den Klemmen der Fahrmotoren auf der Lokomotive keine einzige umlaufende Maschine verwendet wird.

Derartige Bahngeneratoren weisen infolge der einphasigen Wicklung eine schlechtere Materialausnutzung auf als 50-Hz-Generatoren, auch benötigen sie wegen der begrenzten Drehzahl ein Untersetzungsgetriebe zwischen Dampfturbine und Generator (3000: 1000 U/min). Außerdem sind 16⅔-Hz-Generatoren wesentlich schwerer und erfordern höhere Baukosten.

Andererseits besteht auch die Möglichkeit, den Energiebedarf der elektrischen Bahnen durch den Bau von Gemeinschaftskraftwerken zu decken. Diese besitzen außer den Generatoren für die Erzeugung des Landesstromes noch einige Bahngeneratoren. Die für den Antrieb erforderlichen Turbosätze erhalten den Dampf aus einer gemeinsamen Kesselanlage.

Auch ist es möglich, ein Kraftwerk mit Gemeinschaftsturbosätzen auszurüsten, die gleichzeitig Drehstrom mit 50 Hz und Einphasenwechselstrom mit 16⅔ Hz erzeugen. Beide Generatoren werden von einer gemeinsamen Turbine angetrieben. Da der Bedarf an Drehstrom im allgemeinen größer ist, empfiehlt es sich, Generatoren unterschiedlicher Leistung zu verwenden. Der Bahngenerator ist durch ein Getriebe und eine hydraulische Kupplung mit dem Drehstrom-Generator verbunden. Dadurch ist es möglich, die Abgabe an das Landesnetz bzw. an das Bahnstromnetz dem jeweiligen Bedarf anzupassen.

Bei allen drei bisher genannten Möglichkeiten der Stromversorgung sind die Verluste gering. Der Wirkungsgrad zwischen Abgang Kraftwerk und Abgang Unterwerk beträgt 93,1 %.

1.32 Sekundäre Stromversorgung über Umarterwerke

Neben dieser Primärerzeugung von Bahnstrom besteht noch die Möglichkeit, die für den elektrischen Zugbetrieb benötigte Energie aus dem Landesnetz zu beziehen und sie in besonderen Werken entsprechend ihrem Verwendungszweck umzuarten. Voraussetzung hierfür ist, daß das öffentliche Netz über entsprechende Reserven verfügt und der Strom jederzeit preisgünstig angeboten wird.

Verwendet man für dieses Umarten bewegte Maschinen, z. B. Motor-Generatoren, Einankerumformer oder dgl., so spricht man von Umformung. Diese Maschinen erfordern hohe Anlagenkosten, bedürfen einer ständigen Wartung und Unterhaltung und weisen besonders bei Teillast einen ungünstigen Wirkungsgrad auf.

Vorteilhafter ist das Umarten mit Hilfe von ruhenden Elementen, wie Quecksilberdampfgefäßen, Ignitrons oder dergleichen. Dieses Verfahren bezeichnet man mit Umrichten. Besondere Bedeutung kommt neuerdings den Halbleiter-Gleichrichtern zu, die auf Germanium- oder Siliziumbasis arbeiten (siehe Abschnitt 5.3). Diese Anlagen sind jedoch zur Zeit noch nicht ausgereift, auch liegen bisher noch keine umfassenden Betriebserfahrungen vor.

Um den ständig steigenden Strombedarf der elektrischen Bahnen decken zu können, wird die Deutsche Reichsbahn in Kürze zur gemischten Energieversorgung übergehen, d. h., den Strom zum Teil in bahneigenen Kraftwerken zu erzeugen und zum anderen Teil über Umarter aus dem Landesnetz zu beziehen.

Bei Gleichstrombahnen ist die primäre Stromerzeugung im allgemeinen nicht üblich, und man bevorzugt die sekundäre Stromversorgung über Umarterwerke.

Am einfachsten ist die Energieversorgung der Bahnen, die mit Einphasenwechselstrom und einer Frequenz von 50 Hz arbeiten. Die Fahrleitung kann dann, ähnlich wie bei 16⅔ Hz, über Transformatoren direkt an das öffentliche Landesnetz angeschlossen werden. Dadurch liegen die Kosten für die Stromversorgung sehr niedrig und rechtfertigen die bei diesem Stromsystem meist wesentlich höheren Anschaffungs- und Unterhaltungskosten der Lokomotiven.

Die Belastung des Netzes ist allerdings einphasig, was zu gewissen Schwierigkeiten führen kann. Diese entstehen dadurch, daß das Landesnetz Dreiphasenstrom (Drehstrom) liefert, während der Bahnbetrieb Einphasenstrom benötigt. Da es jedoch kaum möglich ist, die Einphasenentnahme so auf das Drehstromnetz zu verteilen, daß eine gleichmäßige Belastung aller drei Phasen erreicht wird, entsteht eine „Netzunsymmetrie", die sich leistungsmindernd auf die anderen an das betroffene Drehstromnetz angeschlossenen Verbraucher auswirkt, sobald der Strombedarf der Eisenbahn mehr als ein Drittel der Gesamtleistung ausmacht. Hinzu kommt noch, daß es infolge der Phasenaufteilung erforderlich ist, die Fahrleitung in einzelne Streckenabschnitte zu unterteilen.

1.33 Stromzuführung

Bei sämtlichen Stromsystemen haben die Unterwerke nicht nur den Zweck, die hohe Übertragungsspannung auf die Fahrdrahtspannung herabzusetzen, sondern sie sind zugleich Schaltstellen für die gesamten Fahrleitungsanlagen. Die Fahrleitungen haben die Aufgabe,

den Lokomotiven die elektrische Energie auch bei hohen Geschwindigkeiten strörungsfrei zuzuführen. Dies ist jedoch nur bei ebener Fahrdrahtlage möglich, die durch die heute allgemein übliche Vielfach- oder Kettenaufhängung weitgehend erreicht wird. Dabei ist der Fahrdraht mit Hängern an einem Tragseil aufgehängt, das aus verzinktem Stahl oder Bronze besteht. Der Fahrdraht wird auf geraden Streckenabschnitten im Zickzack geführt, um eine Rillenbildung im Schleifstück des Stromabnehmers zu vermeiden. Damit auch bei wechselnden Temperaturen eine einwandfreie Fahrdrahtlage erreicht wird, spannt man den Fahrdraht und das Tragseil durch Spanngewichte nach.

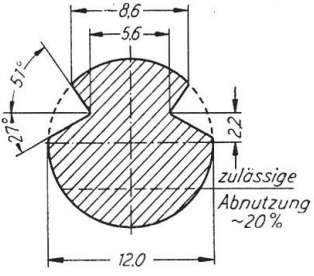


Bild 16. Fahrdrahtquerschnitt

Der allgemein übliche Rillenfahrdraht besteht aus hart gezogenem Elektrolytkupfer, sein Querschnitt ist aus Bild 16 zu erkennen. Er beträgt bei Hauptgleisen 100 mm² und bei Nebengleisen 80 mm². Versuche mit Stahl-Aluminium-Fahrdraht zeigten bisher im Dauerbetrieb keine günstigen Ergebnisse. Die Fahrleitungsmaste werden als Stahlmaste oder neuerdings auch aus Stahl- und Spannbeton hergestellt. Die Verluste, die bei der Stromverteilung auftreten, betragen etwa 7···9 % der übertragenen Energiemengen.

1.4 Vergleich des elektrischen Zugbetriebes mit Dampfbetrieb

Ein moderner wirtschaftlicher Eisenbahnbetrieb bedingt eine Strukturwandlung auf dem Gebiet der Zugförderung, d. h. eine Umstellung des bisherigen Dampfbetriebes auf elektrischen Zugbetrieb oder Dieselbetrieb. Alle drei Zugförderungsarten sind ausgereift und betriebssicher; ihnen fallen nach den jeweiligen örtlichen Betriebs- und Streckenverhältnissen ganz bestimmte Aufgabengebiete zu.

Der Betrieb mit schweren Diesellokomotiven hatte wegen der hohen Treibstoffkosten und auch wegen einiger konstruktiver Schwierigkeiten bei der Deutschen Reichsbahn bisher nur eine untergeordnete Bedeutung, so daß für diese Traktionsart zur Zeit auch noch keine umfassenden Betriebserfahrungen vorliegen.

Es soll daher zunächst der Dampfbetrieb mit dem elektrischen Zugbetrieb verglichen werden, der sich auch bei der Deutschen Reichsbahn seit vielen Jahren bestens bewährt hat und dem auch bei der Rekonstruktion des Eisenbahnwesens eine ganz besondere Bedeutung zukommt.

1.41 Vorteile des elektrischen Zugbetriebes

Bei diesen Betrachtungen soll nach energetischen, betrieblichen, betriebswirtschaftlichen und sonstigen Vorteilen unterschieden werden. Stellt man diese den Nachteilen des elektrischen Zugbetriebes gegenüber, so erhält man ein klares Bild, unter welchen Verhältnissen die Elektrifizierung einer Strecke zu empfehlen ist.

1.411 Energetische Vorteile

Der Rohstoff Kohle als Energieträger des Dampfbetriebes wird zur Zeit nicht nur immer knapper und damit teurer, sondern er wird auch volkswirtschaftlich immer wertvoller.

Während der Veredelung dieses wichtigen Rohstoffes durch Verkokung usw. eine besondere Bedeutung zukommt, ist seine Verbrennung im Lokomotivkessel mit einem sehr schlechten thermischen Wirkungsgrad nicht mehr zu verantworten. Nur etwa 6···8 % der mit der Kohle zugeführten Energie können am Zughaken nutzbar gemacht werden. Außerdem ist die Leistung der Dampflokomotive von der Wärmeerzeugung in der Feuerbüchse, d. h. von der Kohlengüte und der körperlichen Leistungsfähigkeit des Heizers abhängig. Im Gegensatz dazu entnimmt die elektrische Lokomotive ihre gesamte Energie dem Fahrdraht, so daß derartige Einschränkungen nicht bestehen. Auch der Gesamtwirkungsgrad, gerechnet vom Kraftwerk bis zum Zughaken der elektrischen Lokomotive, liegt bedeutend höher.

Der Wirkungsgrad eines modernen Kraftwerkes, der sich im einzelnen aus dem Kesselwirkungsgrad, dem thermischen Wirkungsgrad der Dampfausnutzung, dem Turbinen- und Generator-Wirkungsgrad und dem Umspanner-Wirkungsgrad unter Abzug des Anteils der Hilfsbetriebe zusammensetzt, beträgt je nach Größe und Einrichtung etwa 25···35 %. Berücksichtigt man die Verluste, die bei der Energieübertragung entstehen, und zwar

Fernleitungsverluste	3 %
Unterwerksverluste einschließlich Eigenverbrauch	2···3 %
Fahrleitungsverluste	2···3 %
insges.	7···9 %,

so ergibt sich für die Energieübertragung ein Gesamtwirkungsgrad von 91···93 %.

Außerdem muß man noch den Wirkungsgrad der elektrischen Triebfahrzeuge berücksichtigen. Für die größte Stundenleistung, die normalerweise bei etwa 75···80 % der Fahrzeughöchstgeschwindigkeit erreicht wird, rechnet man mit folgenden Werten:

Wirkungsgrad des Transformators . . .	97,7 %
Wirkungsgrad der Fahrmotoren . . .	91···93 %
Wirkungsgrad der Getriebe	95···96 %
Wirkungsgrad Rad/Schiene	98 %
insges.	83···85 %.

Für die Hilfs- und Nebeneinrichtungen sind etwa 3···4 % der installierten Leistung abzurechnen, so daß der Wirkungsgrad einer elektrischen Lokomotive, bezogen auf die Stundenleistung, ungefähr 80···82 % beträgt. Von einem Triebfahrzeug wird jedoch nicht immer die volle Leistung verlangt. Bei der halben Stundenleistung, also bei kleinerem Strom, sinkt der Wirkungsgrad wegen der bei der Entlastung ansteigenden Drehzahl und den damit anwachsenden Eisenverlusten auf etwa 72 % und bei einem Drittel auf etwa 70 % ab, so daß über den gesamten Belastungsbereich mit einem mittleren Wirkungsgrad von 70···75 % gerechnet werden kann.

$$\begin{aligned} \eta_{ges.} &= \eta_{Dampfkraftwerk} \times \eta_{Energieübertragung} \times \eta_{Triebfahrzeug} \\ &= (0{,}25 \cdots 0{,}35) \times (0{,}91 \cdots 0{,}93) \times (0{,}70 \cdots 0{,}75) \\ &= 0{,}159 \cdots 0{,}244 \end{aligned}$$

Somit ergibt sich für den elektrischen Zugbetrieb eine thermische Kohlenausnutzung von Bei Strombezug aus einem Wärmekraftwerk kann also im Mittel mit einem Gesamt-

wirkungsgrad von etwa 20 % gerechnet werden. Wird die Energie jedoch aus einem Wasserkraftwerk bezogen, dann liegt der Gesamtwirkungsgrad selbst bei Annahme eines relativ geringen Turbinenwirkungsgrades bei etwa 50 %. Vergleicht man damit den Gesamtwirkungsgrad bei Dampflokomotivbetrieb, so ergibt sich, daß sogar in Ländern, in denen keine Wasserkräfte zur Verfügung stehen, 60···70 % des bisherigen Brennstoffbedarfes durch Elektrifizierung eingespart werden können. Daß es sich hierbei um ganz beträchtliche Mengen handelt, geht am besten daraus hervor, daß z. B. in der Sowjetunion der Brennstoffbedarf der Eisenbahnen annähernd 30 % der gesamten Kohlenförderung beträgt und bei der Deutschen Reichsbahn etwa 9 Millionen t Braunkohlenbriketts pro Jahr verbraucht werden. Untersuchungen in Ländern, in denen bereits ein großer Teil der vorhandenen Strecken elektrisch betrieben wird, haben je Streckenkilometer eine jährliche Einsparung von etwa 430···500 t Steinkohle ergeben. Man kann also durch die Elektrifizierung sehr beachtliche Kohlenmengen für andere Zwecke einsparen, was auch für die Deutsche Demokratische Republik von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung ist.

Doch nicht nur in bezug auf die Kohlenmenge, auch hinsichtlich der Güte der Brennstoffe bietet der elektrische Zugbetrieb mancherlei Vorteile. Während man mit Rücksicht auf die hohe Kesselbeanspruchung auf der Dampflokomotive nur hochwertige Brennstoffe, d. h. Steinkohlen oder Braunkohlenbriketts verfeuern kann, ist in einem stationären Kraftwerk auch die Verwendung von Brennstoffen mit geringem Heizwert und feiner Körnung möglich. Von den bisher im Dampflokomotivbetrieb verfeuerten hochwertigen Brennstoffen werden also große Mengen für eine wirtschaftlichere Ausnutzung frei.

Berücksichtigt man ferner, daß die Kohlenvorräte infolge des ständig steigenden Abbaues in absehbarer Zeit zur Neige gehen und eine allmähliche Umstellung auf Kernenergie erfolgen wird, so fällt auch hier die Entscheidung zugunsten des elektrischen Zugbetriebes aus. Bei Atomlokomotiven bisheriger Konstruktion besteht nämlich der Nachteil, daß der Kernreaktor mit seinem Panzer ungewöhnlich schwer wird und sehr viel Platz beansprucht, so daß er auf einem Triebfahrzeug mit der üblichen Spurweite nur schwierig unterzubringen ist. Es erscheint daher zweckmäßiger, die Kernenergie in stationären Kraftwerken zur Stromerzeugung zu verwenden und auf elektrischen Zugbetrieb überzugehen.

1.412 Betriebliche Vorteile

Vergleicht man die Leistungseigenschaften einer Dampflokomotive mit dem Betriebsverhalten einer elektrischen Lokomotive entsprechender Größe, so ergeben sich recht beachtliche Unterschiede. Für diese Gegenüberstellung seien eine Zweizylinder-Heißdampf-Schnellzuglokomotive der Baureihe 01 und eine elektrische Lokomotive der Baureihe E 04 ausgewählt. Ihre wichtigsten Daten sind:

		Dampflokomotive BR 01	elektrische Lokomotive BR E 04
Achsfolge		2′ C 1′[1])	1′ Co 1′
Masse der betriebsfähigen Lokomotive	t	172,7[2])	92,0
Reibungslast	Mp	59,2	61,4
V_{max}	km/h	120,0	130,0

[1]) Erläuterung siehe Abschnitt 1.5.
[2]) Einschließlich Tender bei $^1/_3$ Vorräten.

Während die Leistung einer Dampflokomotive nicht nur von den Abmessungen der Dampfmaschine, sondern auch von der Reibungslast der Lokomotive und der Leistungsfähigkeit des Kessels abhängt und selten mehr als 1500 kW beträgt, erreichen elektrische Lokomotiven ohne Schwierigkeiten Dauerleistungen von 3000 ··· 4000 kW, in Ausnahmefällen sogar 10000 kW und mehr, da sie ihre Antriebsenergie in praktisch unbegrenzter Höhe aus dem Fahrdraht beziehen.

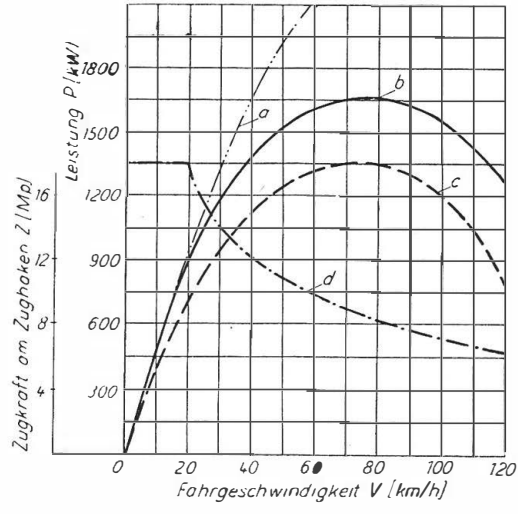


Bild 17
Leistungsschaubild einer Dampflokomotive

a Haftwertgrenzleistung
b indizierte Leistung
c effektive Leistung
d Zugkraft am Zughaken

Bild 17 läßt erkennen, daß bei einer Dampflokomotive die indizierte Leistung zunächst entsprechend der Haftwertgrenzleistung steil ansteigt, später mit Rücksicht auf die begrenzte Kesselleistung etwas zurückbleibt, bis sie dann bei einer Geschwindigkeit von etwa 75 km/h steil abfällt, was durch die starke Drosselung des Dampfes in den Dampfkanälen bei hohen Geschwindigkeiten bedingt ist.

Da der Leistungsbedarf, der zur Überwindung der Getriebereibung und des Laufwiderstandes benötigt wird, mit zunehmender Geschwindigkeit stark ansteigt, bleibt die am Zughaken abgegebene effektive Leistung bei hohen Geschwindigkeiten hinter der indizierten Leistung stark zurück.

In dieser Hinsicht ist die elektrische Lokomotive der Dampflokomotive weit überlegen; denn sie bezieht ihre Antriebsenergie in praktisch unbegrenzter Menge aus dem Fahrdraht (Bild 18). Wie aus dem Abschnitt 3.54 und Bild 177 hervorgeht, liegt ihre Anfahrleistung noch weit über der Dauerleistung, so daß die Haftreibung voll ausgenutzt werden kann. Der Leistungsunterschied zwischen Dampflokomotive und elektrischer Lokomotive ist durch Schraffur gekennzeichnet, so daß die Überlegenheit der elektrischen Lokomotive deutlich erkennbar ist.

Dabei ist zu beachten, daß die Dampflokomotive ihren Energieerzeuger, den Dampfkessel, sowie die notwendigen Vorräte an Kohle und Wasser ständig mit sich führt. Dadurch wird die tote Masse, die außerhalb der nutzbaren Reibungslast mitgeschleppt werden muß, stark erhöht. Sie verteilt sich auf die Lauf- und Tenderachsen, beträgt bei den Dampflokomotiven

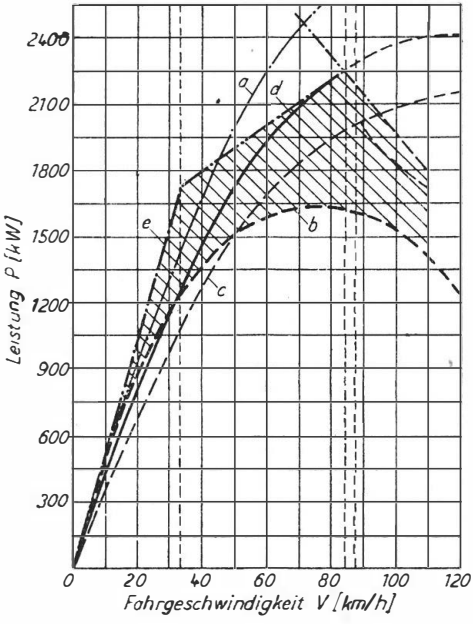


Bild 18
Vergleich der Leistungskennlinien einer Dampflokomotive (Baureihe 01) und einer elektrischen Lokomotive (Baureihe E 04)

a Haftwertgrenzleistung
b indizierte Leistung der Dampflokomotive
c Dauerleistung der elektrischen Lokomotive
d Stundenleistung der elektrischen Lokomotive
e Anfahrleistung der elektrischen Lokomotive

der Baureihe 01 insgesamt 113,5 t und macht somit etwa zwei Drittel der Masse der betriebsfähigen Lokomotiven aus.

Die elektrische Lokomotive braucht keine Betriebsvorräte mitzuschleppen und wird bei Anwendung der modernen Leichtbauweise und Schweißtechnik so leicht ausgeführt, daß sie ohne Laufachsen auskommt. Daher ist auch die Masse einer elektrischen Lokomotive nur etwa halb so groß wie die einer Dampflokomotive vergleichbarer Größe, und es können anstelle des schweren Tenders ein oder mehrere Wagen mit Nutzlast befördert werden. Die je Leistungseinheit aufzuwendende Masse, d. h. die Masse der betriebsfähigen Lokomotive in t im Verhältnis zur Dauerleistung in kW, beträgt bei Dampflokomotiven einschließlich Tender etwa 100···120 kg/kW, bei einer elektrischen Lokomotive dagegen nur 20···40 kg/kW.

Die höhere Leistung der elektrischen Triebfahrzeuge wirkt sich besonders durch eine bedeutend größere Anfahrbeschleunigung aus, die auch dem Reisenden angenehm auffällt. Um einen Zug mit einer Masse von 500 t, das sind etwa 12 D-Zug-Wagen, in der Ebene vom Stillstand auf eine Geschwindigkeit von 120 km/h zu beschleunigen, benötigt zum Beispiel eine elektrische Lokomotive der Baureihe E 18 nur eine Strecke von 4,7 km und eine Zeit von 4,3 Minuten. Die hohe Leistung und Überlastbarkeit der elektrischen Lokomotiven kommen außerdem durch eine große Bergfreudigkeit zum Ausdruck, so daß auch bei großen Steigungen meist auf eine Vorspann- oder Schiebelokomotive verzichtet werden kann. So beförderte zum Beispiel die E 18 einen Zug mit einer Masse von 360 t auf der etwa 13 km langen Steilrampe bei Probstzella (Steigung 1:40) mit einer Fahrgeschwindigkeit von 90···95 km/h.

Die Umstellung auf elektrischen Zugbetrieb ermöglicht also eine wesentlich höhere Reisegeschwindigkeit, besonders bei Gebirgsstrecken und auf ebenen Strecken mit kurzer Haltestellenentfernung. Auf Grund von Erfahrungen rechnet man im Personenverkehr mit einer Erhöhung der Reisegeschwindigkeit um etwa 25 % und im Güterverkehr um etwa 40 %. Daraus ergibt sich eine erhebliche Steigerung der Verkehrsdichte und damit der Durchlaßfähigkeit der Strecken ohne Erweiterung der vorhandenen Gleisanlagen.

Zugunsten der elektrischen Lokomotive spricht auch, daß sie jederzeit betriebsbereit ist und vor und nach der Fahrt nur eine kurze Rüstzeit benötigt, während jede Dampflokomotive vor Inbetriebnahme mehrere Stunden für das Anheizen und nach der Fahrt eine längere Zeit für das Wassernehmen, Bekohlen, Ausschlacken, Drehen usw. braucht. Auch der etwa alle zwei bis drei Wochen durch das Auswaschen des Kessels bedingte Ausfall der Dampflokomotive tritt bei elektrischen Lokomotiven nicht auf, so daß hier der Ausnützungsfaktor und somit auch die jährliche Laufleistung viel höher liegen. So ist es auch verständlich, daß man bei Einführung des elektrischen Zugbetriebes mit einer bedeutend geringeren Anzahl von Lokomotiven auskommt. Nach Erfahrungswerten genügen anstelle von 10 Dampflokomotiven etwa 6 elektrische Lokomotiven, bei gebirgigen Strecken und guter Auslastung der elektrischen Lokomotiven liegt das Verhältnis sogar noch bedeutend günstiger.

Während die Laufleistung einer Dampflokomotive durch die Menge der mitgeführten Betriebsstoffe begrenzt ist, sind bei der elektrischen Lokomotive wirtschaftliche Langläufe möglich ohne zeitraubenden Lokomotivwechsel und ohne betriebsbelastende Rangierfahrten. Auch kann man mit nur wenigen universell verwendbaren Lokomotivtypen auskommen, wodurch die Beschaffung wesentlich vereinfacht und eine wirtschaftliche Lokomotivkupplung erreicht wird. Durch Einbau einer Mehrfachsteuerung besteht bei modernen elektrischen Lokomotiven die Möglichkeit, mehrere Einheiten von *einem* Führerstand aus zu bedienen oder bei Zugwendebetrieb die Zuglokomotive am hinteren Ende des Zuges zu belassen und von einem Steuerabteil an der Spitze des Zuges aus zu bedienen. Von Vorteil ist dabei, daß elektrische Lokomotiven meist symmetrisch aufgebaut sind und somit in beiden Fahrtrichtungen gleich gute Laufeigenschaften zeigen, also nicht gedreht zu werden brauchen. Erwähnt sei noch, daß die elektrische Lokomotive bei starker Kälte eine größere Betriebssicherheit aufweist und daß auch die elektrische Zugheizung im Vergleich zur Dampfheizung nicht einfrieren kann.

1.413 Betriebswirtschaftliche Vorteile

Umfangreiche und einen längeren Zeitraum umfassende Untersuchungen verschiedener Eisenbahnverwaltungen haben bestätigt, daß die Zugförderungskosten bei elektrischem Zugbetrieb wesentlich geringer sind als bei Dampfbetrieb. Sie betragen bei der Deutschen Reichsbahn nur etwa 50 % der Kosten, die bei Dampfbetrieb anfallen. Doch nicht nur im Betrieb, auch in der Werkstatt ist eine elektrische Lokomotive wesentlich billiger und benötigt nur etwa 50···60 % der Unterhaltungskosten einer Dampflokomotive.

Da der Brennstoffbedarf eines Kraftwerkes viel gleichmäßiger ist als der einer Dampflokomotive, kann man im stationären Betrieb eine mechanische Feuerung verwenden, den Heizer also von der schweren körperlichen Anstrengung entlasten und somit den Anteil der körperlichen Arbeit am Arbeitsprodukt wesentlich verringern. Daher ist auch für das Fahrpersonal der Dienst auf einer elektrischen Lokomotive viel angenehmer und gesünder,

während es sonst der Strahlungswärme des Kessels und den Witterungseinflüssen ausgesetzt ist.
Da bei einer elektrischen Lokomotive kein Kessel die Sicht behindert und der Lokomotivführer die ganze Strecke übersehen kann, ist bei Geschwindigkeiten bis 90 km/h sogar Einmann-Bedienung möglich, vorausgesetzt, daß eine Sicherheitsfahrschaltung (siehe Abschnitt 3.77) vorhanden ist, die bei Dienstunfähigkeit des Lokomotivführers den Zug selbsttätig zum Halten bringt. In Verbindung mit den bereits genannten betrieblichen Vorteilen, wie z. B. höhere tägliche Laufleistungen, Verkürzung der Rüstzeit usw., ergibt sich eine recht beachtliche Personaleinsparung.
Als weiterer Vorteil der elektrischen Lokomotiven sei noch erwähnt, daß kein Funkenflug mehr vorhanden ist, der Feld- und Waldbrände verursachen könnte. Die bisher als Entschädigung gezahlten Beträge werden eingespart. Auch die Verschmutzung des Schotterbettes entfällt, die laufend große Ausgaben für die Instandsetzung des Oberbaues erforderte.
Die elektrische Lokomotive schont die Gleisanlagen durch bessere Bogenläufigkeit und Wegfall des mangelhaften Massenausgleichs der schweren hin- und hergehenden Triebwerksteile. Durch Anwendung der elektrischen Bremsung kann man die Radreifen schonen und in großem Umfang Bremsklötze einsparen (siehe Abschnitt 3.6). Unter gewissen Umständen ist sogar Nutzbremsung möglich, d. h. Stromrücklieferung in das Netz, was sich besonders bei längeren Talfahrten sehr wirtschaftlich auswirkt.
Es sei auch erwähnt, daß bei Umstellung auf elektrischen Zugbetrieb ein großer Teil der vorhandenen Lokomotivbekohlungsanlagen, z. B. Kohlenkräne, Kohlenbansen, Schlackengruben, Wasseraufbereitungsanlagen usw. entfallen kann, wodurch beträchtliche Mittel eingespart werden. Außerdem erübrigen sich die umfangreichen Transporte an Lokomotivkohle von der Grube zu den einzelnen Bahnbetriebswerken. Dadurch werden die Strecken entlastet und zahlreiche Güterwagen für andere Zwecke frei.

1.414 Sonstige Vorteile

Außer den obengenannten energetischen, betrieblichen und betriebswirtschaftlichen Vorteilen gibt es noch andere Punkte, die zugunsten des elektrischen Zugbetriebes sprechen. So werden z. B. Reisende und Anlieger nicht mehr durch Qualm und Ruß belästigt. Da auch die Korrosion an den Stahlbauten stark zurückgeht, behalten die Bahnhofshallen und der Wagenpark längere Zeit ein freundliches und verkehrswerbendes Aussehen. Wichtig ist auch, daß es bei elektrischem Zugbetrieb keine Rauchgase gibt, die bei Dampfbetrieb häufig das Lokomotivpersonal am rechtzeitigen Erkennen der Signale hindern und besonders in langen Tunneln recht störend wirken. Daß eine elektrische Lokomotive auch bei großer Leistungsabgabe weniger Lärm verursacht, wird von den Anliegern besonders in Großstädten und engen Gebirgstälern angenehm empfunden und erleichtert auch dem Lokomotivpersonal die Aufnahme akustischer Signale.

1.42 Nachteile des elektrischen Zugbetriebes

Diesen zahlreichen und teils recht beachtlichen Vorteilen stehen jedoch auch einige schwerwiegende Nachteile gegenüber, auf die es zurückzuführen ist, daß die meisten Länder bisher nur einen kleinen Teil ihres Streckennetzes elektrifiziert haben. Hier sind zunächst die hohen Anlagekosten zu nennen, die bei Umstellung einer vorhandenen Strecke auf elek-

trischen Betrieb anfallen. Außer den Errichtung von Kraft- und Unterwerken und dem Bau von Fern- und Fahrleitungen erfordert das vergrößerte Lichtraumprofil die Veränderung zahlreicher Brücken, Tunnel und sonstiger ortsfester Anlagen. Hinzu kommen die Beschaffungskosten für neue Triebfahrzeuge, die etwa das 1,7- bis 2fache einer Dampflokomotive vergleichbarer Größe betragen. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß bei Elektrifizierung einer Strecke die vorhandenen Schwachstrom-Freileitungen der Fernmeldeanlagen derart gestört werden, daß man Kabel verwenden muß. Die Gesamtkosten, die bei Elektrifizierung einer bisher dampfbetriebenen Strecke anfallen, sind also ungewöhnlich hoch. Sie betragen, wenn man die Erfahrungen verschiedener mitteleuropäischer Bahnen zugrunde legt, bei Umstellung eines Netzes mittlerer Größe auf Einphasen-Wechselstrom 15 kV, 16⅔ Hz annähernd eine Million DM pro Streckenkilometer.
Legt man einen Energieverbrauch von etwa 700···1000 MWh je Streckenkilometer und Jahr zugrunde, so gliedern sich bei Einphasen-Wechselstrom 16⅔ Hz die Gesamtkosten wie folgt:

Stromversorgung im Kraftwerk . . .	10···15 %
Fernleitungen	1··· 3 %
Unterwerke	3··· 5 %
Fahrleitungen	9···12 %
Elektrische Triebfahrzeuge	50···60 %
Sicherungs- und Fernmeldeanlagen .	4··· 7 %
Profilfreimachung	3··· 6 %
Licht- und Kraftanlagen	1··· 2 %
Werkstattänderung	2··· 4 %
Allgemeine Kosten	4 %
	100 %

Aus Abschnitt 1.2 ist bereits bekannt, daß bei Einphasen-Wechselstrom 50 Hz die Triebfahrzeuge teurer, die Kraft- und Unterwerke jedoch billiger werden. Im Gegensatz dazu sind bei Gleichstrombahnen die Anschaffungskosten für die Lokomotiven niedriger und die Kosten für die Unterwerke und Fahrleitungen beträchtlich höher.
Ein weiterer Nachteil des elektrischen Zugbetriebes ist noch, daß die elektrischen Lokomotiven nicht überall eingesetzt werden können und stets von den Fahrleitungen abhängig sind, die recht häufig das Landschaftsbild beeinträchtigen. Da meist nur wenige Strecken elektrisch betrieben werden, sind Umleitungen bei Betriebsunregelmäßigkeiten meist recht schwierig und wenn nicht mehrere Dampf- oder Diesellokomotiven als Reserve zur Verfügung stehen, ruht bei Stromausfall der gesamte Zugbetrieb.
Auch ist es erforderlich, die auf elektrischen Strecken verkehrenden Reisezugwagen zusätzlich mit elektrischer Heizung auszurüsten. Zum Schluß sei noch auf die erhöhte Unfallgefahr hingewiesen, die besonders bei gleichzeitigem Dampfbetrieb zu beachten ist und schon manches Opfer gefordert hat (siehe Abschnitt 8.5).

1.43 Auswertung

Stimmt man nun die Vor- und Nachteile miteinander ab, so erkennt man, daß eine Elektrifizierung nicht für jede beliebige Strecke in Frage kommt. Die Kosten für die Umstellung eines bereits vorhandenen Streckennetzes sind derart hoch, daß sie sich nur bei einer dicht

befahrenen und entsprechend stark belasteten Strecke bezahlt machen. Als „elektrifizierungswürdig" bezeichnet man eine Strecke, wenn ihr Energieverbrauch größer ist als 250···300000 kWh/Streckenkilometer und Jahr. Dieser Verbrauch wird jedoch erst bei einer täglichen Streckenbelastung von 30···35000 Bruttotonnen, in beiden Richtungen zusammengenommen, erreicht. Diese entspricht etwa 6 Schnellzügen, 15 Personenzügen und ungefähr 20 Güterzügen mittlerer Auslastung. Sind jedoch starke Steigungen zu überwinden oder stehen Wasserkräfte zur Verfügung, so ist die Elektrifizierung eines Streckenabschnittes schon bei geringerer Belastung gerechtfertigt.
Vom betrieblichen und wirtschaftlichen Standpunkt aus betrachtet kommt man also zu der Erkenntnis, daß sich der elektrische Zugbetrieb für stark belastete oder gebirgige Strecken eignet und besonders wirtschaftlich ist in Gegenden, in denen billige Brennstoffe oder Wasserkräfte zur Verfügung stehen.

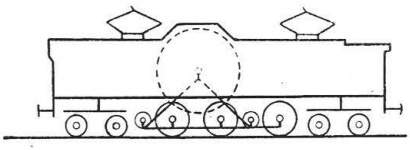
1.5 Einteilung und Bezeichnung der elektrischen Lokomotiven

Sämtliche elektrische Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn und der Deutschen Bundesbahn sind durch den Buchstaben E gekennzeichnet und nach Stromart und Gattung eingeteilt. Ähnlich wie bei Dampflokomotiven verwendet man für ihre Numerierung Betriebsnummern, die sich aus einer Stamm- und einer Ordnungsnummer zusammensetzen. Aus der Stammnummer konnte man anfangs, genau wie bei Dampflokomotiven, die Hauptgattung erkennen, und zwar führten

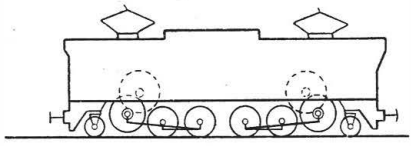
Schnellzuglokomotiven mit $V_{max} > 90$ km/h	die Stamm-Nr. 01···29,
Personenzuglokomotiven mit V_{max} zwischen 70 und 90 km/h	die Stamm-Nr. 30···59
und Güterzuglokomotiven mit $V_{max} < 70$ km/h	die Stamm-Nr. 60···99.

Diese Einteilung wird jedoch zur Zeit nicht mehr streng eingehalten, da neue elektrische Lokomotiven im allgemeinen als Universallokomotiven gebaut werden, d. h. für die Beförderung von Schnellzügen, Personen- und Güterzügen gleichermaßen geeignet sind und außerdem im allgemeinen eine Höchstgeschwindigkeit von mehr als 90 km/h besitzen.
Elektrische Lokomotiven, die mit Einphasen-Wechselstrom und einer Frequenz von 16⅔ Hz betrieben werden, haben stets eine zweistellige Stammnummer. Bei Gleichstrombahnen wird dieser Nummer die Ziffer 1 vorangestellt. 50-Hz-Lokomotiven erhalten die Vorziffer 2, z. B. E 244 11 und Mehrfrequenz-Lokomotiven die Vorziffer 3. Die Ordnungsnummer ist eine zwei- oder dreistellige Zahl. Die Betriebsnummern sind an allen vier Seiten der Lokomotive angebracht und außerdem sind an jeder Längsseite der Eigentümer „Deutsche Reichsbahn", die Heimatdirektion und das zuständige Bahnbetriebswerk angegeben.
Die Achsfolge wird wie bei Dampflokomotiven nach den Richtlinien des Vereins Mitteleuropäischer Eisenbahnverwaltungen durch arabische Ziffern und große lateinische Buchstaben gekennzeichnet. Dabei werden die Zeichen für einzelne Achsen oder Achsgruppen, die in einem Lenk- oder Drehgestell gelagert sind, mit einem Beistrich versehen, wenn es sich nur um *eine* Ziffer oder um *einen* Buchstaben handelt. Umfassen diese Zeichen jedoch mehr als eine Ziffer oder einen Buchstaben, so ist es üblich, diese in Klammern zu setzen. So erhält z. B. eine elektrische Lokomotive mit zwei Drehgestellen und drei fest im Rahmen gelagerten Kuppelachsen, die von einem großen hochgelegenen Fahrmotor angetrieben werden, die Bezeichnung „2'C2'" (Bild 19a).

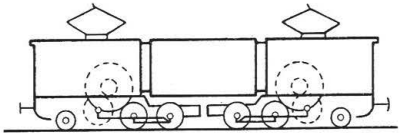
a) Achsfolge 2′ C 2′,
z. B. E 06



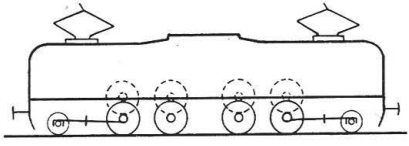
b) Achsfolge 1′ BB1′,
z. B. E75



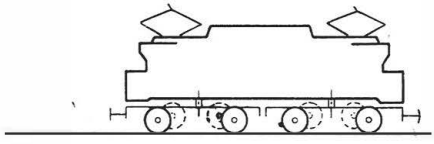
c) Achsfolge (1 B) (B1),
z. B. E77



d) Achsfolg 1′Do1′,
z. B. E18



e) Achsfolge Bo′Bo′,
z. B. E44



f) Achsfolge 1′Co + Co1′,
z. B. E95

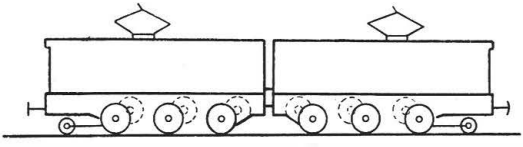


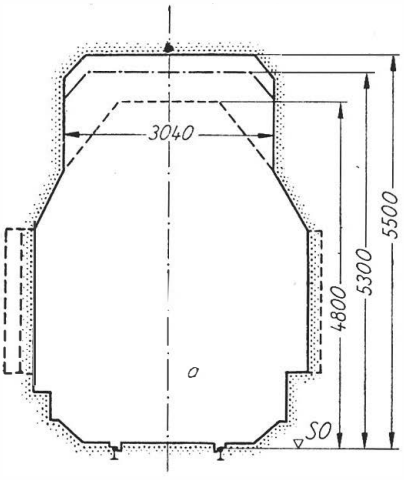
Bild 19. Schematische Darstellung verschiedener Lokomotivtypen

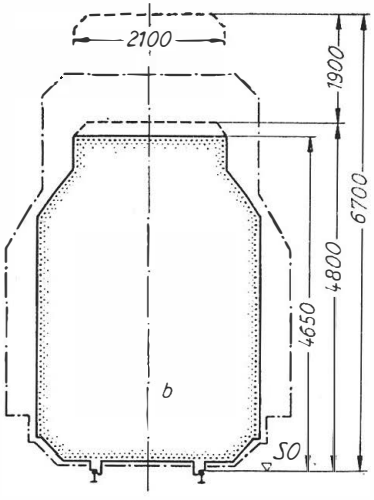
Werden jedoch bei einer elektrischen Lokomotive mit durchgehendem Rahmen insgesamt vier Achsen durch zwei hochliegende Fahrmotoren angetrieben und befindet sich an jedem Ende noch eine, in einem besonderen Gestell gelagerte Laufachse, so gibt man dieser Lokomotive die Bezeichnung „1′BB 1′". Hierbei wird jedoch vorausgesetzt, daß die beiden Gruppen nicht durch Kuppelstangen miteinander verbunden sind (Bild 19b). Sind aber bei gleichem Antrieb und bei gleicher Achsfolge die beiden Treibachsen und auch die

Laufachse in einem Gestell zusammengefaßt, so bringt man dies durch die Bezeichnung „(1 B) (B 1)" zum Ausdruck (Bild 19c). Hat eine elektrische Lokomotive jedoch für jede Treibachse einen eigenen Fahrmotor, so erhält der Großbuchstabe eine kleine Null als Index. Handelt es sich also um eine elektrische Lokomotive, bei der in einem durchgehenden Rahmen vier Treibradsätze mit Einzelachsantrieb gelagert sind und die an jedem Ende eine Laufachse hat, so lautet die Bezeichnung „1'Do 1'" (gebräuchlich ist die Aussprache: eins, do, eins) (Bild 19d).
Im Gegensatz dazu erhält eine elektrische Lokomotive ohne Laufachsen, bei der sämtliche vier Treibachsen mit Einzelachsantrieb in Drehgestellen untergebracht sind, die Bezeichnung „Bo' Bo'" (Bild 19e). Setzt sich eine elektrische Lokomotive aus mehreren Teilen zusammen, die durch eine Kurzkupplung miteinander verbunden sind, so wird dies durch ein „+" zum Ausdruck gebracht. Für eine schwere Güterzuglokomotive mit sechs einzeln angetriebenen Achsen und einer Laufachse an jedem Ende lautet z. B. die Bezeichnung „1'Co + Co1'" (Bild 19f).

1.6 Umgrenzung des lichten Raumes und Begrenzung der Triebfahrzeuge bei elektrischem Zugbetrieb

Die „Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BO)" gilt für alle dem öffentlichen Verkehr dienenden Eisenbahnen Deutschlands. Sie besitzt Gesetzeskraft und enthält wichtige Vorschriften für die Bahnanlagen und den Eisenbahnbetrieb und unter anderem auch grundlegende Bestimmungen für die elektrische Zugförderung. Diese müssen gewissenhaft beachtet werden, um einen sicheren und unfallfreien Betrieb zu gewährleisten. Der Abschnitt III der BO betrifft „Fahrzeuge" und enthält alle Vorschriften, die für den ordnungsgemäßen Bau und die betriebssichere Unterhaltung der Lokomotiven und Wagen erlassen wurden. Die §§ 27 bis 44 betreffen insbesondere die Regelfahrzeuge, die in den öffentlichen Zugverkehr eingestellt werden dürfen. In diesen Paragraphen sind die Begrenzung der Fahrzeuge, ihre Achslast und ihre Ausrüstung mit Zug- und Stoßvorrichtungen, Tragfedern, Bremsen usw. im einzelnen genau festgelegt.
Die Breite und Höhe der Fahrzeuge hängen ab von der Umgrenzungslinie des lichten Raumes (Bild 20a), bis zu der von außen her feste Bauwerke, wie Gebäude, Brücken, Rampen, Tunnel usw. an das Gleis heranreichen dürfen. Sie wird durch die BO § 11 genau festgelegt und gilt für alle elektrifizierten Strecken mit einer Fahrdrahtspannung von 15 kV. Die linke Hälfte des gezeichneten Regellichtraumes gilt für die durchgehenden Hauptgleise, während die rechte Hälfte für alle übrigen Gleise Gültigkeit hat. Dieses Profil weicht nur im oberen Teil von dem Regellichtraum ab und hält einen Raum von 3040 mm Breite für den Durchgang der Stromabnehmer frei. Wird eine bisher mit Dampf betriebene Strecke elektrifiziert, so darf bei vorhandenen Brücken und Tunneln der lichte Raum bis auf die strichpunktierte Linie eingeschränkt werden. In den für den Durchgang der Stromabnehmer freigehaltenen Raum dürfen Bauteile für die Aufhängung der Fahrleitung und die Fahrleitung selbst hineinragen.
Die Begrenzung der elektrischen Triebfahrzeuge, die auf Strecken mit 15 kV Fahrdrahtspannung eingesetzt werden, ist aus Bild 20b zu ersehen. Dabei dürfen jedoch die Stromabnehmer in der höchsten und tiefsten Arbeitsstellung die durch gestrichelte Linien dar-





——— für neue Überbauten und Tunnel
– – – für vorhandene Überbauten und Tunnel bei Umwandlung des Dampfbetriebes in elektrischen Betrieb

– · – Lichtraum für Strecken mit Oberleitung
– – – höchste und tiefste Arbeitsstellung des Stromabnehmers

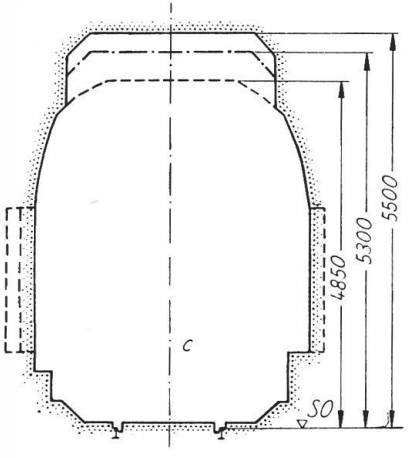


Bild 20
Lichtraumprofil und Begrenzung für elektrische Triebfahrzeuge

a Umgrenzungslinie lt. BO (Regellichtraum)
b Begrenzungslinien für elektr. Triebfahrzeuge lt. BO
c Umgrenzungslinie 1 – SM/DR

gestellte Begrenzung nicht überschreiten. Für gesenkte Stromabnehmer gilt die ausgezogene Linie als oberste Grenze.

Bild 20c zeigt die neue Umgrenzungslinie 1-SM/DR. Sie wurde durch Zusammenarbeit der Eisenbahnen der sozialistischen Länder von der internationalen Eisenbahnorganisation OSShD festgelegt und entsprechend den Verhältnissen der Deutschen Reichsbahn geringfügig abgeändert. Diese Linie weicht besonders im oberen Teil von dem bisherigen Licht-

raumprofil lt. BO ab und läßt größere und somit wirtschaftlichere Wagenabmessungen zu. Zunächst sollen die wichtigsten, dem internationalen Verkehr dienenden Hauptstrecken auf die neue Umgrenzungslinie 1-SM/DR umgestellt werden. Sie gilt jedoch auch für die übrigen Hauptbahnen und wird dort bei Neubauten und bei allen größeren Erneuerungsarbeiten an bestehenden Eisenbahnanlagen zugrunde gelegt. Die linke Hälfte des Bildes 20c gilt für die durchgehenden Hauptgleise und alle sonstigen Ein- und Ausfahrgleise von Zügen mit Beförderung von Reisenden, während die rechte Hälfte für alle übrigen Gleise Gültigkeit hat.

2 Aufbau des mechanischen Teiles

Der mechanische Teil jeder elektrischen Lokomotive hat die Aufgabe, das Drehmoment der Fahrmotoren auf die Treibräder zu übertragen und die gesamte elektrische Ausrüstung aufzunehmen. Diese soll die elektrische Energie, die dem Fahrzeug durch den Fahrdraht zugeführt wird, in mechanische Energie umsetzen. Sie umfaßt zugleich alle Einrichtungen, die zur Überwachung der Fahrmotoren, zur Leistungssteuerung, zum Verändern der Fahrtrichtung und überhaupt zur Durchführung eines ordnungsgemäßen Betriebes erforderlich sind.
Im Gegensatz zur Dampflokomotive, deren grundsätzlicher Aufbau sich in den letzten hundert Jahren kaum verändert hat, weichen die Bauformen der elektrischen Lokomotiven in den einzelnen Zeitepochen stark voneinander ab. Dies wird zum Teil dadurch begründet, daß man anstelle des früher gebräuchlichen Stangenantriebes heute allgemein Einzelachsantriebe bevorzugt. Es ist jedoch auch auf die neue Erkenntnis zurückzuführen, daß Laufachsen nicht unbedingt erforderlich sind, um eine gute Bogenläufigkeit und einen ruhigen Lauf auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten zu erreichen. Aus Bild 19 sind die einzelnen Lokomotivtypen bereits bekannt, die zugleich die Entwicklung in den einzelnen Zeitepochen widerspiegeln.

2.1 Fahrgestell

Das Fahrgestell einer elektrischen Lokomotive besteht genau wie das einer Dampflokomotive aus dem Laufwerk und dem Rahmen. Letzterer trägt den Wagenkasten, in dem sich die Führerstände und der Maschinenraum mit der gesamten elektrischen Ausrüstung befinden.

2.11 Laufwerk

Bei dem Laufwerk der elektrischen Lokomotiven unterscheidet man zwischen Lauf-, Treib- und Kuppelradsätzen einschließlich ihrer Führung und Lagerung im Rahmen.

2.111 Radsätze

Der Aufbau der Radsätze von elektrischen Lokomotiven entspricht im Prinzip dem der Dampflokomotiven (Bild 21). Die Radkörper aus Stahlguß – man unterscheidet zwischen Radnabe, Speichen und Felge – werden mit einem Druck von 400···600 kp/mm Nabensitzdurchmesser auf die Achse aufgepreßt. Die Radreifen jedoch werden auf die Radkörper warm aufgezogen und erhalten dadurch einen festen Sitz. Ein Sprengring aus Flußstahl

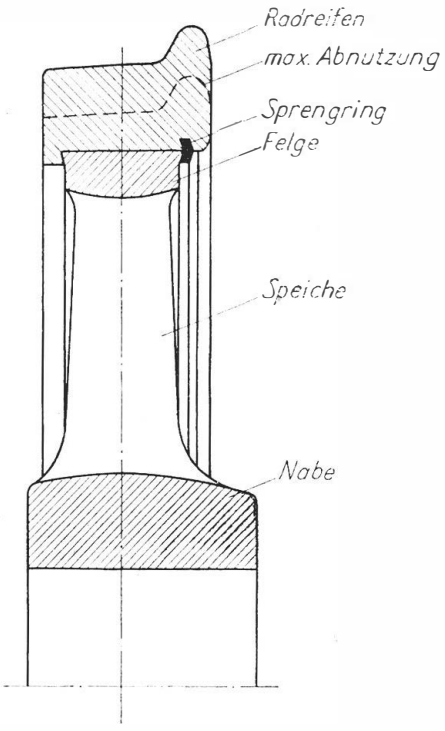


Bild 21
Schnitt durch das Rad einer elektrischen Lokomotive

dient zur weiteren Sicherung und soll bei einem evtl. Bruch des Radreifens verhindern, daß sich einzelne Teile vom Rad lösen.

Bei älteren elektrischen Lokomotiven mit Stangenantrieb werden die Kurbelzapfen in die Speichen der Treib- und Kuppelräder eingepreßt. Der Laufkreisdurchmesser der Laufachsen schwankt zwischen 850 und 1000 mm. Während man für die Treibräder älterer Lokomotiven mit Rücksicht auf den Platzbedarf des elastischen Antriebes einen Durchmesser bis zu 1600 mm wählte, geht man neuerdings auch bei hohen Geschwindigkeiten nicht über 1350 mm hinaus. Die Masse eines Laufradsatzes beträgt rund 1000 kg, die eines Treibradsatzes etwa 2500 kg.

2.112 Achslager

Die Schenkel des Radsatzes tragen die Achslager, auf die sich unter Zwischenschalten der Federung der Rahmen abstützt. Man unterscheidet Gleitachslager und Rollenachslager. Gleitlager bestehen aus dem Achslagergehäuse, der Lagerschale und dem Achslagerunterkasten. Bild 22 zeigt ein Treibachslager für Innenrahmen. Die meist aus Rotguß bestehenden Lagerschalen sind mit einem Lagermetall ausgegossen, damit günstige Reibungsverhältnisse entstehen und die Achsschenkel möglichst wenig angegriffen werden (Dünnguß). Der Ausguß ist an beiden Lagerseiten nach außen hochgezogen, damit der Schenkelbund auch beim seitlichen Anlaufen nur mit Lagermetall in Berührung kommt.

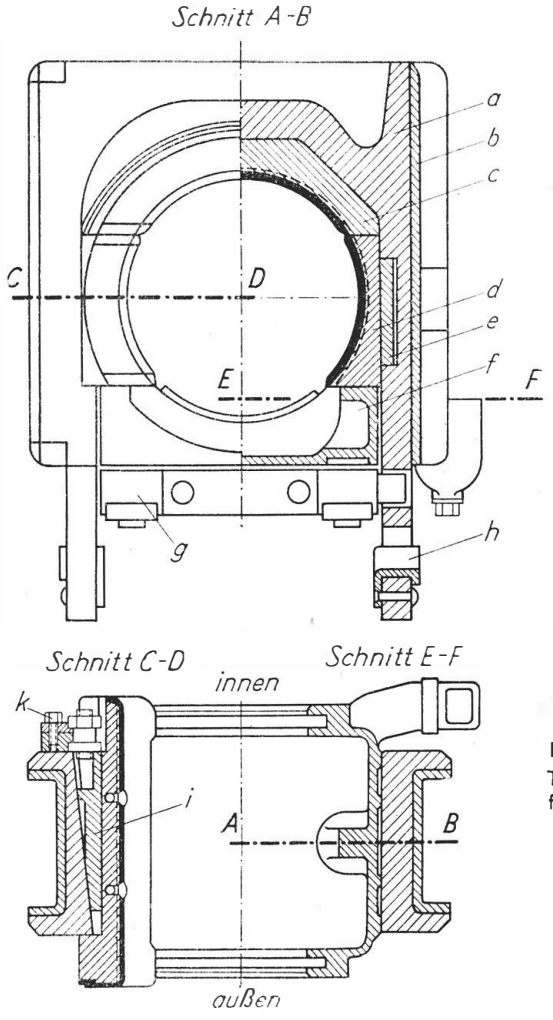


Bild 22
Treibachslager für Innenrahmen

a Achslagergehäuse
b Gleitplatte
c obere Lagerschale
d untere Lagerschale
e Keil
f Achslagerunterkasten
g zweiteiliger Träger
h Auflage des Federgehänges
i Nachstelleinrichtung
k Sicherung

Der Achslagerunterkasten ist als Schmiergefäß ausgebildet und enthält das Schmierpolster, das durch eine Feder von unten an den Achsschenkel gedrückt wird.
Bei elektrischen Lokomotiven mit Außenrahmen bevorzugt man im allgemeinen das Peyinghauslager (Bild 23). Auch hier dient der untere Teil des Gehäuses als Ölbehälter, jedoch entfällt das Schmierpolster. An der Stirnseite des Schenkels sind zwei Schleuderschaufeln befestigt, die während der Fahrt in das Öl eintauchen und kleine Mengen davon auf die vorgekragte obere Lagerschale befördern. Von dort fließt es durch Bohrungen auf den Achsschenkel. Mehrere Spritzringe führen das vom Schenkel abtropfende Öl in den Ölbehälter zurück.

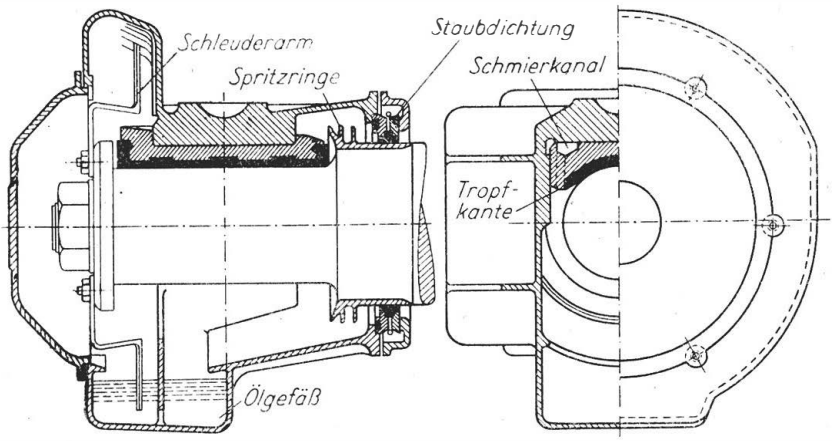


Bild 23. Peyinghauslager

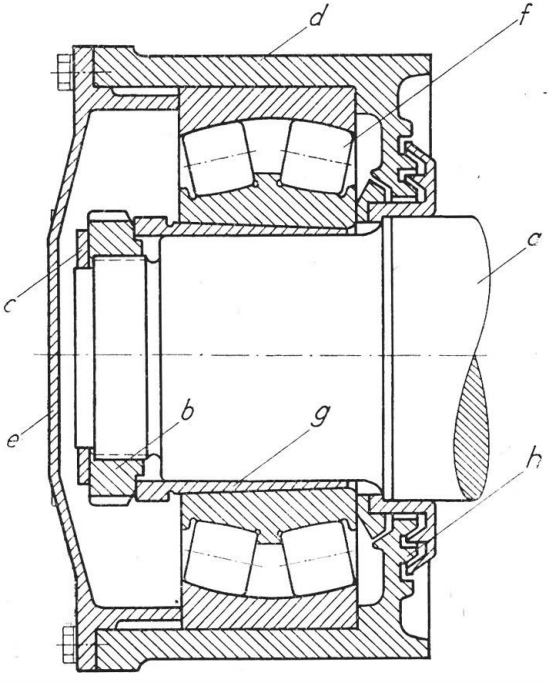


Bild 24
Rollenachslager

a Achsschenkel
b Verschlußmutter
c Sicherung
d Achslagergehäuse
e Deckel
f Pendelrollenlager
g konische Spannhülse
h Labyrinthdichtung

Bei neuen elektrischen Lokomotiven werden anstelle der Gleitachslager im allgemeinen Rollenlager verwendet (Bild 24). Es sind meist Pendelrollenlager, da diese stets eine freie Einstellbarkeit der Achse gewährleisten. Der Innenlaufring wird durch eine kegelige Spannhülse mit Mutter auf dem Achsschenkel befestigt. Die einzelnen Rollen werden jeweils

in einem Käfig geführt, so daß stets der richtige Abstand von Rolle zu Rolle erhalten bleibt. Die Schmierung erfolgt durch Fett, das beim Zusammenbau eingebracht wird und nur bei der vorgeschriebenen Ausbesserung erneuert werden darf. Eine Unterhaltung der Wälzlager im Betrieb ist also nicht erforderlich.

Der Bahnwiderstand ist wesentlich kleiner als bei Gleitlagern. Während bei diesen die Reibungszahl der Ruhe $\mu = 0{,}13$ beträgt, kann sie bei Rollenachslagern mit $\mu = 0{,}0035$ angenommen werden. Auch für den Zustand der Bewegung und Fahrgeschwindigkeiten über 65 km/h liegt die Reibungszahl für Gleitlager mit $\mu = 0{,}004$ wesentlich höher als bei Rollenachslagern mit $\mu = 0{,}0012$. Außerdem zeichnen sich Wälzlager durch sehr geringen Verschleiß und unbedingte Betriebssicherheit aus. Zum Schutze der Rollen gegen Stromübergang werden an dem Gehäuse besondere Erdstromkontakte angebracht.

Die Achslagergehäuse werden in der üblichen Art im Hauptrahmen bzw. im Drehgestellrahmen geführt. Die Gleitplatten der Achshalter sind auswechselbar. Eine Nachstellvorrichtung mit Stellkeil ist im allgemeinen nur bei älteren elektrischen Lokomotiven mit Stangenantrieb zu finden.

2.113 Tragfedern

Um den Oberbau zu schonen und die gesamte elektrische Ausrüstung vor Erschütterungen und Stößen zu schützen, sind sämtliche elektrischen Lokomotiven mit entsprechend bemessenen Achstragfedern ausgerüstet. Neuere Drehgestell-Lokomotiven besitzen zusätzlich noch Wiegefedern, deren konstruktive Ausführung sehr unterschiedlich sein kann.

Früher verwendete man meist Blattfedern, die unter oder über dem Achslagergehäuse angeordnet wurden (Bilder 25 und 26). Sie waren durch Federspannschrauben mit dem Rahmen und durch Federausgleichhebel untereinander verbunden. Die Dicke, Länge und Anzahl der Federblätter richteten sich nach der geforderten Federcharakteristik. Da Blattfedern jedoch eine verhältnismäßig große Eigendämpfung haben und bei kleinen Stößen nicht ansprechen, bevorzugt man heute im allgemeinen Schraubenfedern. Diese sitzen auf Konsolen, die an die Achslagergehäuse angegossen sind (siehe Bilder 24 und 32). Manchmal verwendet man auch Federsätze, bei denen zwei oder drei Schraubenfedern ineinander stecken. Man gewinnt dadurch Platz und auch die Möglichkeit, die Charakteristik der Federung in weiten Grenzen zu verändern. Da Schraubenfedern nur eine sehr geringe Eigendämpfung aufweisen, ist der zusätzliche Einbau von Stoßdämpfern erforderlich.

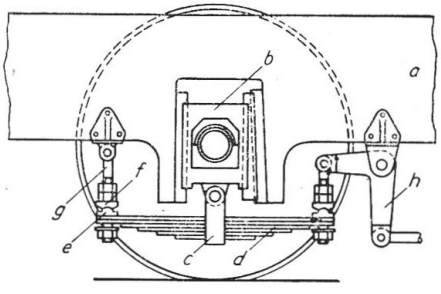


Bild 25
Anordnung der Blattfedern unter dem Achslager

a Rahmen
b Achslagergehäuse
c Achslagergehänge
d Tragfeder
e Sattelscheibe
f Druckplatte
g Spannschraube
h Ausgleichhebel

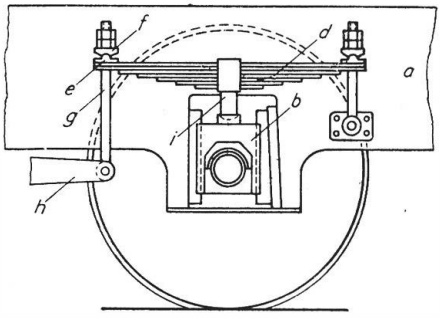


Bild 26
Anordnung der Blattfedern über dem Achslager

a Rahmen
b Achslagergehäuse
d Tragfeder
e Sattelscheibe
f Druckplatte
g Spannschraube
h Ausgleichhebel
i Federstütze

Eine besonders gute Federung erreicht man durch Hintereinanderschalten von Stahl- und Gummifedern. Während Bild 27 die Kombination einer Blattfeder mit einer Gummifeder erkennen läßt, zeigt Bild 32 ein Drehgestell, bei dem für die Achsfederung Schrauben- und Gummifedern, für die Wiege dagegen Blattfedern Verwendung finden. Es ist zu beachten, daß auch bei Hintereinanderschalten mehrerer Federgruppen das Federspiel durch die Pufferhöhe über SO begrenzt wird, für die laut BO bestimmte Toleranzen festliegen.

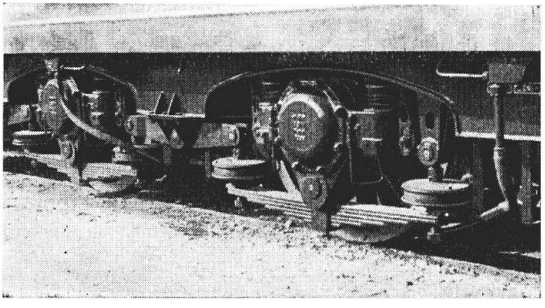


Bild 27
Anordnung der Gummifedern

2.12 Mittel zur Verbesserung des Fahrzeuglaufes

Es ist bekannt, daß jedes Schienenfahrzeug während der Fahrt störende Bewegungen aufweist. Sie sind auf ungenaue Gleislage, abgenutzte Radreifen und Schienen, auf das Seitenspiel zwischen Spurkranz und Schienenkopf und andere Einflüsse zurückzuführen. Sie zeigen sich besonders beim Befahren von Gleisbögen, treten aber auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten im geraden Gleis auf und können durch die Tragfedern, Stoßdämpfer und andere Einrichtungen nur gemildert aber nicht beseitigt werden. Man unterscheidet das „Nicken", das z. B. dann auftritt, wenn ein Fahrzeug mit kurzem Radstand über einen schlechten Schienenstoß fährt, sowie das seitliche „Wanken", das auf Unebenheit *einer* Schiene zurückzuführen ist. Das sogenannte „Schlingern" entsteht dadurch, daß infolge des Seitenspieles zwischen Rad und Schiene die Spurkränze der vorderen Achse einmal am linken und einmal am rechten Schienenkopf anlaufen. Das Fahrzeug beschreibt dann eine Sinuslinie. Je größer der feste Achsstand ist, d. h. der Abstand der beiden fest im Rahmen gelagerten

Endachsen, desto geringer sind im allgemeinen die überhängenden Massen und um so ruhiger läuft das Fahrzeug in der Geraden. Um eine gute Bogenläufigkeit zu erreichen, darf jedoch der feste Achsstand ein bestimmtes Maß nicht überschreiten. Beim Befahren enger Gleisbögen wird es zweckmäßig sein, bei drei- und mehrachsigen Fahrzeugen die Spurkränze der mittleren Radsätze zu schwächen. Auch kann man durch Seitenverschiebbarkeit dieser Achsen ein Zwängen zwischen Spurkranz und Schienenkopf vermeiden, muß dann jedoch bei elektrischen Lokomotiven mit Stangenantrieb auch die Kurbelzapfen für die Treib- und Kuppelstangen entsprechend verlängern. Trotz dieser Maßnahme ergeben sich in engen Gleisbögen an der führenden Achse hohe Anlaufdrücke, die zu einem starken Verschleiß von Spurkranz und Schienenkopf führen.

2.121 Lenkachsen

Aus diesem Grunde war es bei älteren elektrischen Lokomotiven mit Stangenantrieb üblich, an jedem Ende eine oder mehrere Laufachsen vorzusehen. Diese sind nicht fest im Hauptrahmen gelagert, sondern in besonderen Lenk- oder Drehgestellen untergebracht, so daß sie sich radial einstellen können. Dadurch verbessern sie die Bogenläufigkeit und tragen zugleich den Teil der Lokomotivlast, der infolge der beschränkten Achslast nicht mehr von den Treibachsen aufgenommen werden kann.
Am gebräuchlichsten ist das von der Dampflokomotive her bekannte Bissel-Lenkgestell. Hier ist die Laufachse in einem eigenen Gestell gelagert, das durch eine Deichsel um einen im Hauptrahmen angebrachten Drehzapfen nach beiden Seiten ausschwenken kann. Der auf die Laufachse fallende Anteil der Lokomotivlast wird durch Stützzapfen auf zwei Pfannen übertragen, die in einem seitenbeweglichen Gleitstück auf dem Lenkgestell liegen. Dadurch wird die Seitenbeweglichkeit der Laufachse nicht behindert (Bild 28). Das Lenkgestell wird durch Schraubenfedern, die beim seitlichen Ausschlagen angespannt werden, in Mittellage gehalten bzw. nach dem Befahren von Gleisbögen in diese zurückgeführt. Dadurch ist es auch möglich, die erste fest im Rahmen gelagerte Achse von allzu hohen Anlaufdrücken zu entlasten.

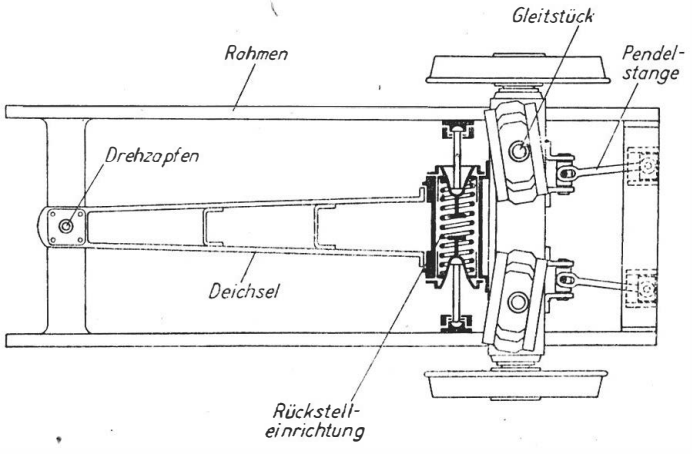


Bild 28
Bisselgestell mit Rückstelleinrichtung

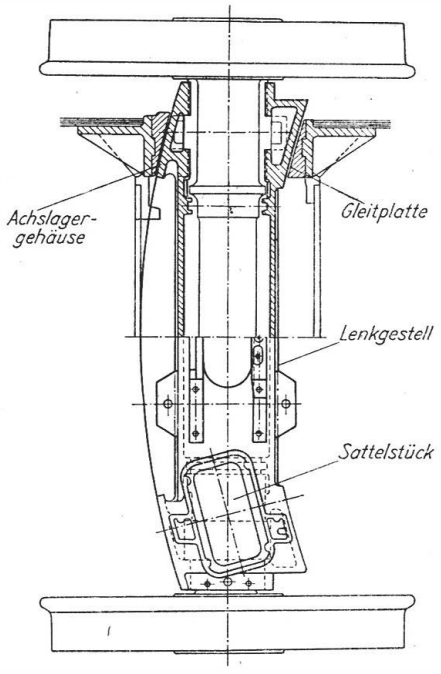


Bild 29. Adamsachse

Ein anderes einachsiges Lenkgestell ist die Adamsachse, die bei elektrischen Lokomotiven allerdings selten zu finden ist (Bild 29). Auch hier ist die Laufachse in einem durchgehenden Lenkgestell gelagert, das beide Achslagergehäuse miteinander verbindet. Der Hauptrahmen stützt sich wieder über Sattelstücke und Gleitplatten auf das Lenkgestell ab. Dieses hat vorn und hinten kreisbogenförmige Gleitflächen und läuft in ebenso geformten Achslagerführungen, so daß auch die Adamsachse um einen gedachten Drehpunkt ausschwenken und sich genau wie das Bissel-Gestell im Gleisbogen radial einstellen kann. Auch hier ist eine Rückstellvorrichtung vorhanden, die nach dem Befahren von Krümmungen den Radsatz in die Mittellage zurückführt und das Schlingern der Lokomotive bei hohen Fahrgeschwindigkeiten einschränkt.

2.122 Drehgestelle

Außer den vorgenannten einachsigen Lenkgestellen gibt es noch Drehgestelle, in denen zwei Laufachsen, eine Laufachse und eine Treibachse oder auch zwei Treibachsen zusammengefaßt sind. Das Laufdrehgestell entspricht der üblichen Ausführung. Sein Achsstand beträgt 1,5···2,0 m. Der Drehzapfen überträgt einen Teil der Lokomotivlast auf den Drehgestellrahmen, der sich über Blatt- und Schraubenfedern auf die beiden Laufachsen abstützt. Das Lager des Drehzapfens ist kugelig und wird meistens seitenbeweglich angeordnet, d. h., es kann sich 60···100 mm quer zur Fahrtrichtung verschieben. Eine Rückstellvorrichtung sorgt dafür, daß im Gleisbogen der Führungsdruck nicht nur von den beiden Laufachsen, sondern auch von der nachfolgenden Treibachse aufgenommen wird.

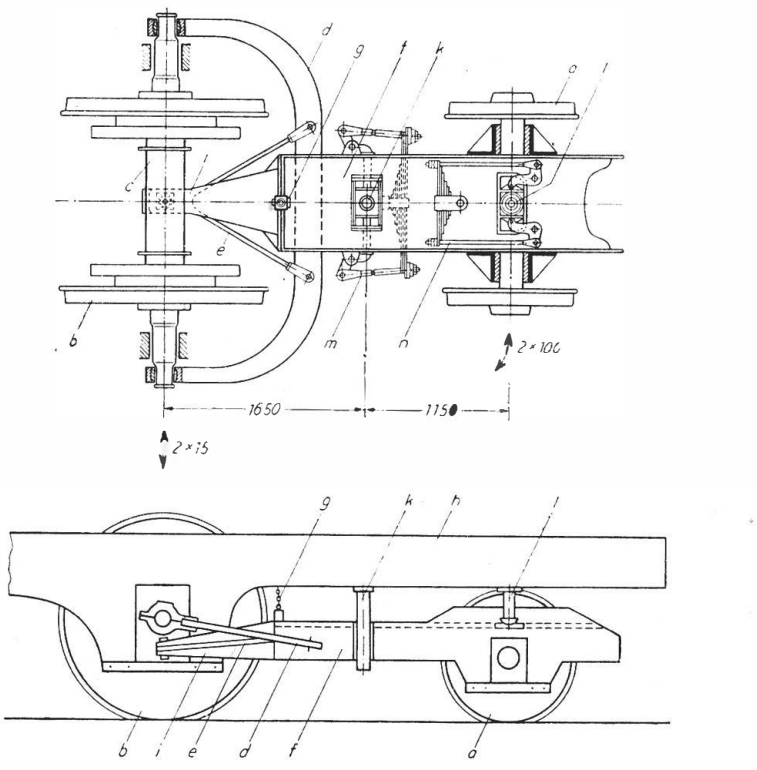


Bild 30. Krauß-Helmholtz-Drehgestell für elektrische Lokomotiven mit Einzelachsantrieb

a Laufradsatz
b Treibradsatz
c Hohlwelle
d Bügel
e Gabel
f Lenkgestell
g Pendel
h Hauptrahmen
i Deichsel
k Drehzapfen
l Stützzapfen
m Rückstellvorrichtung der Drehpfanne
n Rückstellvorrichtung der Stützpfanne

Gute Laufeigenschaften ermöglicht auch das Krauß-Helmholtz-Drehgestell, das eine am Ende liegende Laufachse mit der benachbarten Treibachse verbindet. Die Laufachse ist, ähnlich wie bei der Bissel-Achse, in einem Lenkgestell gelagert, das um einen im Hauptrahmen befestigten Zapfen seitlich ausschwenken kann. Die Deichsel ist jedoch über den Drehzapfen hinaus verlängert und greift an einem Gehäuse an, das die beiden Treibachslager miteinander verbindet. Die Treibachse ist gegenüber ihren Lagern nicht verschiebbar, doch haben die Lager Seitenspiel im Rahmen. Ein Ausweichen der Laufachse nach der einen Seite bedingt daher ein gleichzeitiges Querverschieben der Treibachse nach der anderen Seite. Da die Deichsel stets die beiden Achsmitten verbindet, muß auch hier der Drehzapfen seitenverschiebbar sein.

Diese einfache Bauart ist jedoch bei elektrischen Lokomotiven mit Einzelachsantrieb nicht möglich, da die Treibachse zwischen den Rädern von einer Hohlwelle umgeben wird (Bild 30 und 31). Diese ist, wie später im Abschnitt 2.323 erläutert wird, erforderlich, um

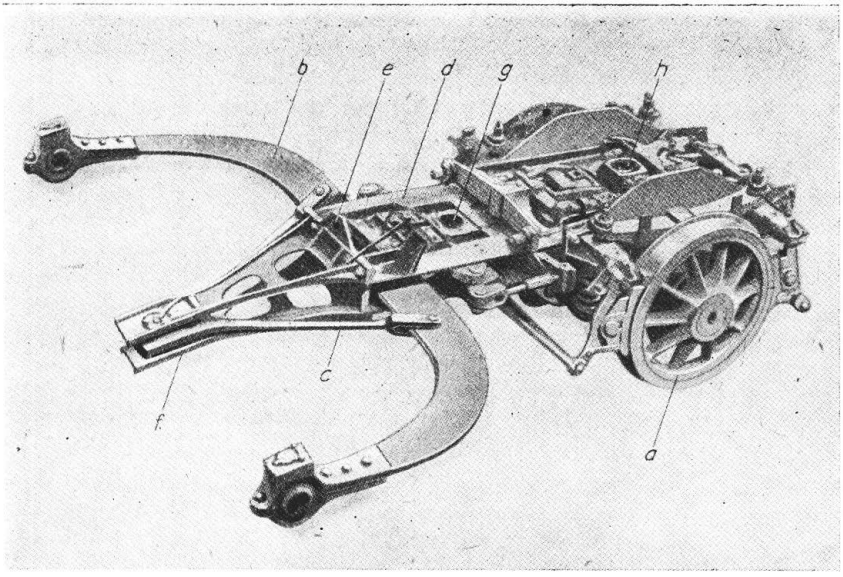


Bild 31. Krauß-Helmholtz-Drehgestell für elektrische Lokomotiven mit Einzelachsantrieb

a Laufradsatz
b Bügel
c Gabel
d Lenkgestell
e Öse für Pendel
f Deichsel
g Lager für Drehzapfen
h Pfanne für Stützzapfen

das Drehmoment vom gefederten Motor auf die ungefederte Achse übertragen zu können. Man verlängert daher die Achswelle über die beiden außenliegenden Achsschenkel hinaus und verbindet nach einem Vorschlag von Kleinow (AEG) die beiden äußeren Enden durch einen kräftigen Bügel aus Flachstahl, der um die Räder herumgreift. An diesem ist noch eine dreieckförmige Gabel angebracht, so daß die Verbindung mit dem Lenkgestell ungefähr 300 mm unter Mitte Treibachse zu liegen kommt. Das Lenkgestell ist über ein Pendel, das an einer Öse angreift, mit dem Hauptrahmen verbunden und gehört daher zu den gefederten Massen.

Weicht bei dieser Bauart die Laufachse z. B. nach rechts aus, so geht das freie Ende der Deichsel nach links und bewirkt über den Bügel eine Seitenverschiebung der Treibachse. Das Achslagergehäuse bewegt sich nur noch senkrecht in der Achslagerführung. Durch die Rückstellvorrichtung erreicht man ein stoßfreies Einfahren in Gleisbögen und geringe Anlaufdrücke. Diese Drehgestelle sind bei den elektrischen Lokomotiven der Baureihen E 04, E 17, E 18 und E 19 an jedem Fahrzeugende zu finden. Da die beiden letztgenannten Typen für Höchstgeschwindigkeiten von 140 bzw. 180 km/h entwickelt wurden und auch bei diesen hohen Fahrgeschwindigkeiten einen ruhigen Lauf aufweisen sollen, wurde die geführte Länge der Lokomotive dadurch vergrößert, daß man die Rückstellfedern des nachlaufenden Drehgestells durch eine Druckluftvorrichtung verstärkte. Dadurch konnte die Schlingerbewegung der Lokomotiven bei Schnellfahrten wesentlich eingeschränkt werden, ohne die gute Bogenläufigkeit bei Rangierfahrten zu beeinträchtigen.

Während die Krauß-Helmholtz-Gestelle eigentlich keine echten Drehgestelle sind, da die

beiden Achsen zwar in ihrer Seitenbewegung zwangsläufig verbunden aber in verschiedenen Gestellen gelagert sind, gibt es auch Drehgestelle, bei denen die Lauf- und die Treibachse in einem eigenen, vom Hauptrahmen getrennten Gestell vereinigt sind. In diesem Falle ist der Motor der Treibachse dann entweder im Drehgestell untergebracht, oder er ist im Hauptrahmen gelagert und mit der Treibachse über eine bewegliche Kupplung verbunden. Diese überträgt das Drehmoment und gleicht außerdem das vertikale Federspiel und die Seitenbewegung der Drehgestelle aus.

Bei älteren Lokomotiven war es üblich, an jedem Ende eine oder mehrere Laufachsen vorzusehen, um die überschüssige Last aufzunehmen und den Bogenlauf zu verbessern (z. B. Achsfolge 1′ Do 1′). Durch Anwendung der modernen Technik war es jedoch bei neueren Konstruktionen möglich, die Masse des mechanischen und elektrischen Teiles so weit zu verringern, daß man auf Laufachsen verzichten konnte. Dadurch kann man die gesamte

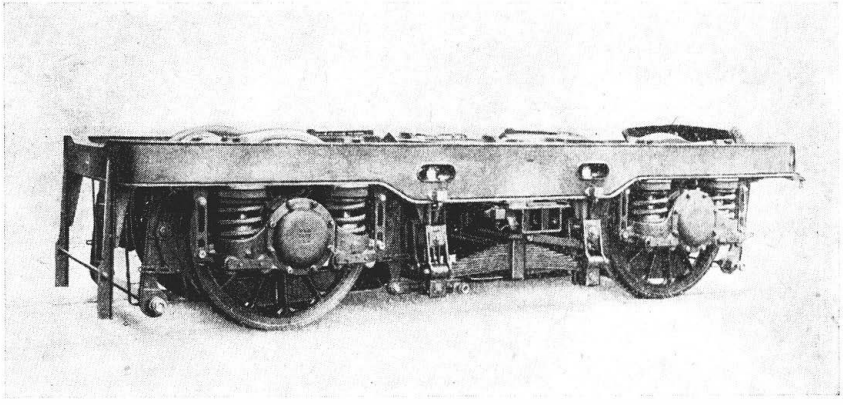


Bild 32. Zweiachsiges Triebdrehgestell

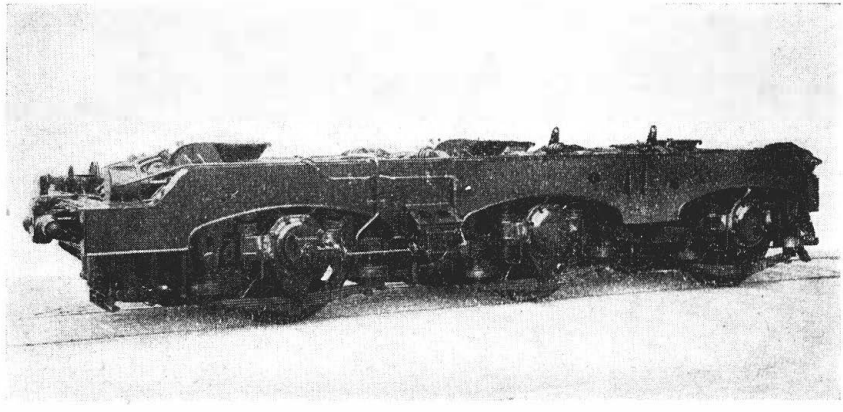


Bild 33. Dreiachsiges Triebdrehgestell

Masse der betriebsfähigen Lokomotive für die Erzeugung der Haftreibung zwischen Rad und Schiene ausnutzen. Um eine ausreichende Bogenläufigkeit und auch gute Laufeigenschaften in der Geraden bei hoher Geschwindigkeit zu erreichen, wählt man für das Laufwerk zwei Triebdrehgestelle.

Bild 32 zeigt das zweiachsige Triebgestell einer elektrischen Lokomotive mit der Achsfolge Bo'Bo'. Während für die Achsfederung Schrauben- und Gummifedern Verwendung finden, stützt sich die Wiege, ähnlich wie beim Reisezugwagen-Drehgestell Görlitzer Bauart, auf Blattfedern ab. Für größere Leistungen werden elektrische Lokmotiven mit dreiachsigen Drehgestellen gebaut, so daß sich die Achsfolge Co'Co' ergibt (Bild 33). Lokomotiven, bei denen sich der Kasten auf ein zweiachsiges und ein dreiachsiges Drehgestell abstützt (Achsfolge Bo'Co'), sind nur selten zu finden (siehe Bild 278).

Zweiachsige Drehgestelle neigen bei hohen Geschwindigkeiten in der Geraden leicht zum Schlingern. Man verbessert die Laufeigenschaften durch folgende Maßnahmen:

a) möglichst geringe überhängende Massen, indem man die Fahrmotoren zwischen den Achsen anordnet,

b) möglichst spielfreie Lagerung der Achsen im Drehgestell. Sie wird erreicht durch Rollenachslager und zylindrische Achslagerführung mit Silentblocks (siehe Bild 62),

c) Anordnung der Zug- und Stoßvorrichtung am Hauptrahmen. Dadurch wird der zwanglose Lauf der Drehgestelle nicht behindert,

d) möglichst großer Abstand der Drehzapfen und geringe überhängende Massen des Lokomotivkastens,

e) verbesserte Abstützung des Lokomotivkastens durch Pendelstützen, Wiegen, federnde Hilfsstützzapfen oder ähnliche Einrichtungen.

Die beiden Drehgestelle sind entweder nur durch den Hauptrahmen miteinander verbunden oder sie sind außerdem miteinander gekuppelt. Die häufig verwendeten Kurzkupplungen sind ähnlich aufgebaut wie die Tenderkupplungen bei Dampflokomotiven. Die Zugkräfte werden durch ein Kuppeleisen, die Druckkräfte durch gefederte Stoßpuffer übertragen. Außerdem gibt es noch sogenannte Ausgleichkupplungen, die durch Diagonal- und Längsverbindungen bei Kurvenfahrt die radiale Einstellung der Achsen begünstigen und Spießgang vermeiden sollen. Im Gegensatz dazu haben andere Kupplungstypen den Zweck, beim Anziehen schwerer Züge eine allzu große Entlastung einzelner Achsen zu vermeiden.

Auch bei elektrischen Lokomotiven besteht die Möglichkeit, durch die grafischen Verfahren nach Roy und Dr. Vogel nachzuprüfen, ob ein Befahren von Weichenstraßen und engen Gleisbögen ohne Zwängen und allzu hohe Anlaufdrücke an den Schienen möglich ist. Drehgestell-Lokomotiven zeichnen sich durch gute Laufeigenschaften aus. Versuche, die in den letzten Jahren mit Drehgestell-Lokomotiven ohne Laufachsen durchgeführt wurden, bewiesen, daß bei zweckmäßiger Ausbildung des Laufwerkes und richtiger Abstützung des Wagenkastens ein ruhiger Lauf sogar noch bei Geschwindigkeiten über 300 km/h erreicht wird.

2.13 Mechanische Bremsen

Alle elektrischen Triebfahrzeuge sind genau wie die Dampf- und Diesellokomotiven mit mechanischen Bremsen ausgerüstet. Diese haben den Zweck, den Lauf der Lokomotive

und des angehängten Zuges bis zum Stillstand zu verzögern und auch stillstehende Fahrzeuge auf Gefällestrecken gegen unbeabsichtigtes Abrollen zu sichern. Darüber hinaus findet man bei einigen elektrischen Triebfahrzeugen noch elektrische Bremsen, die besonders auf Strecken mit starkem Gefälle gewisse Vorteile aufweisen (siehe Abschnitt 3.6).

2.131 Druckluftbremse

Sämtliche elektrischen Lokomotiven sind mit einer Druckluftbremse ausgerüstet, die in ihrem Aufbau den Anlagen einer Dampflokomotive entspricht. Es soll daher an dieser Stelle darauf verzichtet werden, auf Einzelheiten der verschiedenen Bremssysteme einzugehen. Gebräuchlich sind Klotzbremsen, bei denen ein oder mehrere gußeiserne Bremsklötze durch ein Bremsgestänge an die Lauffläche der Radreifen gepreßt werden. Um eine einseitige Belastung der Achslager zu vermeiden, ist es zweckmäßig, jedes Rad durch zwei möglichst gegenüberliegende Bremsklötze abzubremsen.
Die Bremswirkung ist abhängig von der Größe der Berührungsfläche, der Klotzkraft und dem Reibwert zwischen Klotz und Rad. Um die durch die BO vorgeschriebenen Bremswege nicht zu überschreiten, werden bei elektrischen Lokomotiven im allgemeinen sämtliche Achsen abgebremst. Die Summe der einzelnen Bremsklotzkräfte, d. h. die maximale Bremsklotzkraft, beträgt bei Güterzuglokomotiven ungefähr 70 % ihrer Gesamtlast. Bei schnellfahrenden Lokomotiven liegt dieser Wert bedeutend höher. So steigert man z. B. bei den Lokomotiven der Baureihe E 18 die Abbremsung der Treibräder auf 180 % und die der hinteren Laufachse auf 150 % der Achslast. Die Bremswirkung kann nicht beliebig erhöht werden, da die Klotzreibung keinesfalls größer werden darf als die Haftreibung zwischen Rad und Schiene. Da der Reibwert der gußeisernen Bremsklötze auf den stählernen Radreifen bei abnehmenden Geschwindigkeiten schnell ansteigt, ist es üblich, noch besondere Fliehkraft-Bremsregler einzubauen. Diese werden von einer Achse angetrieben und setzen bei einer Fahrgeschwindigkeit von etwa 55 km/h bis zum Stillstand die Abbremsung auf den üblichen Wert von etwa 80 % herab. Drehgestell-Lokomotiven besitzen im allgemeinen zwei voneinander unabhängige Bremsgestänge. Die zum Bedienen der Bremseinrichtung benötigte Druckluft von 6 ·· 8 at Überdruck wird durch einen Kompressor erzeugt. Dieser arbeitet meist zweistufig und kann als Kolbenkompresor oder auch als Rotationskompressor ausgebildet sein (siehe Abschitt 3.74).

2.132 Schleuderschutzbremse

Die Schleuderschutzbremse ist ebenfalls eine Druckluftbremse. Ihre Aufgabe ist es jedoch nicht, den fahrenden Zug zu verzögern oder anzuhalten, sondern sie hat den Zweck, das Schleudern der Treibachsen bei schweren Anfahrten zu verhindern. Sie wird also bei arbeitenden Fahrmotoren angestellt, was sonst streng verboten ist. Sobald der Lokomotivführer vom Führerstand aus die Schleuderschutzbremse betätigt, strömt Druckluft von 1 at Überdruck vom Hauptluftbehälter in die Bremszylinder ein. Infolge der geringen Bremskraft ist die Verzögerung des Fahrzeuges gering, doch genügt sie, um ein Schleudern der Treibachsen beim Anfahren zu vermeiden.

2.133 Handbremse

Außer der Druckluftbremse muß jede elektrische Lokomotive laut BO noch eine Handbremse besitzen. Es ist im allgemeinen eine Spindelbremse, die von jedem Führerstand aus

durch ein Handrad betätigt werden kann. Eine verhältnismäßig hohe Übersetzung ermöglicht ausreichend große Bremskräfte. Die Bremse wird stets durch Drehen im Uhrzeigersinn angezogen. Sie wirkt auf dasselbe Bremsgestänge wie die Druckluftbremse und dient im allgemeinen nur als Feststellbremse.

2.14 Rahmen

Auf dem Laufwerk ruht der Rahmen. Er ist bei den älteren elektrischen Lokomotiven ähnlich aufgebaut wie der Rahmen der Dampflokomotiven und besteht aus zwei Rahmenwangen, die durch mehrere Querverbindungen versteift werden. Im Gegensatz zu den elektrischen Lokomotiven mit Stangenantrieb, die ausschließlich Innenrahmen verwenden, ist bei elektrischen Lokomotiven mit Einzelachsantrieb im allgemeinen der Außenrahmen gebräuchlich, da der gesamte Raum zwischen den Rädern für die Unterbringung der großen Fahrmotoren benötigt wird. Genau wie bei Dampflokomotiven gibt es auch hier Barren- und Blechrahmen, doch werden letztere mit einer Wanddicke von 20···30 mm weit häufiger verwendet. Der Rahmen der E 18 ist z. B. aus 26 mm dicken Blechen zusammengeschweißt und hat eine Masse von 12,5 t (Bild 34). Die beiden Rahmenwangen sind durch starke Bleche verbunden, die teils senkrecht, zum Teil auch waagerecht angeordnet sind. Sie tragen wesentlich zur Versteifung des Rahmens bei und nehmen zugleich den Trafo, die Fahrmotoren und andere Teile der elektrischen Ausrüstung auf. Bei Drehgestell-Loko-

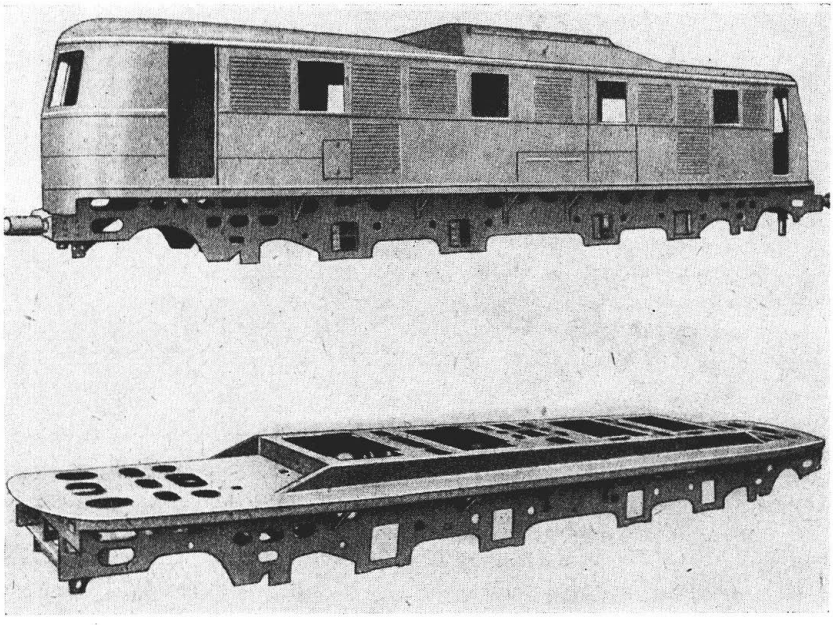


Bild 34. Rahmen für elektrische Lokomotiven älterer Bauart, oben mit aufgesetztem Wagenkasten

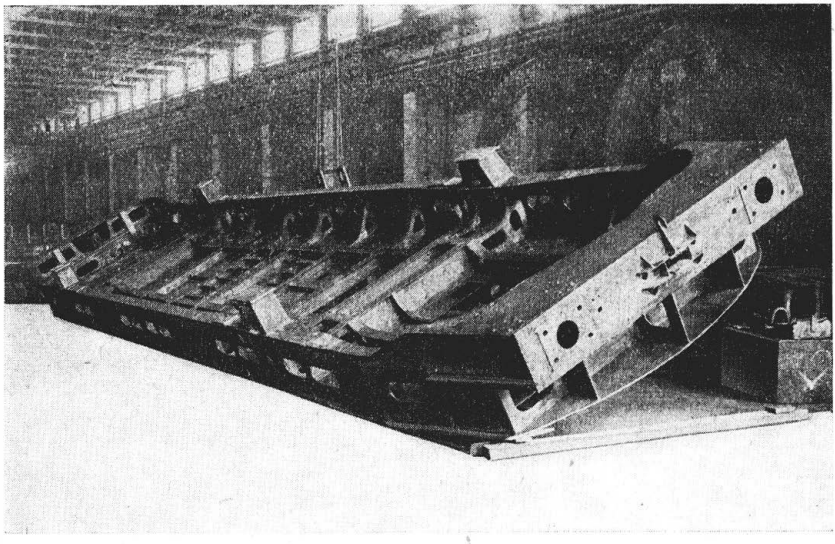


Bild 35. Brückenrahmen

motiven ist der Brückenrahmen, der den Kastenaufbau trägt, auf die beiden Drehgestellrahmen aufgesetzt. Er besteht bei älteren Lokomotiven ebenfalls aus zwei Langträgern, die durch zahlreiche Querversteifungen verbunden sind. Bei Neukonstruktionen ist der Brückenrahmen jedoch durchweg aus dünnen Blechen zusammengeschweißt (Bild 35). Er soll nämlich nicht nur ausschließlich als Tragkonstruktion für die elektrische Ausrüstung und den aufgesetzten Kastenaufbau dienen, sondern er wird durch kraftschlüssiges Verschweißen mit dem Lokomotivkasten zu einer gemeinsam tragenden Konstruktion verbunden. Aus diesem Grunde werden die Bleche, welche die senkrechten Kräfte aufnehmen, meist in die Ebene der Seitenwände des Kastenaufbaues verlegt und durch zahlreiche, verhältnismäßig dünne Bleche versteift. Auch die Querverbindungen, welche die Drehzapfen tragen, werden eingeschweißt und lediglich die Pufferträger angeschraubt, um ein leichtes Auswechseln bei Beschädigungen zu ermöglichen.
Auch die Drehgestellrahmen werden neuerdings nicht mehr als Blechrahmen ausgeführt, sondern man bevorzugt sogenannte Kastenrahmen, die aus dünnen, nur etwa 6 mm dicken Blechen, zusammengeschweißt werden (siehe Bilder 32 und 33). Dadurch kann trotz hoher Steifigkeit die Masse des wagenbaulichen Teiles zugunsten der elektrischen Ausrüstung beträchtlich verringert werden. Bei einigen Bauarten wird der Hauptrahmen unterteilt, so daß auch für schwere Güterzuglokomotiven mit mehr als sechs Achsen noch eine gute Bogenläufigkeit gesichert ist (z. B. E 95 mit der Achsfolge 1'Co + Co1').

2.141 Zug- und Stoßvorrichtung

Am Rahmen sind die Zug- und Stoßvorrichtungen befestigt. Sie entsprechen der bei Dampflokomotiven üblichen Ausführung, so daß es sich erübrigt, an dieser Stelle auf Einzelheiten

näher einzugehen. Alle wesentlichen Maße werden durch die „Technischen Vereinbarungen über den Bau und den Betrieb von Hauptbahnen (TV)" und die BO im einzelnen genau vorgeschrieben. Bei Drehgestell-Lokomotiven sind die Zug- und Stoßvorrichtungen im allgemeinen am Brückenrahmen angebracht. Es gibt jedoch auch Ausführungen, bei denen diese Teile am Drehgestellrahmen befestigt sind, z. B. Baureihe E 44, E 93 und E 94. In diesem Falle müssen die Drehzapfen sämtliche Längskräfte aufnehmen, falls die beiden Drehgestelle nicht durch eine besondere Kupplung miteinander verbunden sind. Diese Kupplung hat zugleich die Aufgabe, einen evtl. Spießgang der Drehgestelle zu vermeiden und dadurch die Bogenläufigkeit der Lokomotive und ihre Laufruhe bei hohen Geschwindigkeiten zu verbessern.

2.142 Abstützung des Lokomotivkastens

Bei der Abstützung des Brückenrahmens auf die Drehgestelle ist darauf zu achten, daß sich die Last des Kastenaufbaues richtig auf die einzelnen Achsen verteilt und daß auch die Bogenläufigkeit in keiner Weise eingeschränkt wird. Falls die beiden Drehzapfen die Last auf die Drehpfannen der Drehgestelle übertragen, so werden meist noch seitliche Gleitstücke vorgesehen, die nur einen kleinen Teil der Last übernehmen und ein Kippen des Kastens verhindern sollen. Die Drehzapfenlager sind im allgemeinen seitenbeweglich und mit einer Rückstellvorrichtung versehen.
Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, den Lokomotivkasten über seitliche Pendelstützen abzufangen. Der Drehzapfen wird in diesem Falle nicht durch vertikale Kräfte belastet und dient lediglich zur Führung. Wird ein dritter Stützpunkt vorgesehen, so befindet sich dieser in der Mitte der Rahmenenden. Alle Abstützungen sind mit nachstellbaren Federn ausgerüstet.

2.2 Lokomotivkasten

Der Kasten sitzt bei einteiligen Fahrzeugen auf dem Rahmen, bei Drehgestell-Lokomotiven auf der Brücke. Er ist im allgemeinen einteilig, nur bei älteren Lokomotiven bestand der Kasten manchmal aus mehreren Teilen, die dann durch Faltenbälge miteinander verbunden waren (z. B. Baureihe E 77, siehe Bilder 19 und 50). Der Kasten nimmt an den beiden Enden die Führerstände auf, während in dem mittleren Teil die gesamte elektrische Ausrüstung untergebracht wird. Bei manchen elektrischen Lokomotiven sind auch verschiedene Zubehörteile an den Stirnseiten in kleinen Vorbauten untergebracht, die jedoch nur halbhoch sind und daher die Sichtverhältnisse nicht beeinträchtigen (siehe Bilder 219 bis 223 und 227 bis 230). Um den Luftwiderstand, der besonders bei Geschwindigkeiten über 100 km/h einen beträchtlichen Teil der aufgewendeten Energie verbraucht, möglichst klein zu halten, gab man früher bei Schnellzuglokomotiven dem Kastenaufbau eine windschnittige Form (siehe Bilder 92 und 224). Bei neueren Konstruktionen ist es dagegen üblich, nur die Kanten des Kastenaufbaues abzurunden und den oberen Teil der Stirnwand leicht nach hinten zu neigen (siehe Bilder 231 bis 244).

2.21 Aufbau des Kastens

Die Konstruktion der Lokomotivkästen hat in den letzten Jahren eine beträchtliche Änderung erfahren. Während es früher allgemein üblich war, für die Seitenwände ein Winkel-

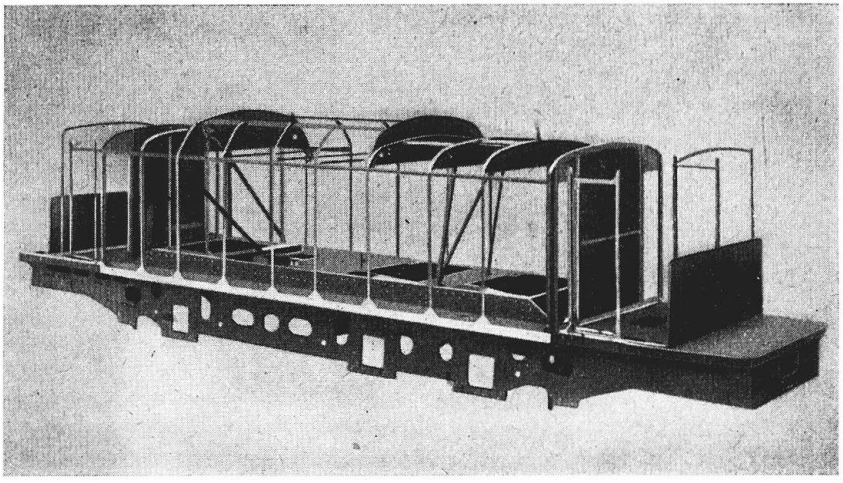


Bild 36. Rahmen einer elektrischen Lokomotive mit Kastengerippe (ältere Bauart)

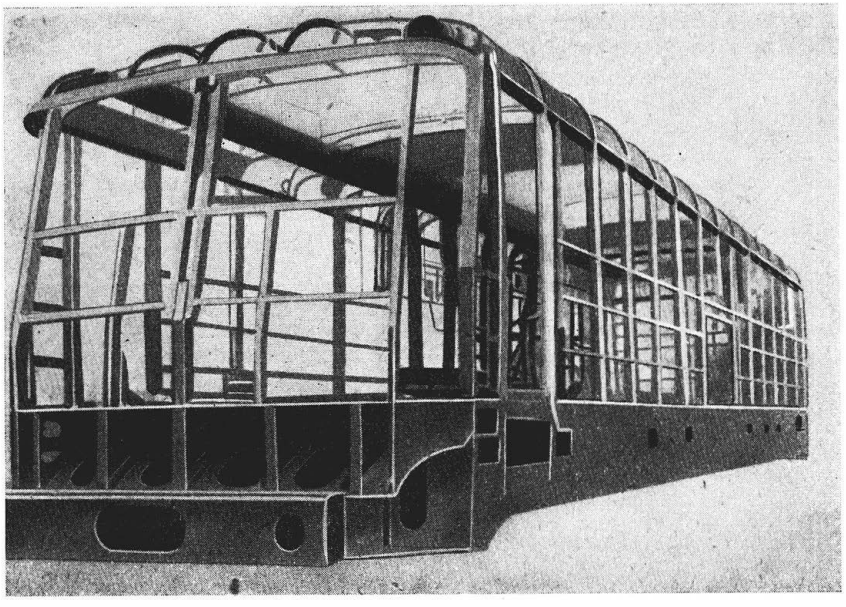


Bild 37. Lokomotivkasten während des Baues

eisengerippe zu verwenden und dieses mit Blechen zu verkleiden (Bild 36), werden heute die Seitenwände zum Tragen mit herangezogen und mit dem Rahmen und dem Dach fest verschweißt (Bild 37). Das Dach ist daher auch nicht mehr abnehmbar, sondern hat lediglich mehrere große Ausschnitte, um die schweren Bauteile, wie z. B. den Transformator und evtl. auch die Fahrmotoren mit dem Kran ein- und ausbauen zu können. Anstelle des Kastengerippes aus Profilstählen werden Spanten eingebaut, die aus dünnen Blechen hergestellt werden und dem Kasten eine hohe Steifigkeit verleihen. Um beim Anheben der Lokomotive ein Verbiegen des Rahmens und ein Beschädigen des Kastens zu vermeiden, sind oft besondere Aufhängeösen vorgesehen.

2.22 Führerstand

Im allgemeinen befindet sich an jedem Lokomotivende ein Führerstand. Er ist über seitliche Leitern zu erreichen, die Türen schlagen nach innen auf. Die Führerstände sind hell und geräumig, sie können ausreichend gelüftet und geheizt werden und bieten somit zu jeder Jahreszeit dem Lokomotivpersonal günstige Arbeitsbedingungen. Große Fenster in den Stirn- und Seitenwänden ermöglichen eine einwandfreie Streckenübersicht. Sämtliche

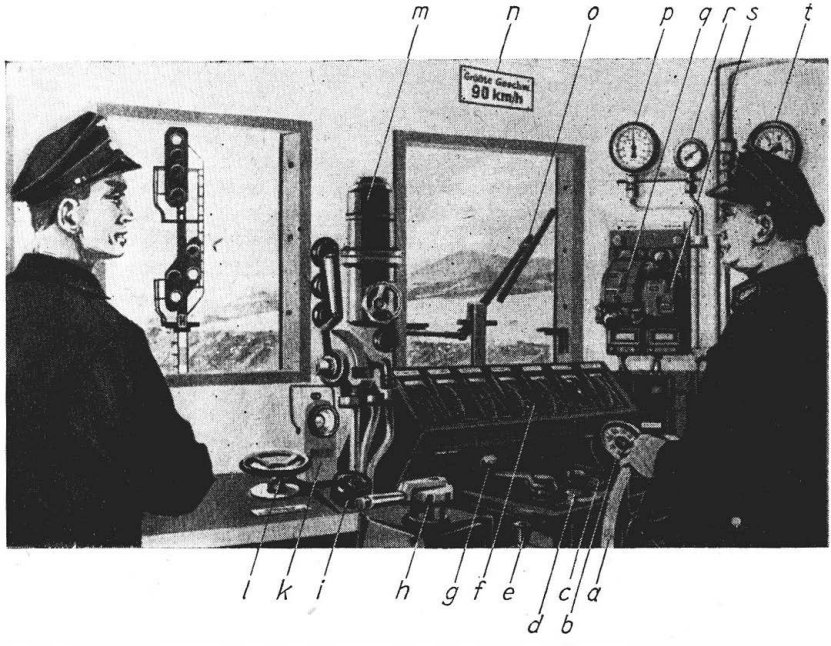


Bild 38. Führerstand einer elektrischen Lokomotive (ältere Bauart)

a Handrad b Geschwindigkeitsmesser c Fahrstufen-Anzeiger d Schnellabschaltknopf e Sifa-Knopf f Meßinstrumente für Fahrdrahtspannung, Gesamtstrom, Motorstrom, Bremsstrom usw. g Fahrtrichtungswender h Führerbügelventil i Abblendschalter für Signalleuchten k Handlampe l Elektrische Zugheizung m Antrieb für Scheibenwischer n Tafel für zulässige Höchstgeschwindigkeit o Scheibenwischer p Manometer für Hauptluftleitung q Handschalter für Lüfter r Manometer für Hauptluftbehälter s Handschalter für Luftpresser t Manometer für Bremszylinder

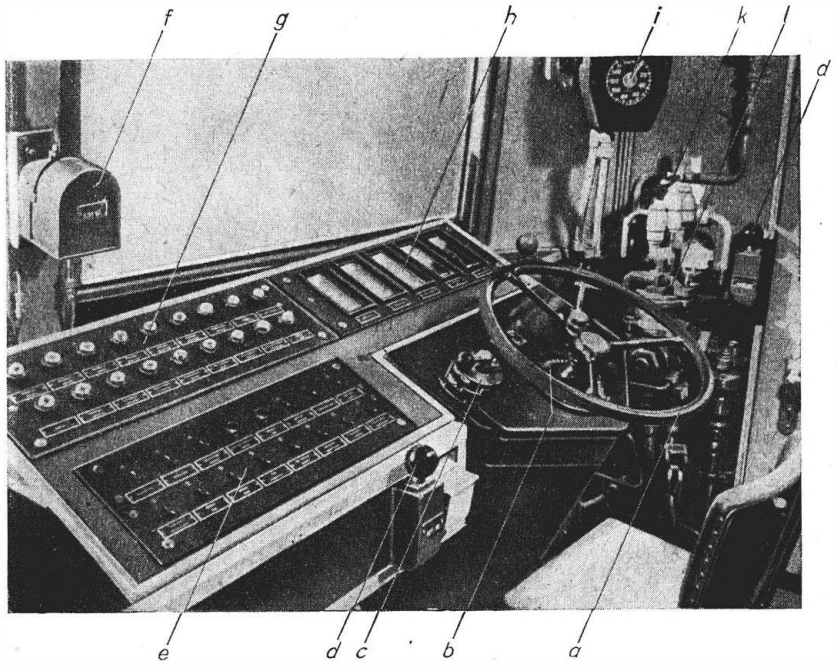


Bild 39. Führerstand einer neuzeitlichen elektrischen Lokomotive

a Handrad b Fahrstufen-Anzeiger c Fahrtrichtungswender d Sifa-Knopf e Schalter für Beleuchtung und Hilfsbetriebe f Sifa-Störschalter g Kontrollampen h Spannungs- und Strommesser i Geschwindigkeitsmesser k Luftpfeife l Führerbremsventil

Instrumente und Bedienungshebel sind auf der in Fahrtrichtung rechten Seite des Führerstandes angeordnet und bei neueren Lokomotiven so eingerichtet, daß sie auch im Sitzen bequem abgelesen und bedient werden können (Bild 38). Den Aufbau eines modernen Führerstandes zeigt Bild 39.

2.23 Maschinenraum

Der Maschinenraum ist durch Zwischenwände abgeteilt und kann von ein oder zwei seitlichen Durchgängen aus betreten werden. Er nimmt die gesamte elektrische Ausrüstung der Lokomotive und einen großen Teil der Hilfseinrichtungen auf. Das Dach trägt die Stromabnehmer, den Hauptschalter und andere Ausrüstungsteile. Außer den Fenstern sind in den Seitenwänden des Maschinenraumes nach jalousieartige Luftklappen vorhanden, durch welche die Kühlluft für den Transformator und die Fahrmotoren angesaugt wird. Diese Öffnungen sind im allgemeinen auf der Innenseite mit einem Drahtgeflecht abgedeckt, um das Ansaugen von Schnee, Laub, Insekten usw. zu vermeiden.

2.3 Triebwerk

Das Triebwerk hat die Aufgabe, das Drehmoment des Motors auf eine oder mehrere miteinander gekuppelte Achsen zu übertragen. Da der Elektromotor bereits eine Dreh-

bewegung aufweist, braucht diese nur weitergeleitet zu werden. Es ist nicht wie bei den Dampflokomotiven erforderlich, eine hin- und hergehende Bewegung in eine drehende zu verwandeln. Um die Gleisanlagen zu schonen und einen ruhigen Lauf der Lokomotive auch bei hohen Geschwindigkeiten zu erreichen, ist man bestrebt, einen möglichst großen Teil der Lokomotivlast abzufedern und die ungefederten Massen so klein wie irgend möglich zu halten. Der Fahrmotor soll deshalb im abgefederten Teil, also im Haupt- oder Drehgestellrahmen, untergebracht werden. Dann aber muß das Triebwerk, das den gefederten Motor mit dem ungefederten Radsatz verbindet, das Spiel der Tragfedern ausgleichen können.

Außerdem wird verlangt, daß der Fahrmotor durch das Triebwerk in seinen Abmessungen nicht beschränkt wird und im Vergleich zu seiner Größe und zu seiner Masse eine möglichst große Leistung aufweist. Das setzt jedoch voraus, daß die zulässige Ankerumfangsgeschwindigkeit ausgenutzt wird, die durch die Fliehkraft begrenzt ist und maximal etwa 60···70 m/s beträgt. Auch soll das Triebwerk möglichst einfach aufgebaut sein, die Herstellungskosten der Lokomotive nicht wesentlich verteuern, unbedingt betriebssicher arbeiten und möglichst ohne Wartung und Schmierung auskommen.

Es ist verständlich, daß während der jetzt mehr als 75jährigen Entwicklung der elektrischen Lokomotiven die verschiedenartigsten Antriebe erprobt worden sind. Während bei der ersten kleinen Lokomotive von Siemens die Achsen über ein Kegelradgetriebe von dem in Fahrtrichtung liegenden Motor angetrieben wurden, ordnete man später die Fahrmotoren stets parallel zu den Achsen an und stellte die gegenseitige Verbindung durch Seile, Drahtwendeln und Ketten her. Da diese Antriebe jedoch alle nicht befriedigten, wurden dann die verschiedensten Arten von Stangenantrieben ausprobiert, bis sich die Erkenntnis durchsetzte, daß für leistungsfähige und schnellfahrende elektrische Lokomotiven nur noch der Einzelachsantrieb in Frage kommt.

Trotz zahlreicher Versuche muß heute festgestellt werden, daß alle bisherigen Ausführungen den obengenannten Bedingungen nur annähernd entsprechen und in ihrem Aufbau zum Teil recht kompliziert sind.

2.31 Stangenantrieb

Der Stangenantrieb zählt zu den ältesten Antriebsarten und wurde von der Dampflokomotive übernommen. Bei allen Stangenantrieben werden mehrere Radsätze unmittelbar oder über ein Vorgelege von ein oder zwei Motoren oder Motorgruppen angetrieben. Man unterscheidet hierbei Treibstangen, die an der Motor- oder Vorgelegekurbel angelenkt sind und Kuppelstangen, welche die einzelnen angetriebenen Radsätze miteinander verbinden. Stangenantriebe werden heute nur noch in Sonderfällen gebaut, sie sollen jedoch kurz erwähnt werden, da sich aus ihrem Aufbau gewisse grundsätzliche Fragen leicht erklären lassen.

2.311 Stangenantrieb ohne Vorgelege

Diese Ausführung setzt voraus, daß der Motor stets mit der gleichen Drehzahl umläuft wie die Treibachse. Beide sind durch eine Treibstange miteinander verbunden.

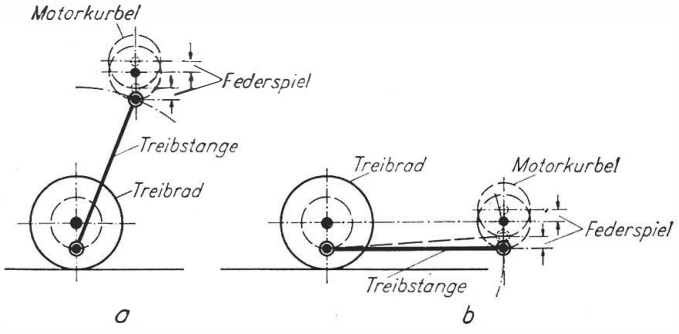


Bild 40
Einfacher Kurbeltrieb (Schema)

2.3111 Einfacher Stangenantrieb

In Bild 40 ist dieser Antrieb schematisch dargestellt. Es ist leicht zu erkennen, daß im vorliegenden Fall die Stange keine Kräfte übertragen kann, sobald die Stellung der Kurbeln mit der Verbindungslinie der Kurbelmitten zusammenfällt. Man muß also, um die durch den Kurbeltrieb bedingten Totpunktlagen überwinden zu können, auf jeder Seite ein derartiges Triebwerk anordnen und die beiden Kurbeln gegeneinander um 90° versetzen. Es gibt keine hin- und hergehenden Massen wie beim Triebwerk der Dampflokomotive. Die Fliehkräfte der umlaufenden Massen, zu denen die Treib- und Kuppelzapfen und auch die Treib- und Kuppelstangen gehören, können durch Gegengewichte ausgeglichen werden. Daher ist es üblich, das Kurbelblatt auf der dem Zapfen gegenüberliegenden Seite als Gegengewicht auszubilden. Bei allen Stangenantrieben sind die Fahrmotoren im Rahmen, also im abgefederten Teil der Lokomotive gelagert. Da infolge der geringen Drehzahl die Abmessungen des Motors verhältnismäßig groß werden, liegt bei einem leistungsfähigen Motor die Ankerwelle recht hoch, d. h. die Treibstange nimmt eine ziemlich steile, fast senkrechte Lage ein (Bild 40a). Während das untere Ende am Zapfen des ungefederten Treibrades befestigt ist, steht das obere Ende mit dem Kurbelzapfen des gefederten Motors in Verbindung, muß also dem senkrechten Federspiel folgen können. Dies ist jedoch ohne Längenänderung der Treibstange nicht möglich, da das obere Stangenende lediglich einen Kreis um den Zapfen am Treibrad mit einem Halbmesser gleich der Stangenlänge beschreiben kann. Dieser Antrieb entspricht also nicht den Bedingungen und kommt daher für eine praktische Verwendung auch nicht in Frage.
Wesentlich günstiger sind jedoch die Voraussetzungen, wenn die Treibstange bei tief angeordnetem Motor fast waagerecht liegt (Bild 40b). In diesem Fall weicht nämlich der Kreis um den Zapfen am Treibrad nur wenig ab von der senkrechten Bewegung der Motorkurbel, die durch das Federspiel bedingt ist. Dieser Antrieb, der in gewisser Hinsicht einen Vergleich mit der Dampflokomotive zuläßt, entspricht also den Bedingungen und findet auch in der Praxis Anwendung.

2.3112 Stangenantrieb mit Blindwelle

Will man jedoch einen großen Motor verwenden, der im Lokomotivkasten gelagert und daher jederzeit gut zugänglich ist, so verwendet man eine sogenannte Blindwelle, die in Höhe der Treibachsmitten fest im Rahmen gelagert ist (Bild 41).

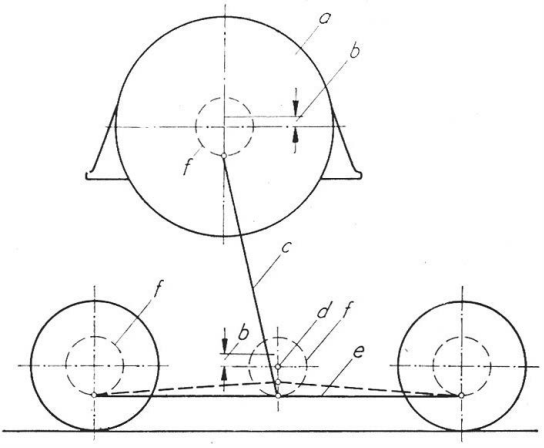


Bild 41
Stangenantrieb mit Blindwelle (Schema)

a Fahrmotor
b Federspiel
c Treibstange
d Blindwelle
e Kuppelstange
f Kurbelkreis

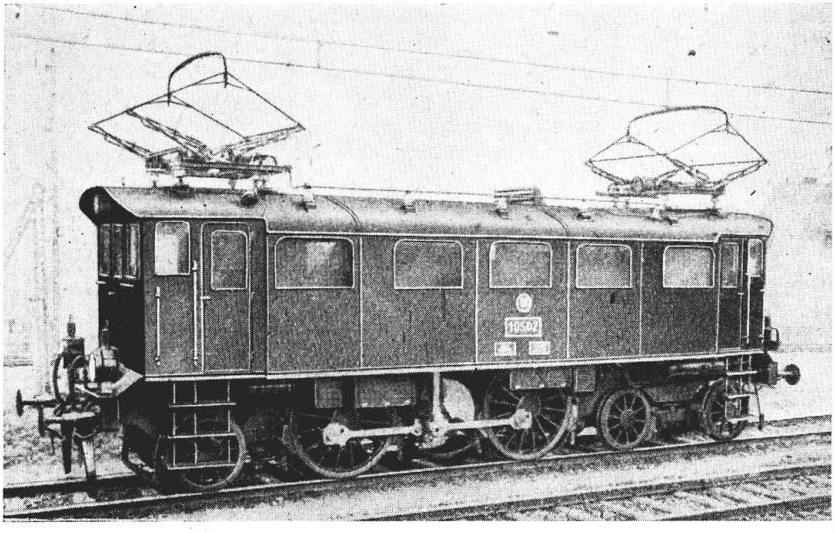


Bild 42. Schnellzuglokomotive mit einfachem Stangenantrieb

Die Treibstange verbindet dann zwei Kurbelzapfen miteinander, die beide im gefederten Teil liegen, so daß es unwichtig ist, ob sie senkrecht oder waagerecht angeordnet ist. Von der Blindwellenkurbel aus werden die Treibräder durch waagerecht liegende Kuppelstangen angetrieben, die durch leichtes Neigen jederzeit in der Lage sind, das Federspiel auszugleichen.

Ein solches Triebwerk, d. h. Stangenantrieb ohne Vorgelege mit einer Blindwelle, wurde erstmalig bei einer 2' B 1'-Schnellzuglokomotive angewendet, die im Jahre 1911 auf der

Strecke Dessau–Bitterfeld eingesetzt wurde (Bild 42). Auch die elektrischen Lokomotiven der Baureihen E 36 (Achsfolge 1'C2'), E 60[1] (1'C) und E 62 (1'C1'), die in den Jahren 1912 bis 1914 entwickelt wurden, waren mit einem derartigen Stangenantrieb ausgerüstet.

2.3113 Zweistangenantrieb

Wird jedoch ein derartiger Antrieb für eine elektrische Lokomotive mit großer Leistung gewählt, so fallen mit Rücksicht auf die großen Treibkräfte die Zapfen, die Blindwelle und auch sämtliche Stangen verhältnismäßig schwer aus. Man verwendet daher bei großen Leistungen zweckmäßig den Zweistangenantrieb, dessen Aufbau aus Bild 43 zu erkennen ist. Am Motorkurbelzapfen greifen dann zwei Treibstangen an, und diese bilden ein Dreieck mit den Kuppelstangen, die sämtliche angetriebenen Radsätze miteinander verbinden. Da man in diesem Falle auch eine zweite Blindwelle verwendet, können sämtliche Zapfen und Stangen bedeutend leichter ausfallen, und auch die Motorwelle wird günstiger beansprucht. Einen solchen Aufbau finden wir bei der Deutschen Reichsbahn erstmalig bei der Gattung EP 235, der späteren Baureihe E 50, einer im Jahre 1917 entwickelten Personenzuglokomotive ($V_{max} = 90$ km/h) mit der Achsfolge 2'D1' und bei der Baureihe E 06, einer im Jahre 1922 gebauten Schnellzuglokomotive ($V_{max} = 110$ km/h) mit der Achsfolge 2'C2' (Bild 44).

Für langsamfahrende Güterzuglokomotiven ist dieses Triebwerk ohne Vorgelege jedoch nicht recht geeignet, da es schwierig ist, die maximale Ankerumfangsgeschwindigkeit (60···70 m/s) auszunutzen, ohne die Drehzahl des Motors, die bekanntlich der Umdrehung der Treibräder entspricht, zu sehr zu steigern. Diese ist nämlich mit Rücksicht auf die großen Fliehkräfte der Stangen und die Lebensdauer der Stangenlager begrenzt und soll

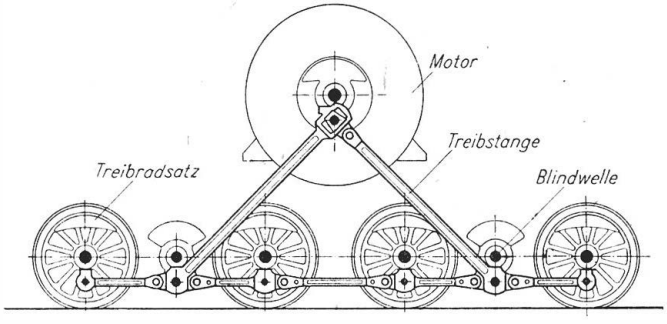


Bild 43
Zweistangenantrieb

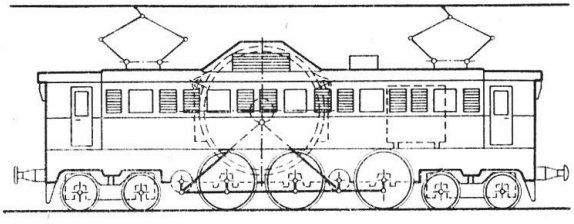


Bild 44
Schnellzuglokomotive mit Zweistangenantrieb (Baujahr 1922)

$n = 400$ U/min nicht übersteigen. Wählt man die Ankerumfangsgeschwindigkeit $v_A = 58$ m/s, so ergibt sich für den

$$\text{Ankerdurchmesser } d = \frac{v_A\, 60}{\pi\, n} = \frac{58 \cdot 60}{\pi\, 400} = 2{,}80 \text{ m}\,.$$

Ein Ankerdurchmesser von 2,80 m entspricht jedoch einem Durchmesser des Motorgehäuses von etwa 3,50 m, und es ist mit Rücksicht auf das Umgrenzungsprofil der Lokomotive nicht leicht, einen solch großen Motor unterzubringen. Berücksichtigt man dann noch, daß der Treibraddurchmesser D aus konstruktiven Gründen nicht kleiner gewählt werden kann als 1000 mm, so erhält man eine gute Ausnützung des Motors erst bei einer Fahrgeschwindigkeit

$$V = \frac{D\,\pi\, 400 \cdot 60}{1000} = 75 \text{ km/h}\,.$$

Diese wird jedoch im Güterzugdienst nur selten erreicht. Im Schnellzug- und Personenzugdienst besteht die Möglichkeit, durch Vergrößerung des Treibraddurchmessers auf etwa 1600 mm eine gute Ausnützung der Fahrmotoren zu erreichen.

Die Vereinigung der gesamten Lokomotivleistung in einem einzigen Fahrmotor führt zwar zu einem einfachen und übersichtlichen Aufbau der elektrischen Lokomotiven, doch ist die Herstellung eines solchen Motors recht teuer und auch die Unterhaltung in den Werkstätten sehr schwierig. So wies z. B. der Fahrmotor der E 06 als größter Einphasen-Lokomotivmotor mit einer Stundenleistung von 2780 kW einen Ankerdurchmesser von 2,8 m und einen Gehäusedurchmesser von 3,5 auf, während der etwas kleinere Motor der E 50 eine Stundenleistung von 2400 kW abgab und ohne Getriebe und Zahnradschutzkasten etwa 24 t wog. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß beim Schadhaftwerden des Antriebsmotors die gesamte Lokomotive ausfällt.

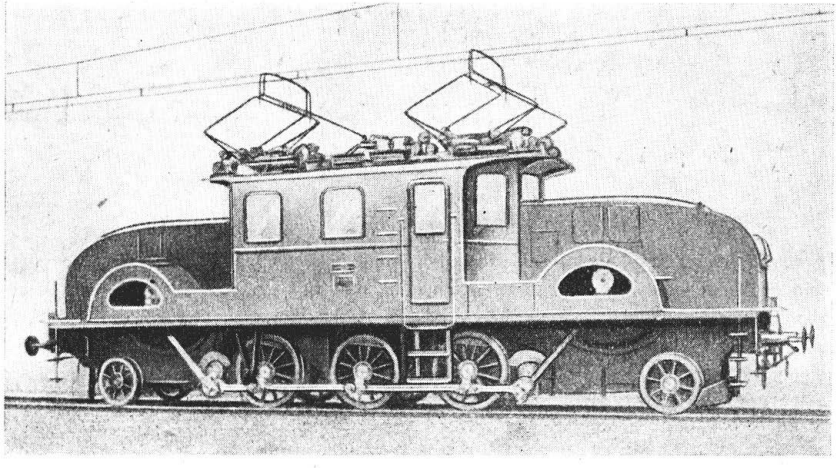


Bild 45. Personenzuglokomotive mit Zweimotorenantrieb (Baujahr 1911)

Diese Mängel konnten auch dadurch nicht beseitigt werden, daß man die gesamte Leistung auf zwei Fahrmotoren aufteilte. Bild 45 zeigt eine leichte Personenzuglokomotive (450 kW) mit der Achsfolge 1'C1', wie sie im Jahre 1911 auf der Strecke Dessau–Bitterfeld und nachher auf der Wiesentalbahn eingesetzt wurde. Dabei arbeiten die beiden Fahrmotoren über je eine Blindwelle auf eine gemeinsame Stangengruppe.
Bild 46 zeigt das Triebwerk einer neueren elektrischen Lokomotive mit etwa 3000 kW. Hierbei treibt jeder Fahrmotor ohne Vorgelege über eine Blindwelle nur eine Achsgruppe an, so daß sich die Achsfolge 2'BB2' ergibt.

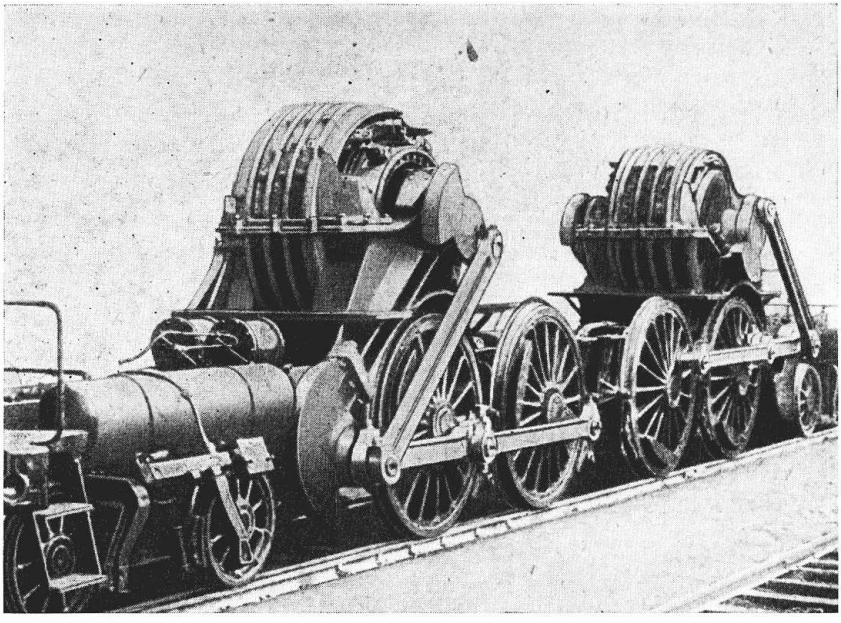


Bild 46. Fahrwerk einer elektrischen Lokomotive mit zwei getrennten Triebwerken

2.312 Stangenantrieb mit Vorgelege

Wesentlich zweckmäßiger ist es jedoch, anstelle eines großen Zentralmotors mehrere kleinere, schnellaufende Motoren zu verwenden, die über ein Vorgelege die Achsen antreiben. Dabei ist es nicht erforderlich, daß jede Achse von einem besonderen Motor angetrieben wird. Das kleine Zahrad, das Ritzel, sitzt im allgemeinen auf der Motorwelle, während das große Zahnrad auf die Vorgelegewelle aufgekeilt ist. Die Untersetzung richtet sich nach der Drehzahl des Motors, der Fahrgeschwindigkeit und dem Treibraddurchmesser und schwankt zwischen 1:2,5 und 1:4,9. Ganzzahlige Verhältnisse, z. B. 1:3 oder 1:4 sind nicht üblich, um das Aufeinandertreffen derselben Zähne nach wenigen Umdrehungen zu vermeiden.

Die Zahnräder bzw. die Zahnkränze werden aus hochwertigem Stahl hergestellt, und es empfiehlt sich, die Zähne nach dem Fräsen zu härten und zu schleifen, um eine möglichst große Lebensdauer zu erzielen. Die gerade Verzahnung ist einfach und billig, hat jedoch den Nachteil, daß bei doppelseitigem Antrieb die Zähne evtl. nicht gleichmäßig belastet werden. Man bevorzugt dann die Schrägverzahnung und wählt für beide Vorgelege die entgegengesetzte Zahnneigung, so daß sich die Seitenkräfte aufheben. Der Motorwelle mit den beiden Ritzeln gibt man ein gewisses Seitenspiel und erreicht dadurch eine gleichmäßige Belastung der beiden Vorgelege. Schrägverzahnung ermöglicht auch ein besseres Aneinanderschmiegen der Zahlenflanken und dadurch einen geräuschärmeren Lauf und eine geringere Abnutzung.
Um harte Stöße, die besonders beim Anfahren auftreten, zu vermeiden, wurde bei einigen Lokomotivbauarten in die Vorgelege eine besondere Federung eingebaut. Diese kann in dem Ritzel, aber auch in dem großen Vorgelege-Zahnrad untergebracht werden. Der Zahnkranz ist dann etwas drehbar gegenüber der Zahnradnabe oder der Welle, auf der das Zahnrad sitzt. Die Kraftübertragung erfolgt dann über Blatt- oder Schraubenfedern, die diese beiden Teile miteinander verbinden. Um die Zähne gut schmieren zu können und Schäden durch Fremdkörper zu vermeiden, wird das Vorgelege in einem dicht schließenden Schutzkasten untergebracht. Dieser wird mehrteilig, aus Blech oder Leichtmetall hergestellt und ist teilweise mit Öl gefüllt, um durch eine ständige Schmierung der Zahnflanken eine möglichst lange Lebensdauer der Zahnräder zu erreichen.
Bei den kombinierten Zahnrad-Stangenantrieben sitzt der Motor bzw. der Doppelmotor mit der Vorgelegewelle meist in einem gemeinsamen Stahlgehäuse, das mit dem Rahmen fest verbunden und somit vollkommen abgefedert ist.

2.3121 Kuppelantrieb

Die einfachste Art ist der Kuppelantrieb mit Vorgelege (Bild 47). Dabei werden die Treibräder mit Hilfe von waagerecht liegenden Kuppelstangen von der Vorgelegewelle aus angetrieben, die gleichzeitig die Aufgaben einer Blindwelle übernimmt. Nachteilig ist dabei, daß wegen der Profilfreiheit der Durchmesser des Vorgelegezahnrades wesentlich kleiner sein muß als der Treibraddurchmesser, so daß nur kleine Motoren verwendet werden können. Im Fahrzeugpark der Deutschen Reichsbahn fand dieser Antrieb z. B. bei den elektrischen Lokomotiven der Baureihen E 33 (1'C1') und E 42 (B'B') Anwendung, die in den Jahren 1923/24 erstmalig gebaut wurden.

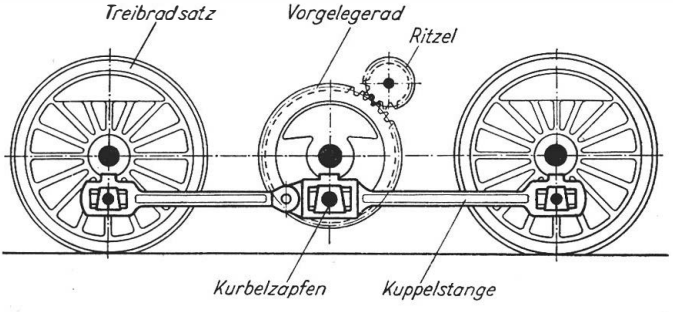


Bild 47
Kuppelantrieb mit Vorgelege

2.3122 *Kurbelschleifenantrieb*

Will man jedoch leistungsfähigere Motoren und somit ein größeres Vorgelegezahnrad einbauen, so ist der Kurbelschleifenantrieb nach Bild 48 am zweckmäßigsten. Bei diesem liegt die Vorgelegewelle um etwa 100···150 mm höher als die Treibradmitte. Die Zapfen der beiden Treibachsen sind dann auf jeder Seite durch eine dreieckförmige Kurbelschleife (Schlitzkuppelstange) verbunden. Das mittlere Lager umfaßt den Vorgelegekurbelzapfen, der sich in einer Aussparung der Stange in senkrechter Richtung frei bewegen kann. Dieser Antrieb kam z. B. bei den B′ B′-Lokomotiven der Baureihen E 70 und E 71 und den C′C′-Lokomotiven der Baureihe E 99 zur Anwendung.

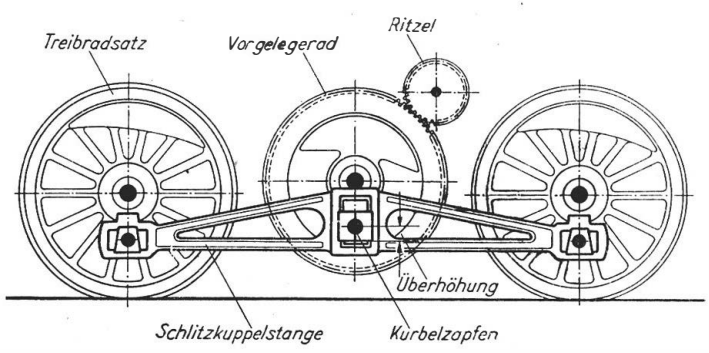


Bild 48
Kurbelschleifenantrieb

2.3123 *Schrägstangenantrieb*

Eine weitere Überhöhung und damit den Einbau noch größerer und leistungsfähigerer Motoren gestattet der Schrägstangenantrieb nach Bild 49. Die Treibstange liegt hierbei nicht waagerecht, sondern etwas schräg und wird daher möglichst lang ausgeführt. Sie endet unten in einer Gabel und ist an die Kuppelstangen angelenkt. Im Fahrzeugpark der Deutschen Reichsbahn fand diese Triebwerksanordnung bei den elektrischen Lokomotiven der Baureihen E 61 (Achsfolge D), E 63 (C), E 75 (1′BB1′) und E 77 (1 B) (B 1) Anwendung. Eine elektrische Lokomotive der Baureihe E 77 zeigt Bild 50, eine schwere Güterzuglokomotive der Schweizerischen Bundesbahn Bild 51.

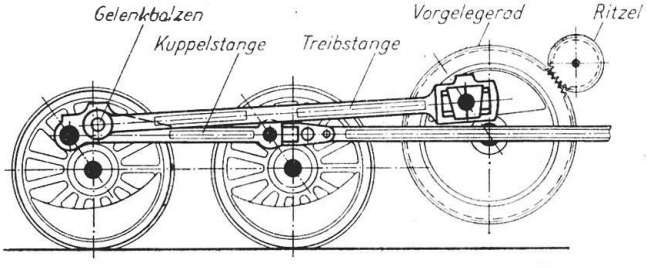


Bild 49
Schrägstangenantrieb

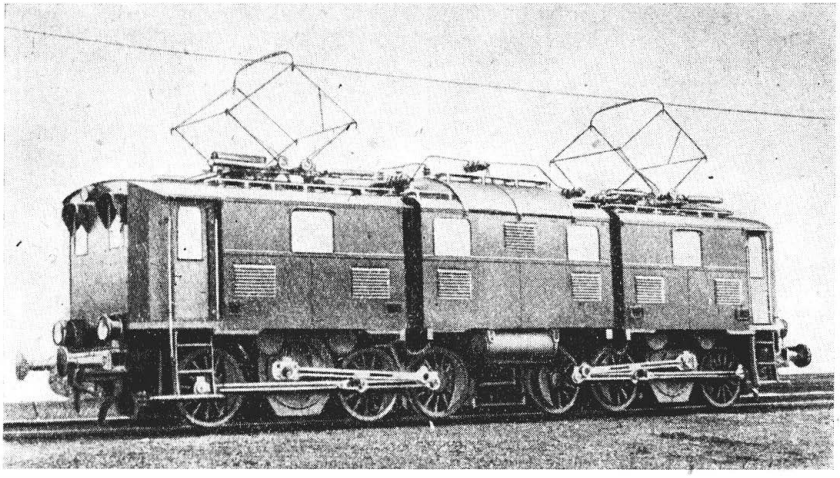


Bild 50. Elektrische Lokomotive der Baureihe E 77 mit Schrägstangenantrieb

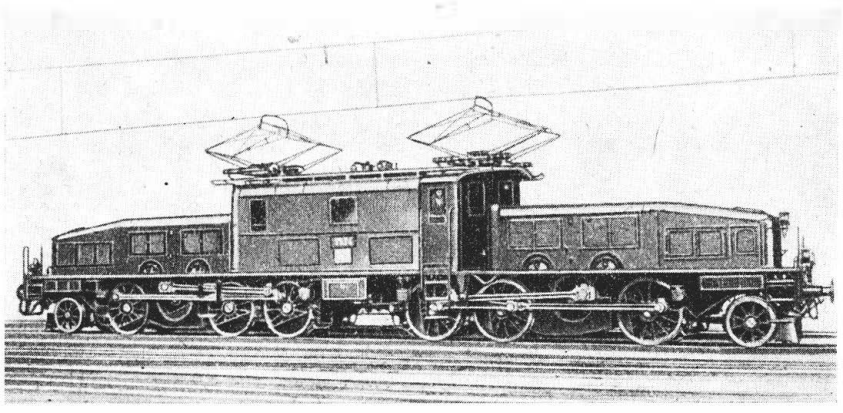


Bild 51. Schwere Güterzuglokomotive mit Schrägstangenantrieb

2.3124 Antrieb mit hochliegendem Motor

Es besteht jedoch auch bei Stangenantrieben mit Vorgelege die Möglichkeit, die Antriebsmotoren mit den Vorgelegezahnrädern hoch im Lokomotivkasten zu lagern, so daß der Durchmesser des großen Zahnrades vom Treibraddurchmesser völlig unabhängig wird (Bild 52). An den Kurbelzapfen der Vorgelegewelle greifen dann an beiden Seiten die Treibstangen an, welche die Leistung über eine Blindwelle und Kuppelstangen auf die Treibräder übertragen. Bei der Deutschen Reichsbahn fand diese Anordnung bei den elek-

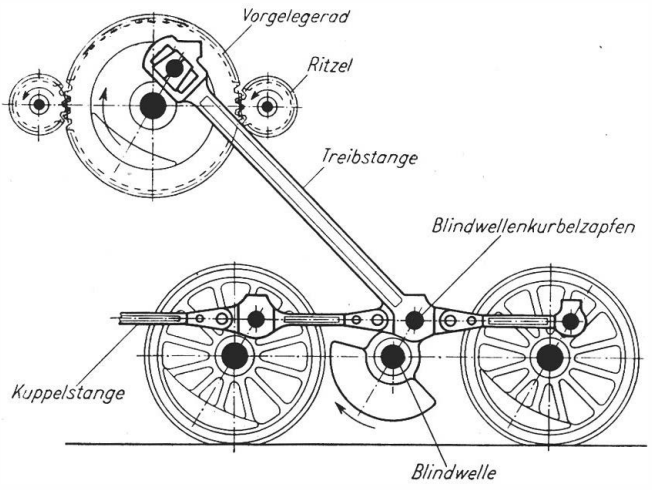


Bild 52
Stangenantrieb mit Vorgelege und Blindwelle

trischen Lokomotiven der Baureihen E 32 (1'C1') und E 52 (2'BB2') Anwendung. Die letztgenannte Lokomotive hat also zwei gleiche Triebwerke, von denen jedes die Hälfte der gesamten Lokomotivleistung zu übertragen hat. Bei besonders leistungsfähigen Lokomotiven besteht auch hier die Möglichkeit, hochliegende Vorgelegemotoren und Zweistangenantrieb zu verwenden, wie er im Abschnitt 2.3113 beschrieben wurde.

Bei sämtlichen Stangenantrieben ist streng darauf zu achten, daß alle Stichmaße genau eingehalten werden, da es sonst zu Zerrungen der Stangen und zu Stößen kommt, die eine starke Lagerabnutzung, einen unruhigen Lauf der Lokomotive und unter Umständen sogar schwere Zerstörungen zur Folge haben können. Das Spiel zwischen Zapfen und Stangenlagerbohrung darf nicht zu groß sein; denn bei jeder Umdrehung wechselt die Richtung der Kraft in der Stange, und der Kurbelzapfen schlägt dann bei jeder Umdrehung zweimal gegen das Stangenlager. Da auch die Stangen nicht völlig starr sind, sondern infolge der wechselnden Beanspruchung und der großen Zentrifugalkräfte ein wenig durchfedern, können leicht Schüttelschwingungen auftreten, die sämtliche Triebwerksteile sehr stark beanspruchen. Aus diesem Grunde werden in letzter Zeit schnellfahrende elektrische Lokomotiven mit großer Leistung nicht mehr mit Stangenantrieben ausgerüstet, auch wenn diese gegenüber den elektrischen Lokomotiven mit Einzelachsantrieb weit weniger zum Schleudern neigen.

2.32 Einzelachsantrieb

Neuzeitliche elektrische Triebfahrzeuge werden grundsätzlich mit Einzelachsantrieben ausgerüstet, d. h., jede Treibachse wird von einem Motor oder einer Motorgruppe angetrieben. Daher hat eine solche Lokomotive stets mehrere kleinere Motoren, wodurch es möglich ist, die Anschaffungs- und die Unterhaltungskosten wesentlich zu senken. Bei Ausfall eines Motors kann der Zug dann mit geringerer Leistung, d. h. mit niedrigerer Geschwindigkeit weiterbefördert werden.

2.321 Antrieb durch Achsmotor

Dieser Antrieb ist außerordentlich einfach und wurde schon in den Anfangsjahren der elektrischen Zugförderung, vor allem in Amerika, verwendet. Es gibt verschiedene Ausführungen:

2.3211 Direkter Achsmotorantrieb

Der rotierende Teil des Motors, der Anker, sitzt dabei fest auf der Achswelle und überträgt das Drehmoment auf die Achse, ohne daß irgendwelche Getriebeteile erforderlich sind (Bild 53). Wegen der außerordentlichen Einfachheit wurde dieser Antrieb bei den ersten

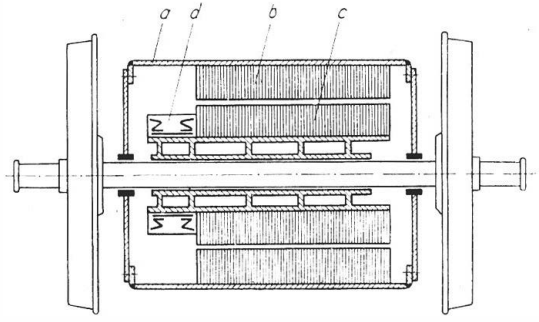


Bild 53
Achsmotor (Schema)
a Motorgehäuse
b Ständer
c Läufer
d Kommutator

elektrischen Triebfahrzeugen gern angewendet, doch zeigten sich bald sehr schwerwiegende Mängel. Da der Abstand zwischen Anker und Ständer stets gleich sein muß, konnte man auch das Motorgehäuse nicht im gefederten Rahmen aufhängen, so daß die ungefederten Massen durch das gesamte Motorgewicht beträchtlich vergrößert wurden. Mit Rücksicht auf die Bodenfreiheit der Lokomotive waren die Fahrmotoren in ihren Abmessungen stark beschränkt. Da der Ankerdurchmesser nur etwa 70 % des Treibraddurchmessers betragen durfte, wurde die zulässige Ankerumfangsgeschwindigkeit bei weitem nicht erreicht, wodurch die Motoren schlecht ausgenutzt wurden. Als weiterer Nachteil kam hinzu, daß sich auch die tiefe Schwerpunktlage dieses Antriebes auf die Laufeigenschaften der Lokomotiven sehr nachteilig auswirkte, so daß man bereits um die Jahrhundertwende von diesem Antrieb abging.

2.3212 Achsmotorantrieb mit gefederter Hohlwelle

Bei diesem Antrieb wurden die ungefederten Massen dadurch vermindert, daß man den Motor im gefederten Fahrgestell aufhängte und der Anker auf einer Hohlwelle saß, welche die Achswelle mit einem allseitigen Spiel umschloß. Bild 54 zeigt einen horizontalen Schnitt durch diesen Antrieb. Die Übertragung des Drehmomentes von der Hohlwelle auf den Radsatz erfolgte dann durch eine allseitig bewegliche Kupplung, die in der Lage war, das Federspiel auszugleichen.

Bild 55 zeigt eine Federkupplung, die von der Firma AEG für die Schnelltriebwagen entwickelt wurde, die im Jahre 1903 auf der Strecke Marienfelde–Zossen eine Geschwindigkeit von über 200 km/h erreichten. Diese Kupplung besteht auf jeder Seite aus sechs radial

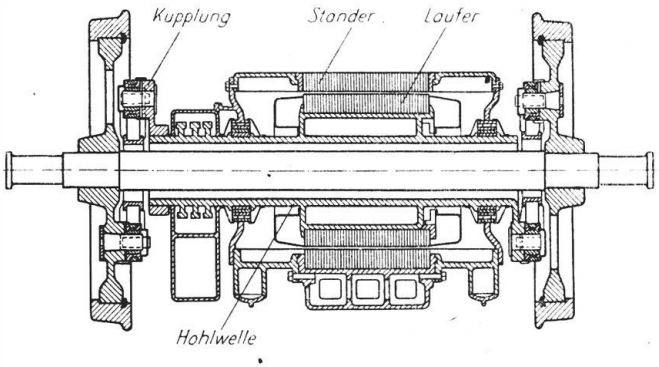


Bild 54
Achsmotor mit gefederter Hohlwelle

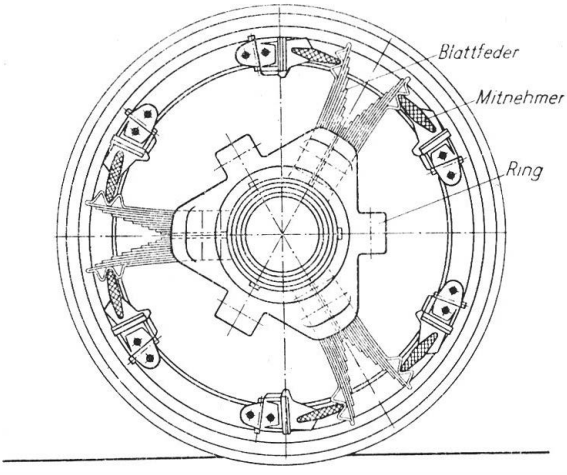


Bild 55
Federkupplung für Achsmotor

stehenden Blattfedern, von denen entsprechend der Fahrtrichtung jeweils drei das Drehmoment auf den Radsatz übertragen. Die Federn sind in einem dreiteiligen, auf der Hohlwelle sitzenden Ring gelagert und stützen sich gegen besondere Mitnehmer an den Treibrädern ab. Auch bei dieser Ausführung ist kein Untersetzungsgetriebe vorhanden. Daher konnte auch der Antrieb durch Achsmotoren mit gefederter Hohlwelle den steigenden Anforderungen nicht länger entsprechen und ist heute nicht mehr zu finden. Für elektrische Lokomotiven mit Einzelachsantrieb werden nur noch Tatzlager- oder Gestellmotoren verwendet.

2.322 Antrieb durch Tatzlagermotor

Der Tatzlagerantrieb ist eine der ältesten und verbreitetsten Antriebsarten für elektrische Triebfahrzeuge. Er wurde ursprünglich für Straßenbahnen entwickelt, wo er auch heute noch fast ausschließlich verwendet wird. Da der Anker infolge der Untersetzung zwischen

Motor und Treibachse eine wesentlich größere Drehzahl hat als bei einem Achsmotor, ist es auch bei langsamfahrenden elektrischen Lokomotiven möglich, die zulässige Ankerumfangsgeschwindigkeit voll auszunutzen.

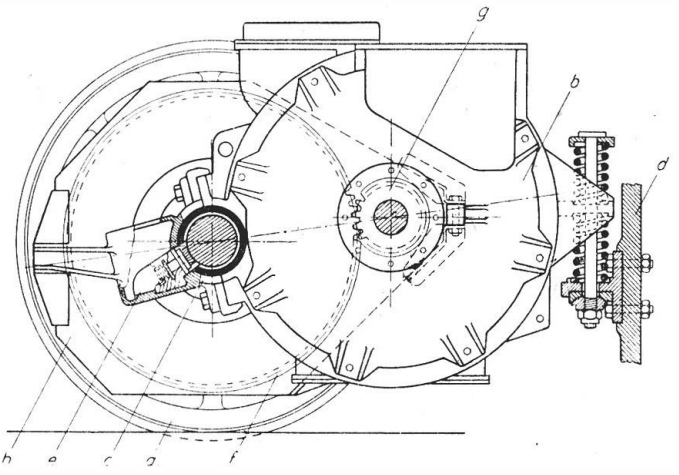


Bild 56
Tatzmotorantrieb
a Treibradsatz
b Tatzlagermotor
c Tatzlager
d Lokomotivrahmen
e Polsterschmierung
f Vorgelegerad
g Motorritzel
h Zahnradschutzkasten

2.3221 Direkter Tatzlagerantrieb

Der Motor liegt dabei ungefähr waagerecht parallel zur Achse und stützt sich auf der einen Seite mit zwei angegossenen Tatzlagern auf die Treibachse auf, während er auf der anderen Seite unter Zwischenschaltung von Federn am gefederten Rahmen aufgehängt ist (Bilder 56 und 57). Die Tatzlager sind dabei meist als Gleitlager mit Polsterschmierung, neuerdings jedoch auch als Wälzlager ausgebildet (Bild 58). Sie umschließen die Achswelle des Treibradsatzes und übertragen auf sie ungefähr die Hälfte des Motorgewichtes. Auf der Treibachswelle bzw. auf der verbreiterten Nabe eines Rades sitzt auch noch unmittelbar neben dem Radkörper das große Vorgelegezahnrad, in welches das Ritzel eingreift. Beträgt die Stundenleistung des Motors mehr als 350 kW, so ist es zweckmäßig, auf beiden Seiten ein derartiges Vorgelege zu verwenden. Die Zahnräder sind von einem Schutzkasten umgeben. Um den Platz für den Motor nicht auch noch durch den Lokomotivrahmen einzuschränken, werden bei Tatzlagerantrieb die Achsen stets in einem Außenrahmen gelagert.

Will man einen möglichst großen Motordurchmesser wählen, so empfiehlt es sich, die Motorwelle gegenüber der Achswelle ein wenig zu überhöhen, denn der Mindestabstand des Zahnradschutzkastens und des Motorgehäuses von der Schienenoberkante darf laut BO bei neuen Radreifen 100 mm nicht unterschreiten.

Dieser direkte Tatzlagerantrieb ist also in seiner Ausführung äußerst einfach und billig. Da durch die Tatzlager ein stets gleichbleibender Mittenabstand der beiden Zahnräder gewährleistet ist, arbeitet das Vorgelege ohne Störung. Auch ist der Ausbau der Treibachse mit oder ohne Motor mit Hilfe einer Achssenke in kurzer Zeit möglich. Der Tatzlagerantrieb ist daher für Straßenbahnen, S- und U-Bahnen und für langsamfahrende elektrische Lokomotiven mit kleiner Leistung zu empfehlen.

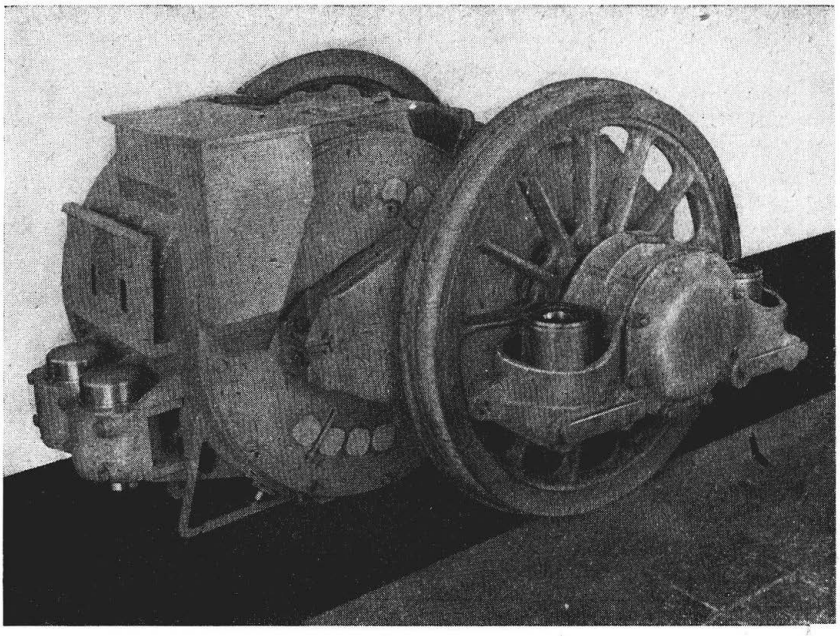


Bild 57. Treibradsatz mit Tatzmotor

Für Lokomotiven mit großer Leistung ist dieser Antrieb jedoch nicht recht geeignet, da die Masse eines Wechselstrommotors mit einer Stundenleistung von etwa 700 kW ungefähr 3,8 t und die eines Gleichstrommotors gleicher Leistung etwa 5,0 t beträgt. Berücksichtigt man, daß ungefähr die Hälfte dieser Masse unabgefedert auf der Treibachse liegt, die selbst eine beträchtliche Masse aufweist, und daß diese Achse noch die beiden schweren Zahnräder und auch die Schutzkästen trägt, so ist bei hohen Geschwindigkeiten die Stoßwirkung auf den Oberbau sehr nachteilig. Da sich bei größeren Gleisunebenheiten die Stöße auch recht ungünstig auf die Zahnräder auswirken, empfiehlt es sich, den Zahnkranz des großen Vorgelegezahnrades gegen Verdrehung abzufedern, wie dies z. B. bei der Baureihe E 95, einer schweren 1'Co + Co1'-Güterzuglokomotive der Deutschen Reichsbahn der Fall ist.

Hinzu kommt, daß natürlich auch der Tatzlagermotor durch die harten Stöße stark beansprucht wird, was an verhältnismäßig hohen Unterhaltungskosten zu erkennen ist. Ungünstig ist auch, daß die Tatzlagermotoren schwer zugänglich sind, wodurch ihre Bedienung und Wartung erschwert werden. Es muß meist eine geschlossene Bauart gewählt werden, um das Eindringen von Staub und Feuchtigkeit zu verhindern.

Abgesehen von diesen Mängeln weist der Tatzlagermotor noch einen weiteren schwerwiegenden Nachteil auf, der besonders dann zum Ausdruck kommt, wenn mehrere Tatzlagerantriebe in einem Drehgestell untergebracht sind (Bild 59). Verfolgt man nämlich die Kräfte, die beim Anfahren auftreten, also in dem Augenblick, in dem der Strom eingeschaltet

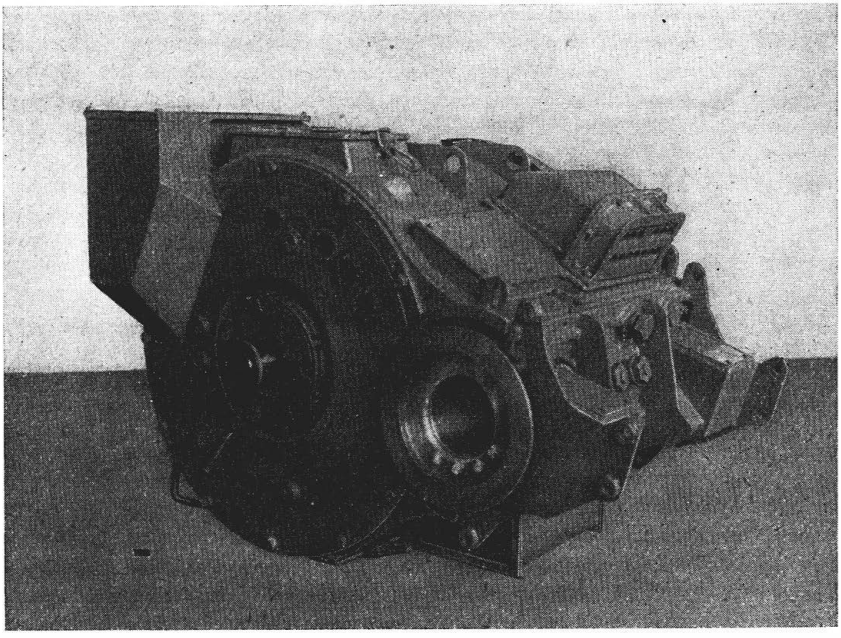


Bild 58. Tatzmotor neuer Bauart

wird, so ergibt sich folgendes: Das Ritzel des vorderen Motors wird zunächst versuchen, sich an dem noch stillstehenden Vorgelegezahnrad nach unten abzuwälzen. Dadurch wird die Auflagerung des Motors am Rahmen zusätzlich belastet. Die Kraft, die an der Tatzlagerseite die Achse nach unten drückt, wird dabei entsprechend kleiner, d. h., diese Achse wird beim Anfahren entlastet. Betrachtet man jedoch den hinteren Tatzlagermotor, so liegen hier die Verhältnisse genau umgekehrt, das Ritzel versucht an dem großen Zahnrad aufzusteigen, die Aufhängung im Rahmen wird entlastet, die Achslast wird dabei also erhöht. Da bekanntlich die Zugkraft von der Haftreibung begrenzt wird, und diese unter anderem von der Reibungslast abhängig ist, so bedeutet dies, daß die vordere Achse des Drehgestells beim Anfahren zum Schleudern neigen wird und die Leistung der Lokomotive nicht voll ausgenutzt werden kann. Versuche haben gezeigt, daß die Zugkraft einer Bo′ Bo′-Lokomotive infolge dieser Achsentlastung um etwa 10% sinkt.

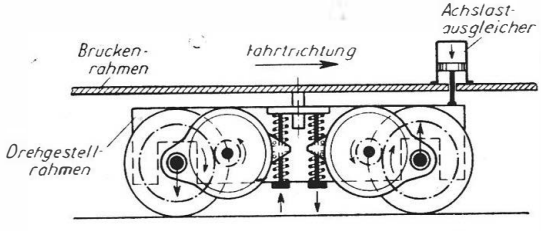


Bild 59
Drehgestell mit zwei Tatzmotoren

Um dies zu verhüten, verwendet man bei Drehgestell-Lokomotiven mit innenliegenden Tatzlagermotoren meist mechanische Achslastausgleicher. Diese bestehen aus einem doppelt wirkenden Druckluftzylinder, der am Brückenrahmen befestigt ist. Die Kolbenstange drückt dann auf das vordere Ende des Drehgestells und belastet es zusätzlich mit einem Teil der Kastenlast. Da bei entgegengesetzter Fahrtrichtung die Kräfte in umgekehrter Richtung auftreten, müßte man eine Drehgestell-Lokomotive mit insgesamt vier solchen Achslastausgleichern ausrüsten. Dies ist jedoch nicht üblich, und man begnügt sich mit zwei Einrichtungen an den Enden des Rahmens, die je nach Fahrtrichtung das Drehgestell abdrücken oder anziehen. Sie sind daher an die Fahrtrichtungswender angeschlossen und werden vom Führerstand aus mit Druckluft bedient. Die Lokomotiven der Baureihe E 44 sind z. B. mit solchen Achslastausgleichern ausgerüstet (Bild 60). Man muß jedoch diese Einrichtung bereits vor der Abfahrt bedienen und sie wieder abstellen, sobald der Zug eine bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat.

Es besteht auch die Möglichkeit, die vorhandene Reibungslast einer Bo'Bo'-Lokomotive mit Hilfe eines elektrischen Achslastausgleiches restlos auszunutzen. Dabei werden die Drehmomente der beiden entlasteten Achsen durch verminderte Leistungsaufnahme der betreffenden Motoren verkleinert, während die Drehmomente der beiden belasteten Achsen durch vermehrte Leistungsaufnahme der zugehörigen Motoren vergrößert werden. Es ist dadurch möglich, den Zugkraftverlust der entlasteten Achsen völlig auszugleichen und die jeweilige Reibungslast voll auszunutzen.

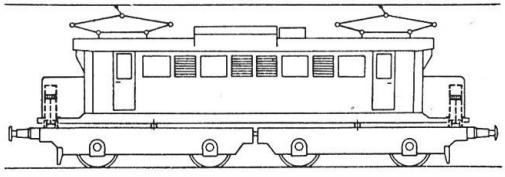


Bild 60
Elektrische Lokomotive mit Achslastausgleichern

Bei Co'Co'-Lokomotiven machen diese Achsentlastungen nur etwa 6% aus, so daß man im allgemeinen von dem Einbau besonderer Achslastausgleicher absieht.

Trotz dieser Mängel, die sich freilich nur bei voll ausgelasteten Triebfahrzeugen bemerkbar machen, fand der direkte Tatzlagerantrieb häufig Anwendung. Im Fahrzeugpark der Deutschen Reichsbahn sind die Schnellzuglokomotiven der Baureihe E 05, die Personenzuglokomotiven der Baureihe E 44 und die Güterzuglokomotiven der Baureihen E 93 und E 94 mit Tatzlagermotoren ausgerüstet.

2.3222 *Gummiringfederantrieb*

Eine konstruktive Verbesserung des direkten Tatzlagerantriebes ist der Gummiringfederantrieb. Auch hier findet ein Tatzlagermotor Anwendung, der auf der einen Seite unter Zwischenschalten von Federn am gefederten Drehgestellrahmen aufgehängt ist (Bild 61). Auf der anderen Seite stützt er sich jedoch nicht auf die ungefederte Treibachse auf, sondern auf eine Hohlwelle, welche die Achswelle mit einem allseitigen Spiel umschließt (Bild 62). Die Hohlwelle hat auf jeder Seite einen Flansch, an dem der Zahnkranz eines großen Vorgelegerades angeschraubt ist. Außerdem sind an jedem Flansch sechs Arme, die zwischen den Speichen nach außen hindurchgreifen. Diese Arme stützen sich über einen Gummi-

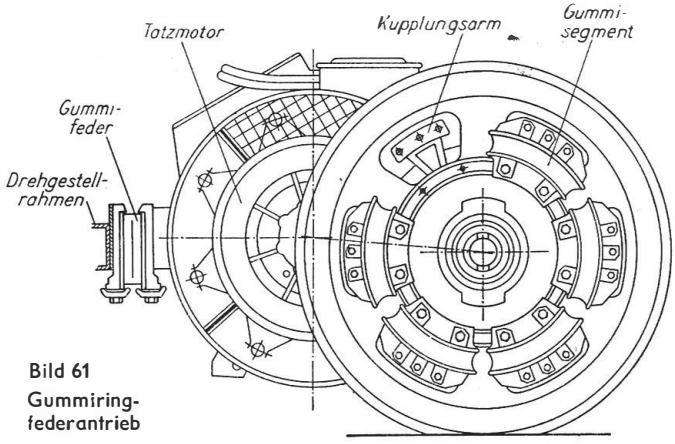


Bild 61
Gummiring-
federantrieb

ring, der in sechs Segmente aufgeteilt ist, auf dem Radstern ab. Zu diesem Zweck sind an jedem Gummikörper zwei Stahlteile anvulkanisiert, von denen der äußere am Arm der Hohlwelle, der innere an der Radnabe angeschraubt ist (Bild 63). Diese auf beiden Seiten insgesamt 12 Gummifedern übertragen also das Drehmoment des Motors weich und elastisch auf den Radsatz. Dadurch entfallen auch beim Anfahren die Rüttelschwingungen, die beim direkten Tatzlagerantrieb so störend empfunden werden. Infolge der hohen Drehelastizität der Gummisegmente werden auch die Zugkraftstöße beim Hochschalten stark gedämpft und die Schleudergefahr eingeschränkt, so daß ein Anfahren in der Nähe der Haftreibungsgrenze möglich ist. Außerdem nehmen die Gummikörper sämtliche vertikalen und horizontalen Stöße auf, so daß der Oberbau und auch der Motor wesentlich geschont werden.

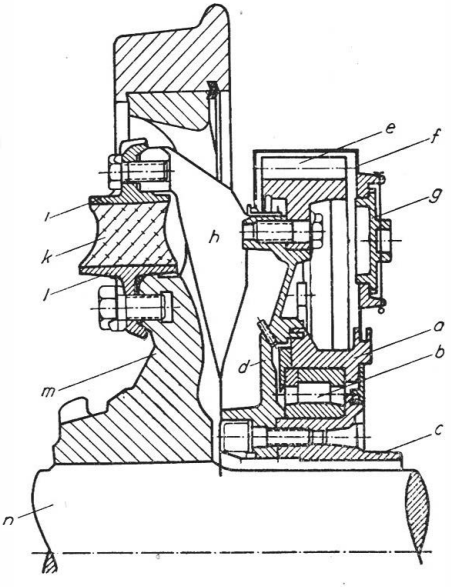


Bild 62. Gummiringfederantrieb

a Hohlwellengehäuse	g Deckel
b Wälzlager	h Kupplungsarm
c Hohlwelle	i Außensegment
d Flansch	k Gummikörper
e Zahnkranz	l Innensegment
f Getriebeschutzkasten	m Radkörper
	n Achswelle

Das Spiel zwischen Hohlwelle und Achswelle beträgt nur 11 mm und ist somit wesentlich geringer als bei den später behandelten Gestellmotoren mit Hohlwellenantrieb. Dies ist

darauf zurückzuführen, daß bei dieser Ausführung nicht das große Federspiel der Tragfedern, sondern nur das kleine Federspiel der Gummikörper ausgeglichen werden muß. Die beiden Zapfen oberhalb und unterhalb des Achslagergehäuses werden in Silentblocks geführt und dienen zur spielfreien Lagerung der Achsen im Drehgestellrahmen. Silentblocks sind Gummibuchsen, die innen und außen von Stahlzylindern umgeben sind.
Dieser Antrieb ist auch für schnellfahrende elektrische Lokomotiven mit großer Leistung geeignet. Er bedarf keiner Schmierung, zeigt keine Abnutzung im Betrieb und zeichnet sich durch geringe Unterhaltungskosten und lange Lebensdauer aus. Dieser Gummiringfederantrieb wurde im Jahre 1952 von den Siemens-Schuckert-Werken entwickelt und hat sich bei der Probelokomotive E 10 003 der Deutschen Bundesbahn so gut bewährt, daß er für sämtliche Neubaulokomotiven der Deutschen Bundesbahn, d. h. für die Baureihen E 10^1, E 40, E 41 und E 50 als Einheitsantrieb übernommen wurde. Während die leichten elektrischen Lokomotiven der Baureihe E 41 mit einseitigem Vorgelege auskommen, haben die übrigen Typen durchweg beiderseitigen Antrieb. Auch bei einigen neuentwickelten elektrischen Lokomotiven und Triebwagen der Österreichischen Bundesbahn ist dieser Antrieb zu finden.

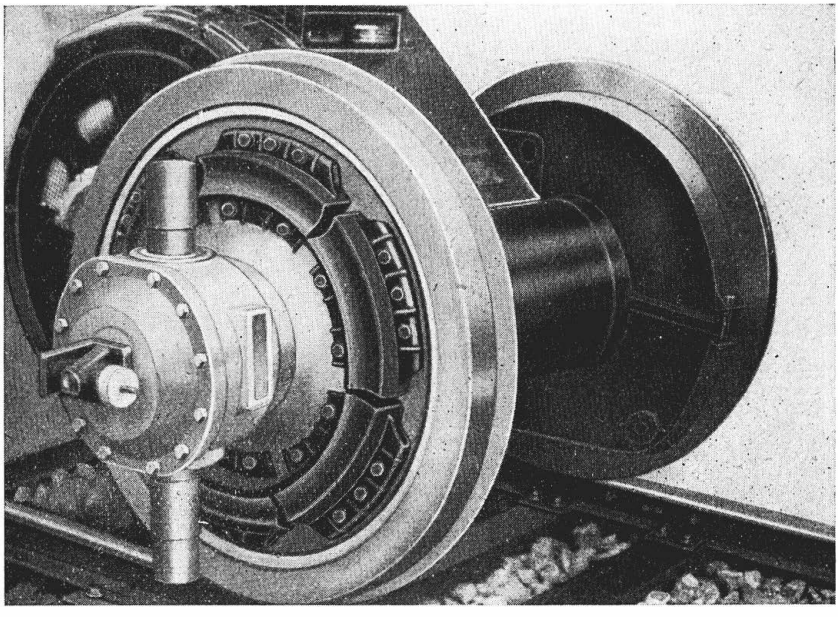


Bild 63. Gummiringfederantrieb

2.323 Antrieb durch Gestellmotor

Der Gestellmotor ist im allgemeinen senkrecht über der Treibachse im Drehgestellrahmen oder im Lokomotivkasten gelagert. Er ist also stets vollkommen abgefedert und daher auch für schnellfahrende Lokomotiven mit großen Leistungen geeignet. Ein Gestellmotor ist auch

während der Fahrt gut zugänglich und unterliegt nicht den räumlichen Einschränkungen wie der Tatzlagermotor. Außerdem wird durch das Hochlegen der Fahrmotoren der Schwerpunkt der Lokomotive wesentlich erhöht, was sich auf die Fahreigenschaften günstig auswirkt. Allerdings benötigt man auch in diesem Falle wieder eine allseitig bewegliche Kupplung, die ohne Beeinträchtigung der Drehmomentübertragung das Federspiel zwischen dem gefederten Motor und dem ungefederten Treibrad ausgleicht. Sie muß unbedingt zuverlässig und betriebssicher arbeiten und soll daher einfach sein und möglichst ohne Schmierung und Wartung auskommen. Eine solche Kupplung kann als Gelenkkupplung oder auch als Federkupplung aufgebaut sein.

2.3231 Buchli-Antrieb

Dieser von dem Schweizer Ingenieur Buchli entwickelte Antrieb wurde im Jahre 1926 erstmalig in Deutschland verwendet, und zwar bei Schnellzuglokomotiven, die von den Firmen Krauß in München und Brown, Boveri & Cie. in Mannheim gebaut wurden. Er ist daher auch unter der Bezeichnung BBC-Gelenkhebelkupplung bekannt. Der Motor ist dabei so hoch auf dem innenliegenden Hauptrahmen der Lokomotive gelagert, daß seine Welle auf der einen Seite über das Treibrad hinausragen kann (Bild 64). Die Motorwelle trägt das Ritzel, das in das große Vorgelegezahnrad eingreift. Dieses läuft auf einem Zapfen, welcher der Treibradmitte ungefähr gegenüber liegt und in einem besonderen Hilfsrahmen fliegend gelagert ist. Das Vorgelege sitzt hier also im Gegensatz zu allen anderen Triebwerksbauarten außerhalb der Treibräder und außerhalb des Rahmens. Da es meist nur einseitig angeordnet ist, ergibt sich auf der Antriebsseite ein erhebliches Mehrgewicht, das durch entsprechende Lagerung des Transformators und der Hilfsmaschinen ausgeglichen wird.

Zwischen dem Vorgelegezahnrad und dem Treibrad befindet sich ein Kupplungsgestänge, welches das Federspiel ausgleicht und auch eine gewisse Seitenbeweglichkeit des Radsatzes zuläßt (Bild 65). Nähere Einzelheiten dieser Gelenkkupplung sind aus den Bildern 66 und 67 zu ersehen. Die Kupplung besteht aus einem symmetrischen Hebelsystem, dessen Stangen über Zahnsegmente verbunden sind, die stets ineinandergreifen. Jedes Segment schwingt um

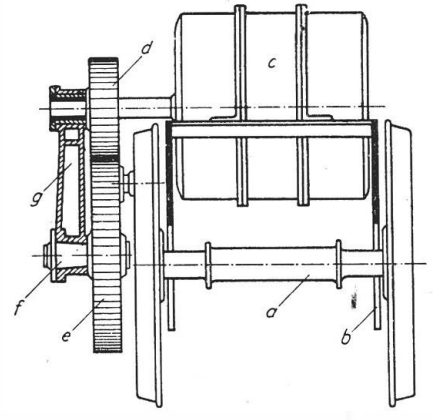


Bild 64
Buchli-Antrieb (Schema)

a Treibradsatz
b Hauptrahmen
c Gestellmotor
d Ritzel
e Vorgelegerad
f Zapfen
g Hilfsrahmen

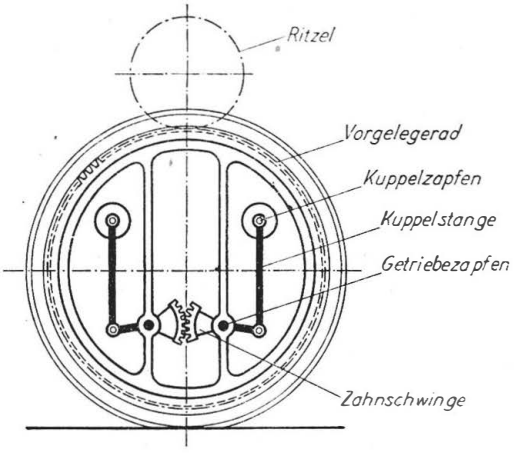


Bild 65
Gelenkkupplung

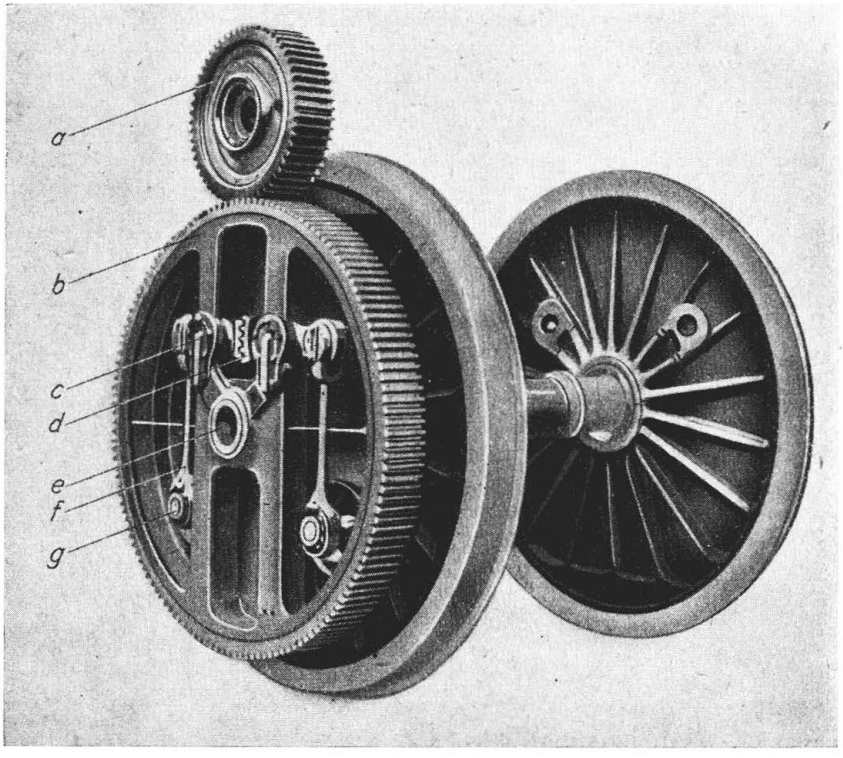


Bild 66. Radsatz mit Buchli-Antrieb

a Ritzel
b Vorgelegerad
c Getriebezapfen
d Zahnschwinge
e Lager für Vorgelegerad
f Kuppelstange
g Kuppelzapfen

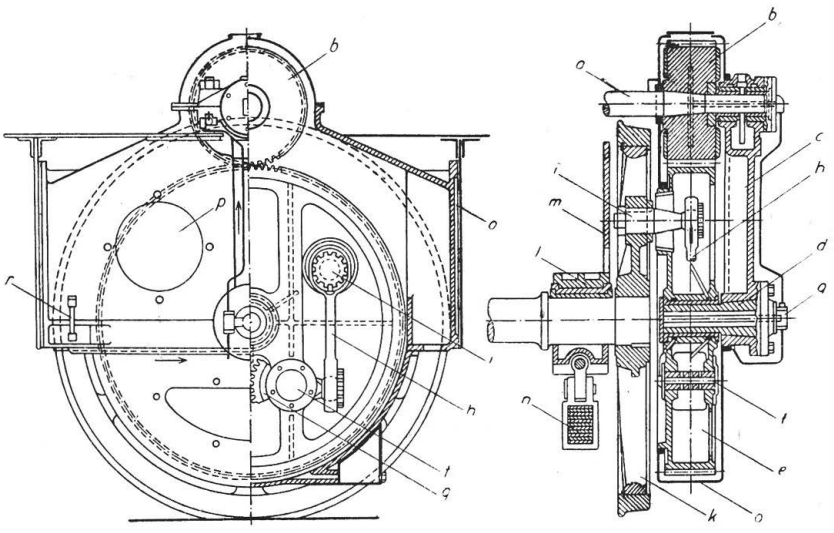


Bild 67. Buchli-Antrieb (Zusammenstellung)

a Motorwelle
b Ritzel
c Hilfsrahmen
d Tragzapfen für Vorgelegerad
e Vorgelegerad
f Getriebezapfen
g Zahnschwinge
h Kuppelsange
i Kuppelzapfen
k Treibrad
l Achslager
m Hauptrahmen
n Tragfeder
o Getriebeschutzkasten
p Deckel
q Ölpumpe
r Ölstandglas

einen am Zahnrad befestigten Getriebezapfen. Die beiden Kuppelstangen greifen an kugeligen Zapfen am freien Ende der Zahnschwingen an und sind am anderen Ende mit je einem Kuppelzapfen verbunden, der im Radstern befestigt ist. Diese Zapfen greifen durch entsprechende Aussparungen im großen Zahnrad hindurch. Sie sind nicht in den Radkörper eingepreßt, sondern nur konisch eingesetzt und durch Muttern gesichert, da sonst der Ausbau des Treibradsatzes schwierig wäre.

Die Kuppelstangen übertragen also die Antriebskraft vom Vorgelege zum Radsatz, und zwar wird bei einer bestimmten Fahrtrichtung die eine Stange stets auf Zug und die andere auf Druck bzw. Knickung beansprucht. Um harte Stöße, besonders beim Anfahren, zu vermeiden, ist das Ritzel meist gegen Torsion besonders abgefedert. Das Zusammenwirken

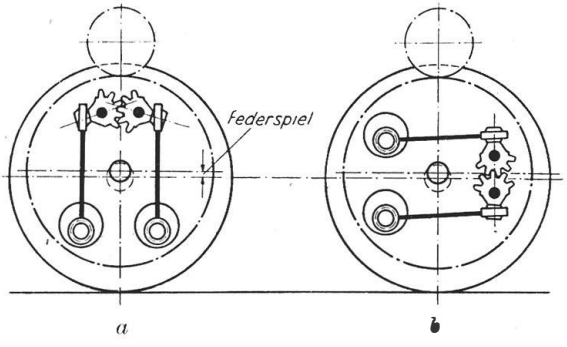


Bild 68
Arbeitsweise der Gelenkkupplung

der einzelnen Teile ist aus Bild 68 zu erkennen. Das große Zahnrad läuft also einschließlich Kupplungsgestänge mit derselben Drehzahl um wie das Treibrad. Solange Mitte Zahnrad mit Mitte Treibrad auf gleicher Höhe liegt, bleibt die geamte Gelenkkupplung in Ruhestellung. Die Zahnsegmente schlagen erst dann aus, wenn der Radsatz, z. B infolge schlechter Gleislage, eine vertikale Bewegung ausführt, und zwar ist der Ausschlag dann am größten, wenn die Segmente sich gerade oben oder unten befinden, die Kuppelstangen also senkrecht stehen (Bild 68a). Liegen die Kuppelstangen jedoch gerade waagerecht, so gleichen sie durch leichte Schräglage das Federspiel aus, und die Zahnsegmente bleiben in Ruhestellung (Bild 68b).

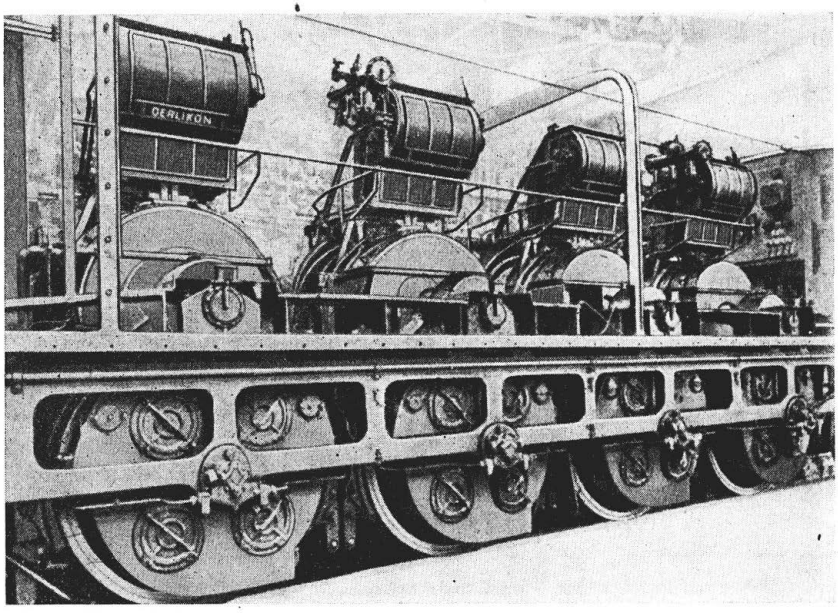


Bild 69. Antriebsseite einer elektrischen Lokomotive mit Buchli-Antrieb

Da die Gelenklager stets gut geschmiert werden müssen, besitzt jeder Treibradsatz eine besondere Ölpumpe. Auch ist der untere Teil des Getriebeschutzkastens mit Öl gefüllt, so daß die Zähne des großen Vorgelegezahnrades ständig eintauchen. Dennoch läßt sich ein Verschleiß an den zahlreichen Teilen des Kupplungsgestänges nicht vermeiden. Mehrere große Deckel im Getriebeschutzkasten ermöglichen eine gute Zugänglichkeit der einzelnen Lagerstellen (Bild 69). Dieser Antrieb ist im allgemeinen einseitig. Nur bei sehr großen Leistungen ist es üblich, auf jeder Seite ein Vorgelege mit der entsprechenden Gelenkkupplung vorzusehen.

Als Vorteil des Buchli-Antriebes ist hervorzuheben, daß er bei sehr geringen ungefederten Massen jederzeit in der Lage ist, die Antriebskraft von dem hochliegenden gefederten Fahrmotor auf den ungefederten Radsatz zu übertragen. Nachteilig sind jedoch die durch

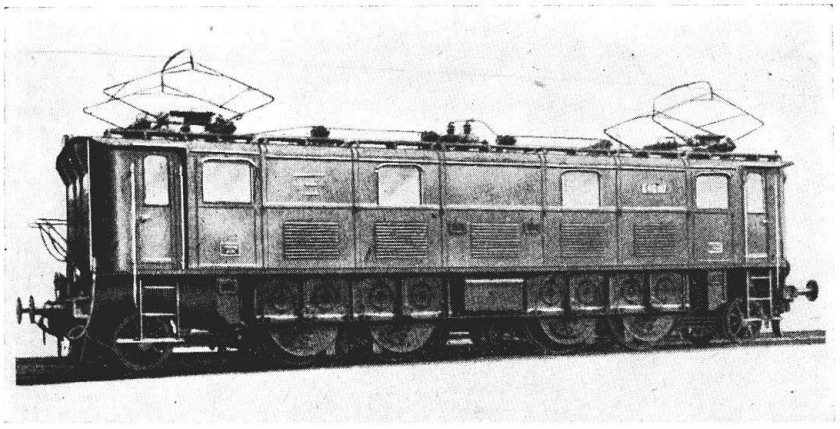


Bild 70. Elektrische Lokomotive Baureihe E 16 mit Buchli-Antrieb (Antriebsseite)

den komplizierten Aufbau entstehenden hohen Herstellungskosten und die infolge der vielen beweglichen Teile und der komplizierten Schmierung verhältnismäßig teure Unterhaltung dieses Antriebes. Ungünstig sind auch noch die einseitige Lagerung des Vorgeleges und der schwierige Ausbau des Treibradsatzes.

Der Buchli-Antrieb wurde in der Schweiz, in Frankreich und auch in außereuropäischen Ländern viel verwendet. Bei der Deutschen Reichsbahn wurde er in die Baureihe E 16 (1'Do1') eingebaut, wo er heute noch zu finden ist (Bild 70). Auch in einem Oberleitungstriebwagen der Baureihe ET 11 (Höchstgeschwindigkeit 160 km/h) hat er sich gut bewährt. In diesem Falle lagen jedoch die Fahrmotoren neben den Treibachsen und die großen Vorgelegezahnräder mit den dazugehörigen Gelenkkupplungen innerhalb der Räder. Dadurch wurde es notwendig, eine Hohlwelle einzubauen und den sonst üblichen Außenrahmen zu verwenden.

2.3232 Gelenkstangen-Antrieb

Dieser besonders in Westeuropa häufig angewendete Antrieb wurde im Jahre 1890 von der Firma Siemens & Halske entwickelt und im Jahre 1933 von der Firma Alsthom, Paris, wesentlich verbessert. Er verwendet für die Drehmomentübertragung vom gefederten Motor zum ungefederten Radsatz ebenfalls eine Gelenkkupplung. Die einzelnen Fahrmotoren sind auch bei diesem Antrieb senkrecht über den Treibradsätzen im gefederten Lokomotivkasten gelagert. Im unteren Teil jedes Motorgehäuses befinden sich Lager für eine Hohlwelle (Bild 71). Diese umgibt die Achswelle mit einem allseitigen Spiel von 35 mm und trägt an jedem Ende ein großes Vorgelegezahnrad, das meist noch gegen Verdrehung besonders abgefedert ist (Bild 72). Dieser Antrieb ist also bei größeren Leistungen meist beiderseitig, und da die Hohlwelle bis dicht an die Treibräder heranreicht, wird stets ein Außenrahmen verwendet.

Die Verbindung zwischen der gefederten Hohlwelle und dem ungefederten Radsatz wird auf jeder Seite durch vier Lenkerstangen hergestellt (Bild 73). Diese sind an einer um-

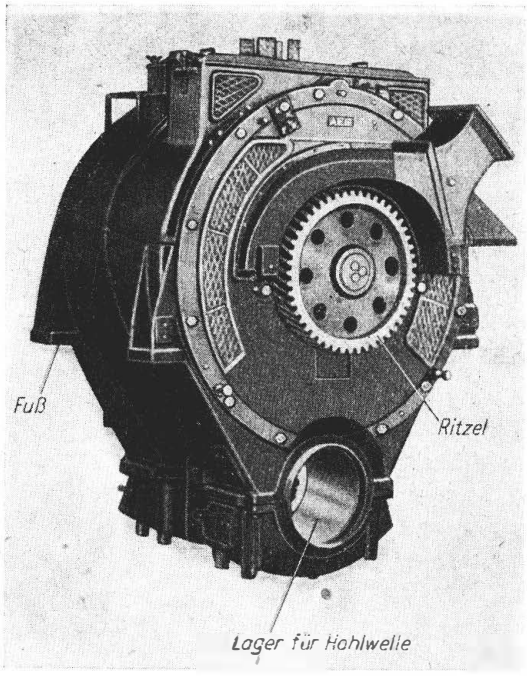


Bild 71
Gestellmotor mit Hohlwellenlager

laufenden Lenkerstütze befestigt, die wegen der eigentümlichen Bewegungen, die sie unter dem Einfluß der Kräfte und Verschiebungen ausführt, auch als tanzender Ring bezeichnet wird. Die freien Enden der Lenkerstangen greifen einerseits an zwei Treibzapfen an, die

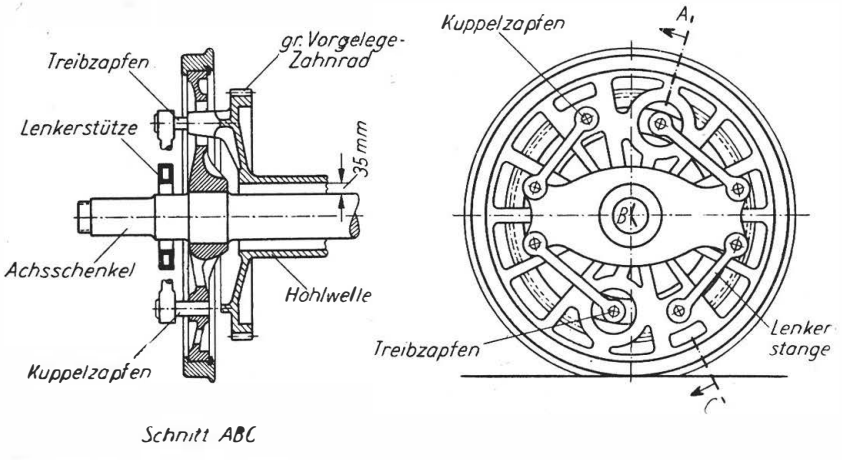


Bild 72. Gelenkstangenantrieb

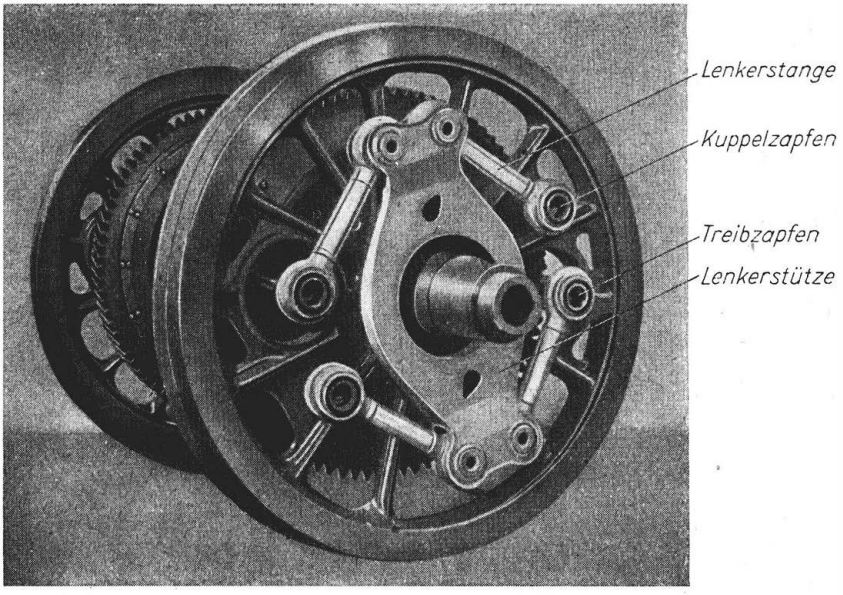


Bild 73. Radsatz mit Gelenkstangenantrieb

am Flansch der Hohlwelle befestigt sind und zwischen den Speichen des Treibrades hindurchgreifen und andererseits an zwei Kuppelzapfen im Radstern, die ebenfalls diametral gegenüberliegen. Die Lenkerstütze wird also gewissermaßen von den Lenkern freischwebend gehalten und ist zwischen Radkörper und Achslager untergebracht.
Um dem Radsatz eine möglichst große Bewegungsfreiheit zu gestatten, sind sämtliche Gelenke entweder kugelförmig ausgebildet oder mit Silentblocks versehen. Diese wirken dämpfend und ermöglichen eine elastische Drehmomentübertragung. Jeder Treibradsatz hat zwei derartige Antriebe, die gegeneinander um 90° versetzt und spiegelbildlich angeordnet sind, so daß sämtliche Lenkerstangen auf der einen Seite auf Zug und auf der anderen Seite auf Druck bzw. Knickung beansprucht werden.
Dieser Antrieb hat sich bei zahlreichen elektrischen Lokomotiven der französischen Staatsbahnen und auch bei der E10 001 der Deutschen Bundesbahn gut bewährt. Die ungefederten Massen sind sehr gering, so daß sich dieser Antrieb auch für große Leistungen und hohe Geschwindigkeiten eignet. Bemerkenswert sind noch die außerordentlich niedrigen Unterhaltungskosten, da nur wenig Schmierstellen vorhanden sind und der Verschleiß der Silentblocks so gering ist, daß diese erst nach mehr als 10 Jahren ausgewechselt werden müssen.

2.3233 Westinghouse-Antrieb

Für die Drehmomentübertragung vom gefederten Motor zum ungefederten Radsatz kann man anstelle der Gelenkkupplungen auch Federkupplungen verwenden. Sie stellen dann eine elastische Verbindung zwischen Motor und Ritzel oder, was gebräuchlicher ist,

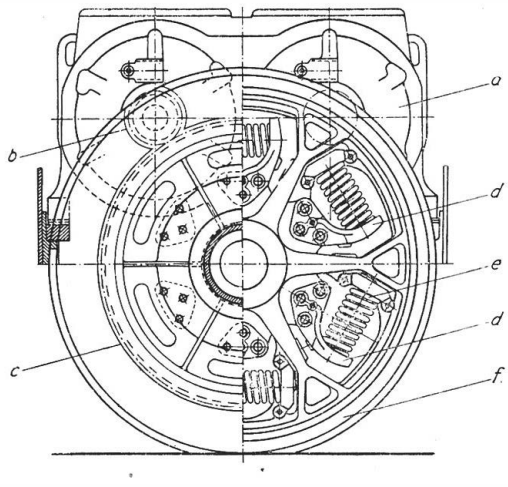


Bild 74
Westinghouse-Antrieb
a Doppelmotor
b Ritzel
c Vorgelegerad
d Kupplungsarm
e Schraubenfeder
f Treibradsatz

zwischen großem Vorgelegezahnrad und Treibrad her. Derartige Federkupplungen wurden in den verschiedensten Ausführungen erprobt und haben sich auch in dem rauhen Eisenbahnbetrieb gut bewährt. Geeignet sind Blattfedern, Schraubenfedern, Gummifedern oder auch elastische Scheiben oder Ringe aus Stahl oder Gummi.

Der Westinghouse-Antrieb ist ebenfalls ein Hohlwellen-Antrieb, und auch hier sind die einzelnen Fahrmotoren wieder über den Treibradsätzen gelagert. Die Verbindung zwischen der gefederten Hohlwelle und dem ungefederten Radsatz übernehmen auf jeder Seite sechs Schraubenfedern, die zwischen den Speichen liegen (Bild 74). Sie werden mit dem einen Ende an Kupplungsarmen befestigt, die am Flansch der Hohlwelle angeschraubt sind, das andere Ende der Federn ist fest mit den Radspeichen verbunden. Bei Übertragung des Drehmomentes werden alle Federn des einen Rades auf Zug, die des anderen Rades auf Druck beansprucht. Bei Änderung der Fahrtrichtung verändert sich auch die Beanspruchung der Federn.

Durch schlechte Gleislage und infolge der Fliehkraft werden die Federn zusätzlich auf Biegung bzw. bei Kurvenfahrt auf Torsion beansprucht. Um Betriebsstörungen durch Federbruch zu vermeiden, ist es daher erforderlich, die Federn aus einem hochwertigen Stahl herzustellen und sie besonders kräftig auszubilden. Der Westinghouse-Antrieb ist hauptsächlich an älteren amerikanischen elektrischen Lokomotiven zu finden.

2.3234 Sécheron-Antrieb

Dieser Antrieb stellt eine Weiterentwicklung des Westinghouse-Antriebes dar und fand in Europa eine starke Verbreitung. Anstelle der auf jeder Seite angeordneten sechs Schraubenfedern werden bei dieser Konstruktion drei Doppelfeder-Elemente verwendet. Diese werden in der Mitte durch einen Kupplungsarm gefaßt, der an der Hohlwelle angeschraubt ist, während die beiden Enden der Federn mit dem Radkörper verbunden sind (Bilder 75 und 76). Bei einer bestimmten Fahrtrichtung wird die eine Feder eines solchen Federelementes auf Zug, die andere auf Druck beansprucht, so daß ein gleichförmiger

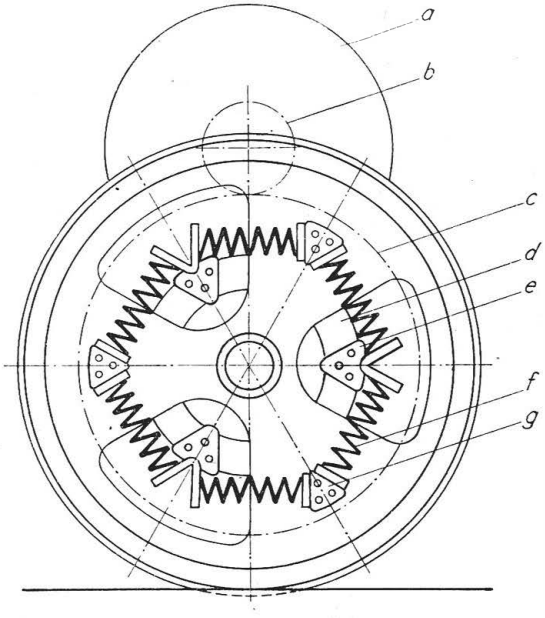


Bild 75

Radsatz mit Sécheron-Antrieb (Schema)

a Gestellmotor
b Ritzel
c Vorgelegerad
d Flansch
e Kupplungsarm
f Doppelfeder
g Befestigung am Rad

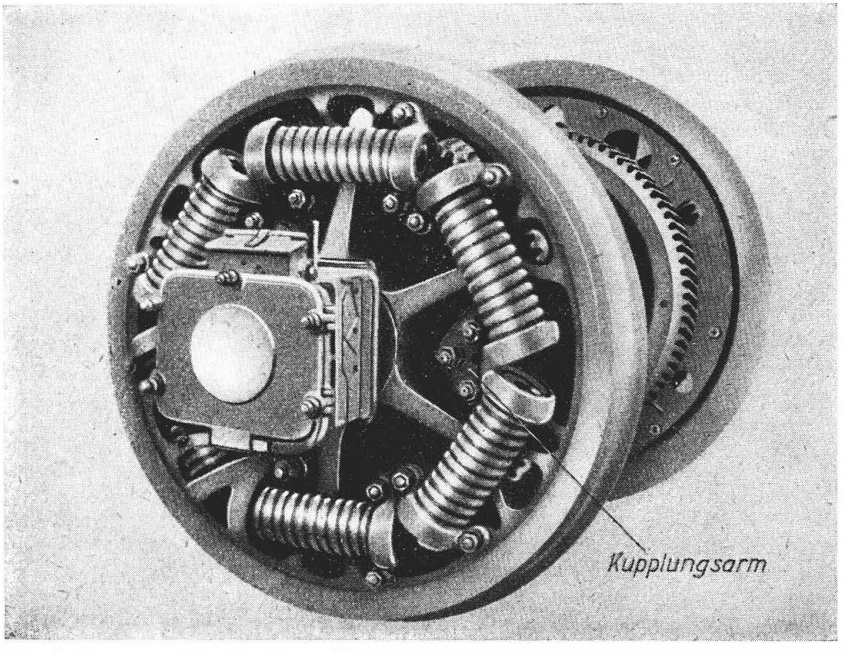


Bild 76. Radsatz mit Sécheron-Antrieb

Zugkraftverlauf erreicht wird. Da man bei dieser Ausführung anstatt sechs auf jeder Seite nur drei Kupplungsarme benötigt, ist der gesamte Aufbau einfacher und dadurch auch billiger. Da die Federn nicht mehr zwischen den Speichen, sondern außerhalb der Speichen liegen, können gegenüber dem Westinghouse-Antrieb wesentlich kleinere Treibraddurchmesser verwendet werden. Dadurch wird die Masse der ungefederten Radsätze wesentlich herabgesetzt und auch der Radstand und somit die gesamte Baulänge der Lokomotive beträchtlich verkürzt.

2.3235 Federtopf-Antrieb

Als dann im Jahre 1927 für die Deutsche Reichsbahn eine Schnellzug-Lokomotive mit der Achsfolge 2'Do1' entwickelt werden sollte (Baureihe E 21), nahm sich die Herstellerfirma AEG die beiden vorstehenden Antriebe zum Vorbild. Kleinow verbesserte sie wesentlich und erhöhte die Betriebssicherheit dadurch, daß er die Antriebsfedern, die das Drehmoment elastisch auf den Radsatz übertragen, nicht mehr fest einspannte, sondern in Federtöpfen unterbrachte. Dieses Triebwerk ist daher auch unter der Bezeichnung AEG-Kleinow-Antrieb bekannt.

Der Fahrmotor ist auch in diesem Falle wieder im gefederten Lokomotivkasten untergebracht und stützt sich mit seinen Füßen auf Rahmenquerverbindungen auf (Bild 71). Im unteren Teil des Motorgehäuses befinden sich die Lager für eine Hohlwelle, welche die Achswelle mit einem allseitigen Spiel von 40 mm umgibt (Bild 77). An jedem Ende der Hohlwelle sitzt ein Flansch, auf den der Zahnkranz des großen Vorgelegezahnrades aufgeschrumpft wird (Bild 78). Dieser Antrieb ist also bei größeren Leistungen stets beiderseitig. Um einen möglichst guten und geräuschlosen Eingriff der Zahnräder zu gewährleisten, verwendet man im allgemeinen Schrägverzahnung (Bild 79). An jedem Flansch sind sechs Kupplungsarme angebracht, die zwischen den Speichen des Treibrades hindurchgreifen. Jeder Arm trägt in einem zweiteiligen Gehäuse zwei Federtöpfe, die in einem gehärteten Führungsring gleiten können und durch eine Schraubenfeder auseinander-

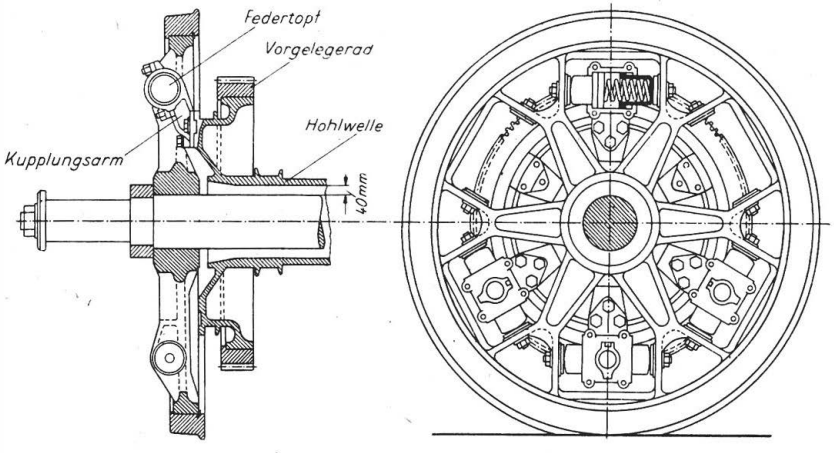


Bild 77. Federtopfantrieb

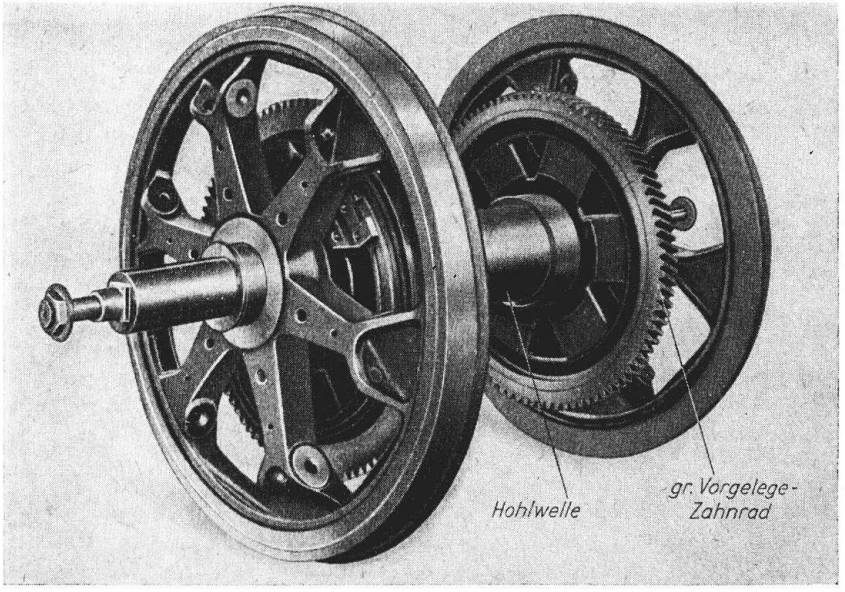


Bild 78. Radsatz mit Hohlwelle für elektrische Lokomotive mit Federtopfantrieb

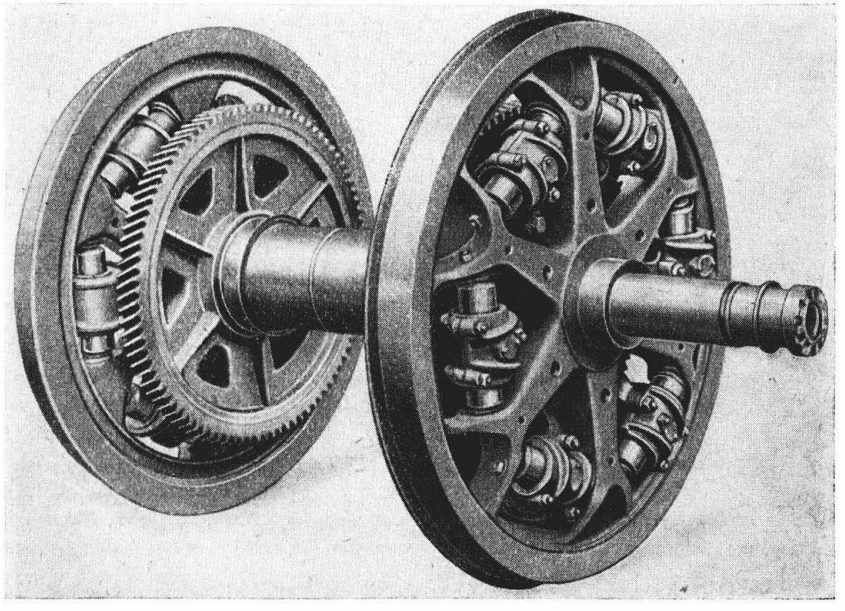


Bild 79. Radsatz einer elektrischen Lokomotive mit Federtopfantrieb

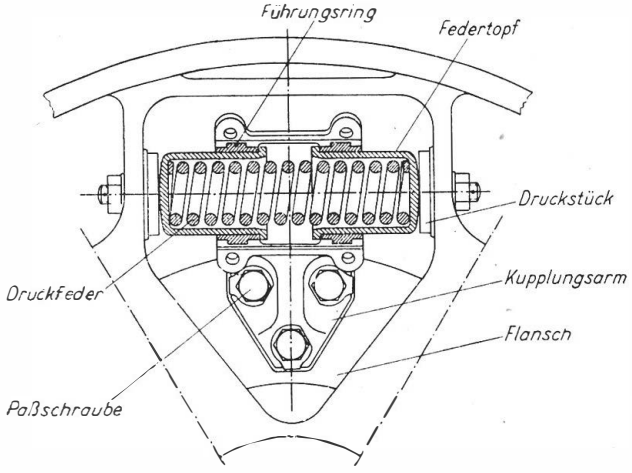


Bild 80
Kupplungsarm mit Federtöpfen

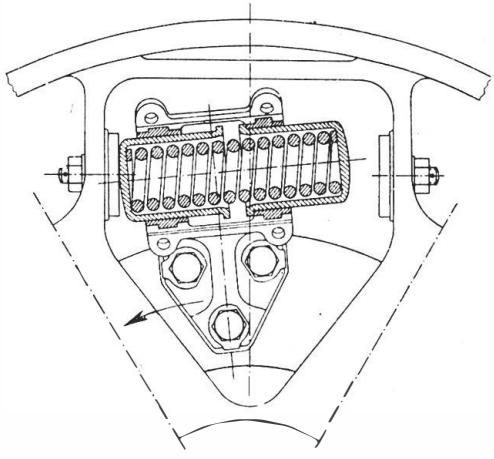


Bild 81
Kupplungsarm beim Anfahren

gedrückt werden (Bild 80). Jeder Topf hat einen leicht gewölbten Boden und am anderen Ende einen Flansch, durch den die Bewegung nach außen begrenzt wird. Die Federtöpfe übertragen also das Drehmoment elastisch auf die Speichen des Treibrades, die an den Berührungsstellen mit pilzförmigen Druckstücken versehen sind, um jeglichen Verschleiß am Radstern zu vermeiden.

Beim Anfahren dreht das Ritzel zunächst das große Vorgelegezahnrad und somit die einzelnen Kupplungsarme (Bild 81). Die hinteren Federtöpfe liegen dann mit ihrem Bund fest an dem Führungsring an und heben sich von ihrem Druckstück ab. Die Böden der Federtöpfe drücken dann die einzelnen Schraubenfedern zusammen, die das Drehmoment gleichmäßig über die vorderen Federtöpfe und Druckstücke auf das Treibrad übertragen. Federtöpfe und Druckstücke sind gehärtet und werden dort, wo sie sich berühren, durch

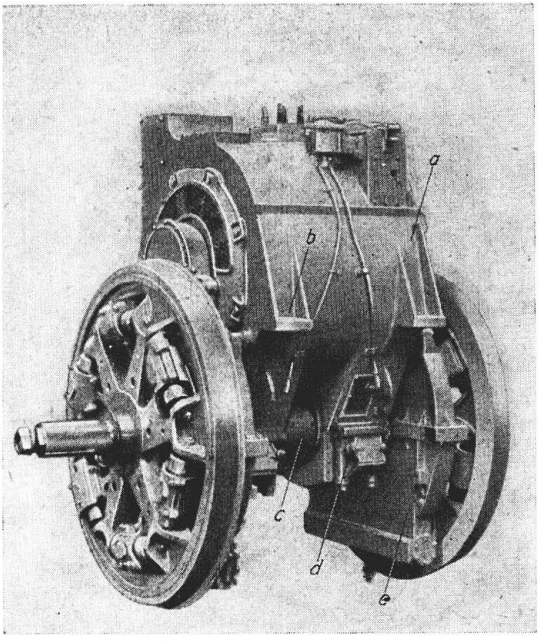


Bild 82
Treibradsatz mit Motor

a Gestellmotor
b Fuß
c Hohlwelle
d Lager für Hohlwelle
e Getriebeschutzkasten

Fett geschmiert, da sie bei Ausgleich des Federspieles aufeinander gleiten. Außer der vertikalen Bewegung, die durch den Abstand der Hohlwelle begrenzt wird, liegt auch eine gewisse Seitenbeweglichkeit des Radsatzes vor. Wegen der Hohlwelle ist es nicht möglich, den Radsatz innerhalb der Räder zu lagern, so daß bei diesem Antrieb stets ein Außenrahmen verwendet wird. Bild 82 zeigt einen vollständigen Treibradsatz mit Federtopfantrieb und Motor. Diese gesamte Einheit läßt sich leicht mit Hilfe einer Achssenke ausbauen, wenn man die Rahmenverbindungen, auf die sich der Motor abstützt, seitlich entfernt. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, die Unterteile der Hohlwellenlager zu lösen und dann lediglich den Radsatz mit Hohlwelle nach unten auszubauen. Beim Nachdrehen oder Auswechseln der Radreifen ist es nicht erforderlich, die Hohlwelle zu entfernen.

Nachteilig ist jedoch, daß zu diesem Triebwerk viele Einzelteile gehören und die Federtöpfe und Druckstücke einem gewissen Verschleiß unterliegen. Auch ist zu berücksichtigen, daß dieser Antrieb wegen des großen Platzbedarfs der Kupplungen einen entsprechend großen Treibraddurchmesser erfordert und daher für neuzeitliche Drehgestell-Lokomotiven mit einem Treibraddurchmesser von etwa 1200···1300 mm nicht geeignet ist. Außerdem neigt dieser Antrieb beim Anfahren zu recht unangenehmen Schüttelschwingungen, die leicht zu Rißbildung an den Speichen führen, obgleich diese schon sehr kräftig ausgeführt sind und dadurch die Masse des ungefederten Treibradsatzes wesentlich erhöhen.

Trotz dieser Mängel wurde der Federtopfantrieb von vielen Eisenbahn-Verwaltungen übernommen und in elektrischen sowie Diesellokomotiven mit gutem Erfolg eingebaut. Er ist bei den Lokomotiven der Baureihen E 04, E 17, E 18, E 19 und E 21 zu finden und hat

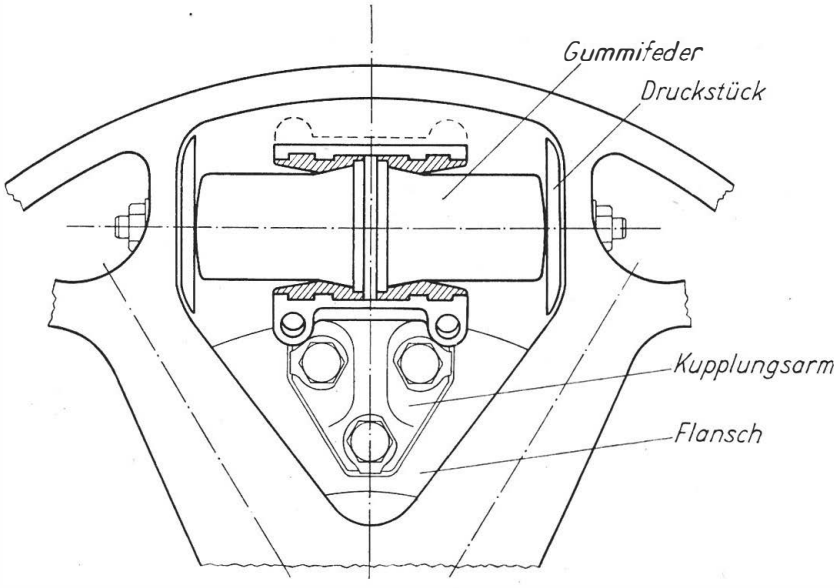


Bild 83. Ersatz der Federtöpfe durch Gummifedern

sich dort auch bei hohen Leistungen und Geschwindigkeiten bis 200 km/h gut bewährt. In ähnlicher Form wurde er auch bei einem elektrischen Oberleitungs-Schnelltriebwagen der Deutschen Reichsbahn (ET 11 05) angewendet.

Erwähnt sei noch, daß dieser Antrieb auch bei neueren amerikanischen, schwedischen und norwegischen elektrischen Lokomotiven gebräuchlich ist, jedoch ersetzt man dort die Federtöpfe und Stahlfedern durch Gummipuffer (Bild 83). Die Gummifedern haben gegenüber den Stahlfedern den Vorteil, daß sie auch starke Stöße, die z. B. beim Schleudern der Achse und anschließendem Sanden auftreten, ohne Beschädigung aufnehmen können. Diese Ausführung hat sich bereits bei zahlreichen Lokomotiven bestens bewährt, da wenige Einzelteile vorhanden sind, die dem Verschleiß unterliegen und auch wenig Schmierstoff benötigt wird. Infolge der kleineren Abmessungen der Kupplungen ist es dann auch möglich, diesen Antrieb für Drehgestell-Lokomotiven zu verwenden.

2.3236 Federantrieb

Dieser Antrieb wurde von der Firma Brown, Boveri & Cie. entwickelt und ist daher unter der Bezeichnung BBC-Federantrieb bekannt. Er ähnelt in gewisser Hinsicht dem Federtopfantrieb, doch liegt in diesem Falle der vollkommen abgefederte Fahrmotor nicht über sondern neben der Treibachse (Bild 84). Das Ritzel treibt das große Vorgelege-Zahnrad an, das auf einem feststehenden Hohlwellen-Stummel drehbar gelagert ist. Dieser ist am Motorgehäuse befestigt und umgibt die Achswelle mit einem allseitigen Spiel, so daß sich diese bei Gleisunebenheiten in vertikaler Richtung frei bewegen kann. Die Kraftübertragung vom großen Vorgelege-Zahnrad zur Treibachse übernimmt eine Federkupplung,

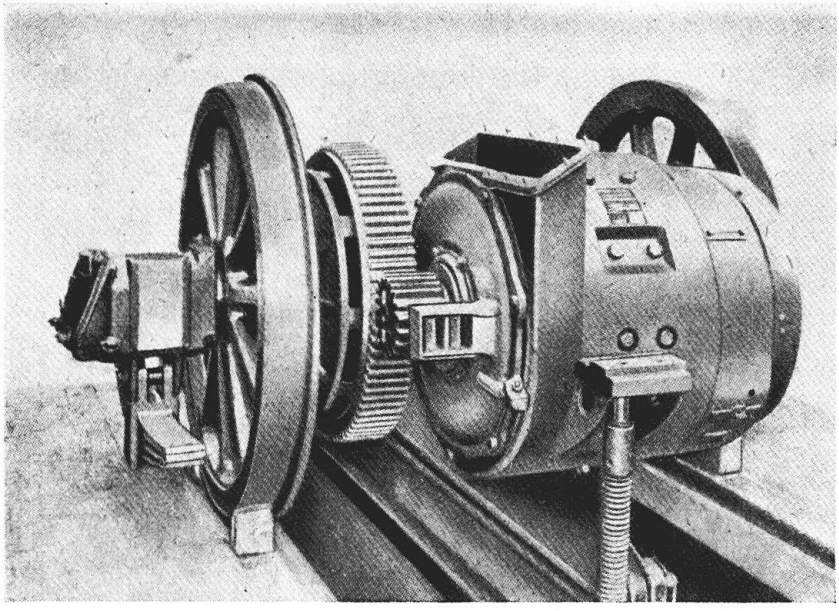


Bild 84. BBC-Federantrieb

die zugleich das Federspiel ausgleicht. Die Schraubenfedern liegen bei diesem Antrieb im Innern des großen Vorgelege-Zahnrades, und zwar ist jede Feder in einer besonderen Kammer untergebracht. In diese Kammern greifen kräftige Arme, die an einer Mitnehmerscheibe befestigt sind, die auf die Achswelle oder auf eine der Radnaben aufgepreßt ist. Während der Fahrt werden die Federn so weit zusammengedrückt, bis die Arme fast am Gehäuse anliegen.

Dieser Antrieb ist im allgemeinen einseitig, so daß genügend Raum für die Unterbringung großer Fahrmotoren zur Verfügung steht. Gegebenenfalls kann auch ein beiderseitiger Antrieb mit umlaufender Hohlwelle verwendet werden. Die beiden Zahnräder und auch sämtliche Teile der Federkupplung sind von einem dichtschließenden Schutzkasten umgeben. Dadurch ist es möglich, auch die Berührungsstellen zwischen den Mitnehmerarmen und den Schraubenfedern ständig zu schmieren, so daß der Verschleiß im Vergleich zum Federtopfantrieb gering ist. Dieser Antrieb fand in der Schweiz bei vielen elektrischen Lokomotiven und Oberleitungstriebwagen Anwendung. Er hat sich aber auch an dieselelektrischen Lokomotiven und Triebwagen und Gasturbinenlokomotiven gut bewährt.

2.3237 Kardan-Scheibenantrieb

Anstelle der Gelenk- oder Federkupplungen kann man auch Kardan-Antriebe verwenden, um das Federspiel zwischen dem gefederten Motor und dem ungefederten Radsatz auszugleichen. Das Grundprinzip sämtlicher Kardan-Antriebe besteht darin, daß zwei parallele Wellen, von denen die eine in der Höhe verschiebbar ist, durch eine Kardanwelle ver-

bunden werden (Bild 85). Während man bei größeren Ablenkwinkeln metallene Kreuzgelenke, sogenannte Kardangelenke einbaut, genügen bei einem Ablenkwinkel bis etwa 5° einfache Trockengelenke. Anstelle der sonst allgemein üblichen Gummigewebescheiben (Hardy-Scheiben) werden bei den Antrieben für elektrische Lokomotiven elastische Stahlscheiben oder Lamellen verwendet.

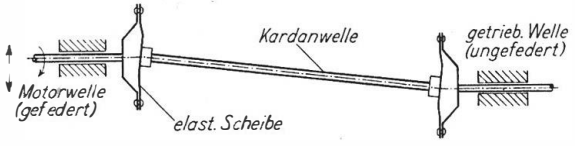


Bild 85
Kardan-Antrieb (Schema)

Der Kardan-Scheibenantrieb wurde im Jahre 1938 von der Firma Brown, Boveri & Cie,, Baden (Schweiz), entwickelt. Er ist dadurch gekennzeichnet, daß er das Federspiel bereits zwischen Motorwelle und Ritzel ausgleicht, während bei den vorgenannten Hohlwellenantrieben diese Aufgabe immer erst auf dem Wege vom großen Vorgelege-Zahnrad zum Treibradsatz gelöst wurde. Da jedoch auf der hochtourigen Getriebeseite nur kleine Drehmomente zu übertragen sind, können die Einzelteile dieses Antriebes verhältnismäßig leicht gehalten werden. Daher genügen auch für die Übertragung des Drehmomentes dünne elastische Stahlscheiben von etwa 600 mm Durchmesser und 2···7 mm Dicke

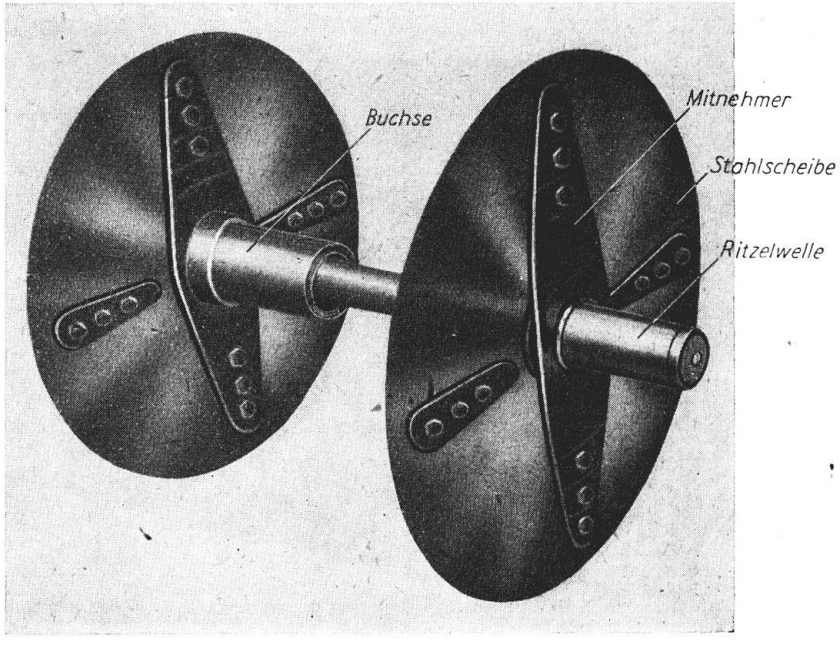
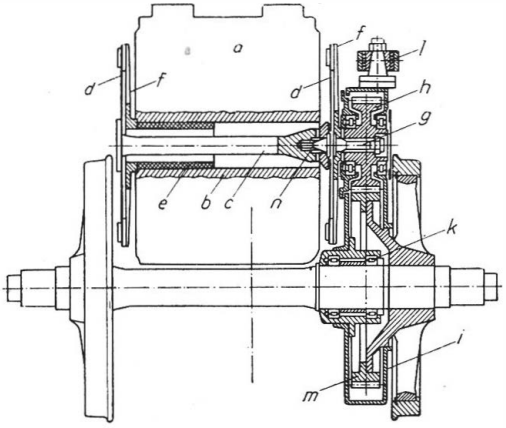


Bild 86. Antriebselemente des Scheibenantriebes

Bild 87
Kardan-Scheibenantrieb (horizontaler Schnitt)

a Fahrmotor
b hohle Ankerwelle
c Kardanwelle
d Stahlscheibe
e Buchse
f Mitnehmer
g Ritzelwelle
h Ritzel
i Getriebeschutzkasten
k Wälzlager
l Silentblock
m Vorgelegerad
n Zackenkupplung



(Bild 86). Da im Drehgestell einer elektrischen Lokomotive der Platz auch nicht ausreicht, um eine Kardanwelle von der gewünschten Länge neben dem querliegenden Fahrmotor anzuordnen, ist die Ankerwelle als Hohlwelle ausgebildet und die Kardanwelle in dieser untergebracht.

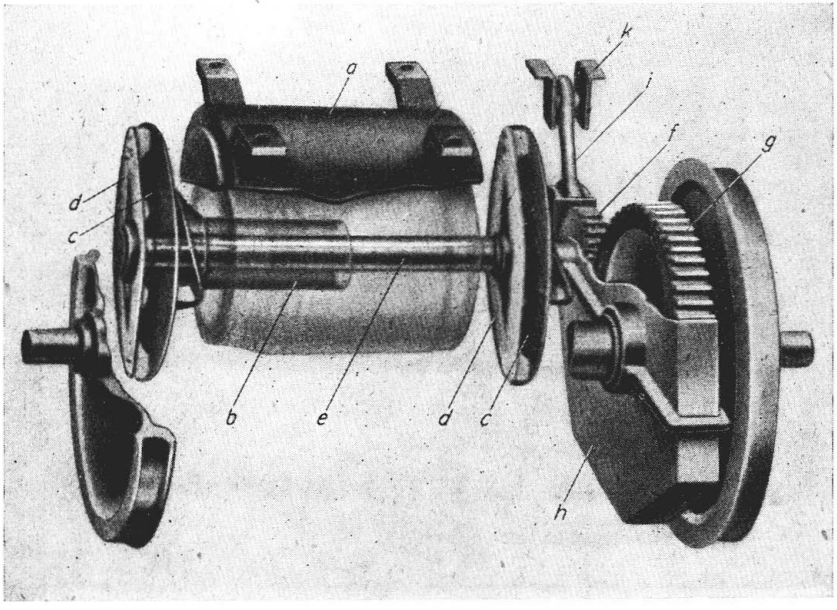


Bild 88. Kardan-Scheibenantrieb (Prinzipdarstellung)

a Gestellmotor
b Mitnehmerbüchse
c Stahlscheibe
d Mitnehmer
e Kardanwelle
f Ritzel
g Vorgelegerad
h Schutzkasten
i Pendel
k Aufhängung am Rahmen

Den Gesamtaufbau dieses Antriebes zeigt Bild 87. Der Motor ist im gefederten Drehgestell-Rahmen gelagert und liegt nicht, wie bisher üblich, über, sondern neben der Treibachse. Wie auch aus Bild 88 zu erkennen ist, wird in der hohlen Ankerwelle die auf Torsion beanspruchte Kardanwelle untergebracht, die an jedem Ende eine große Stahlscheibe trägt. Das Motordrehmoment wird von einer Buchse, die mit der Ankerwelle fest verbunden wird, über einen bügelförmigen Mitnehmer auf die erste Scheibe übertragen und von dort über einen zweiten, um 90° versetzten Mitnehmer auf die Torsionswelle. Am anderen Ende der Welle ist wieder ein Mitnehmer aufgepreßt, der das Drehmoment von der Welle auf die zweite Scheibe und über einen weiteren Mitnehmer an die Ritzelwelle weiterleitet.

Das Ritzel ist in dem Getriebeschutzkasten gelagert, der einerseits in Rollenlagern auf der Achse liegt und andererseits über eine Drehmomentstütze am gefederten Drehgestellrahmen aufgehängt ist (Bild 89). Um eine möglichst weiche Auflagerung zu erreichen, sind die Lagerstellen meist mit Silentblocks ausgestattet. Das große Vorgelege-Zahnrad sitzt fest auf der Treibachse. Das Federspiel wird durch leichte Verformung der Scheiben und geringe Schräglage der Torsionswelle ausgeglichen. Diese Teile sind aus besonders hochwertigem Stahl hergestellt und bedürfen bei der Fertigung einer gewissenhaften Kontrolle.

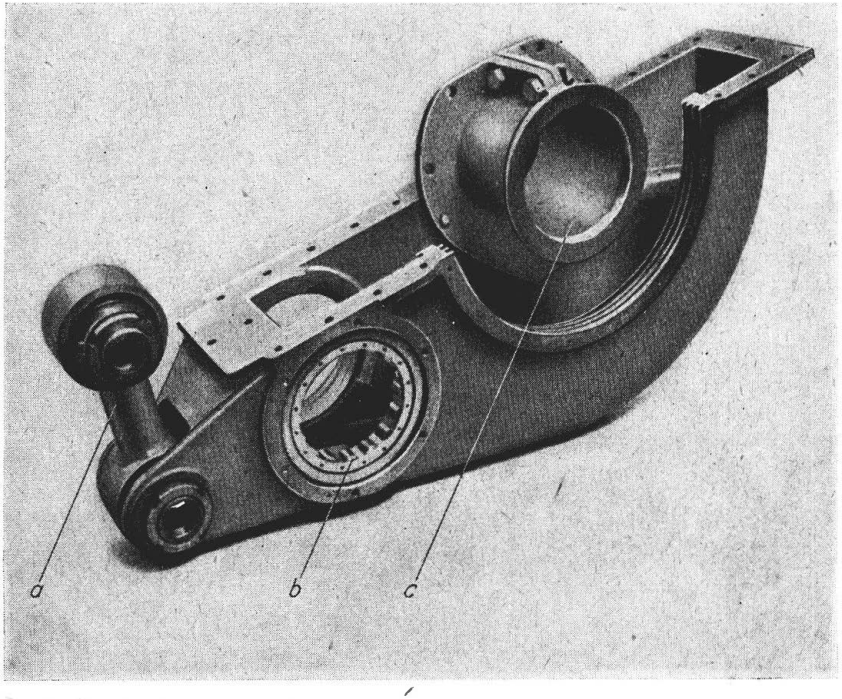


Bild 89. Getriebeschutzkasten

a Pendel b Wälzlager für Ritzel c Abdichtung an Treibachse

(Der Kasten wurde zum Zwecke der Aufnahme auf den Kopf gestellt.)

Um den Ausbau des Motors zu erleichtern, werden die einzelnen Antriebselemente durch einfache Zackenkupplungen miteinander verbunden.
Dieser Antrieb ist im Aufbau verhältnismäßig einfach und daher billig in der Herstellung. Auch die Unterhaltungskosten sind gering, da keinerlei Schmierstellen vorhanden sind und der Verschleiß der Antriebsorgane sehr gering ist. Nachteilig ist jedoch, daß die Herstellungskosten für den Motor wegen der hohlen Ankerwelle höher liegen und die ungefederten Massen durch das große Vorgelegezahnrad und den Anteil des recht stabil ausgeführten Getriebekastens wesentlich erhöht werden. Der Kardan-Scheibenantrieb ist im Gegensatz zu allen anderen bisher behandelten Antrieben stets einseitig. Er ist bei vielen elektrischen Lokomotiven der Schweizer Bundesbahn zu finden und wurde auch in die E 10 002 der Deutschen Bundesbahn eingebaut, wo er sich gut bewährte.

2.3238 *Kardan-Lamellenantrieb*

Dieser Einzelachsantrieb wurde von der Firma Sécheron, Genf, entwickelt und ermöglicht ebenfalls eine elastische Kraftübertragung vom gefederten Motor zum ungefederten Treibradsatz. Er entspricht in seinem Aufbau dem Scheibenantrieb, doch finden hier anstelle der Stahlscheiben mehrere Bündel dünner Stahllamellen Anwendung (Bild 90). Diese werden aus Federstahl hergestellt und so bemessen, daß ihre Beanspruchung verhältnismäßig gering ist. Sie sind in Richtung der Kraftübertragung starr, in der Querrichtung dagegen elastisch. Um den Ausbau des Motors zu erleichtern, werden auch hier, ähnlich wie beim Scheibenantrieb, Zackenkupplungen eingebaut, und zwar liegen diese zwischen Anker-

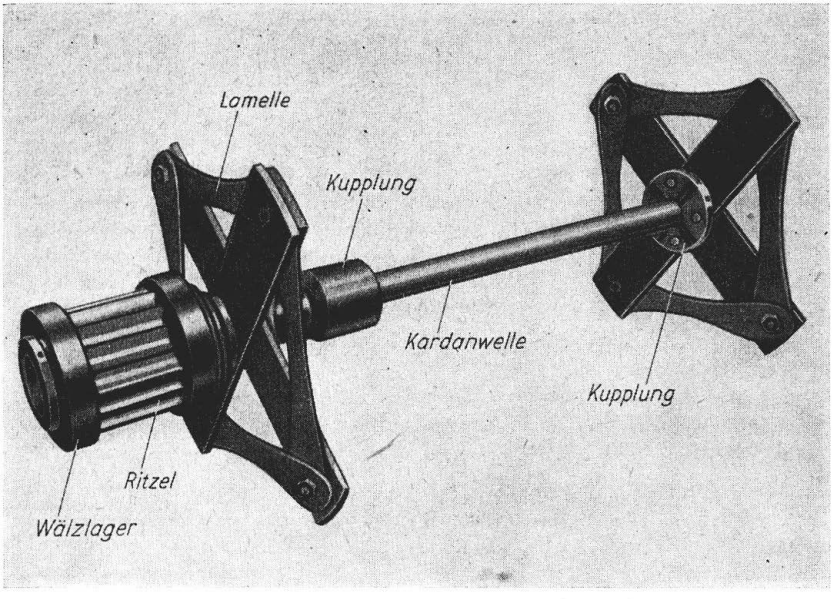


Bild 90. Lamellenantrieb mit Torsionswelle

welle und dem ersten Lamellensatz auf der einen Seite und der Kardanwelle und dem zweiten Lamellensatz auf der anderen Motorseite.
Im Gegensatz zu anderen Antrieben ist auch der Kardanlamellenantrieb einfach im Aufbau. Er weist einen sehr geringen Verschleiß auf und benötigt keinerlei Schmierung. Er ist bei zahlreichen Triebwagen und elektrischen Lokomotiven der Schweiz und auch bei der Baureihe E 499 der Tschechoslowakischen Staatsbahnen zu finden. Die Deutsche Bundesbahn verwendete ihn probeweise bei der E 10 004 und der E 10 005, bei denen er sich gleichfalls gut bewährte.

2.3239 *Kardan-Gummiringantrieb*

Die beiden vorgenannten Kardan-Antriebe haben den Nachteil, daß die ungefederte Masse des Treibradsatzes durch die nicht unbeträchtliche Masse des großen Vorgelegezahnrades und den Anteil des Getriebeschutzkastens erhöht wird. Dieser Mangel wird nun dadurch abgestellt, daß man diesen elastischen Kardan-Antrieb nicht mehr zwischen dem Motor und dem Ritzel, sondern zwischen dem großen Vorgelegezahnrad und dem Treibrad anordnet. Auf diese Weise ist es möglich, das gesamte Vorgelege im gefederten Rahmen zu lagern und die ungefederten Massen beträchtlich einzuschränken. Hinzu kommt, daß man anstelle der Stahlscheiben bzw. Stahllamellen zwei große Gummiringe verwendet, die nicht nur der elastischen Kraftübertragung dienen, sondern auch vertikale Stöße aufnehmen können.
Die Gesamtanordnung dieses Antriebes ist aus Bild 91 zu erkennen. Der Fahrmotor ist wieder neben dem Treibradsatz im gefederten Drehgestellrahmen untergebracht. Das Ritzel treibt über ein Zwischenrad das große Vorgelegezahnrad an, die beide in einem abgefederten Getriebeschutzkasten gelagert sind. Am großen Zahnrad befinden sich zwei Arme, die je einen radialen Getriebezapfen tragen, an denen ein großer Gummiring befestigt ist. Dieser ist gleichzeitig mit einem um 90° versetzten Mitnehmer verbunden, der an

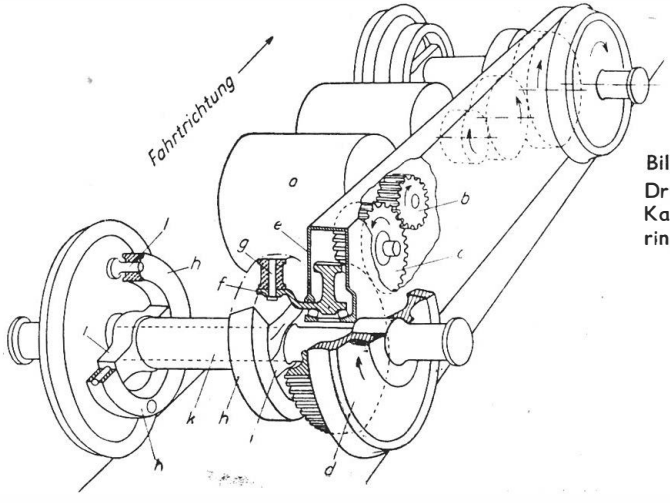


Bild 91
Drehgestell mit Kardan-Gummiringantrieb

a Fahrmotor
b Ritzel
c Zwischenrad
d Vorgelegerad
e Getriebeschutzkasten
f Kupplungsarm
g Getriebezapfen
h Gummiring
i Mitnehmer
k Kardan-Hohlwelle
l Kupplungszapfen

einer Kardan-Hohlwelle angebracht ist, welche die Achswelle mit einem allseitigen Spiel umschließt. Am anderen Ende dieser auf Torsion beanspruchten Hohlwelle sitzt ein zweiter Mitnehmer. Dieser trägt wiederum einen Gummiring, in den, um 90° versetzt, zwei axiale Kupplungszapfen eingreifen, die am Radstern befestigt sind. Auf diese Weise kann das Federspiel überwunden und die Antriebskraft weich und elastisch auf den Treibradsatz übertragen werden.
Dieser einseitige Kardan-Antrieb zeigt keinerlei Verschleiß und zeichnet sich daher durch äußerst niedrige Unterhaltungskosten aus. Er ist bei zahlreichen elektrischen Lokomotiven der Französischen Staatsbahnen zu finden (siehe Bild 260) und hat sich infolge der geringen ungefederten Massen auch bei sehr hohen Geschwindigkeiten (über 300 km/h) gut bewährt.

2.324 Sonstige Antriebe

Außer den obengenannten Triebwerken wurden noch einige weitere Einzelachsantriebe entwickelt, die jedoch nur in geringer Stückzahl gebaut wurden und daher als Versuchsausführungen anzusehen sind. Mit Ausnahme des Siemens-Gelenkantriebes, bei dem das Drehmoment von einer *vertikalen* Motorwelle über ein Kegelrad-Getriebe auf eine im Rahmen gelagerte Hohlwelle übertragen wird, ähneln diese Konstruktionen alle mehr oder weniger den vorstehend genannten Ausführungen, so daß es sich erübrigt, an dieser Stelle näher auf sie einzugehen.

3 Elektrische Ausrüstung einer Wechselstromlokomotive für 16 2/3 Hz

Während die ersten beiden Kapitel die elektrische Vollbahnlokomotive allgemein betreffen, ohne dabei einen grundsätzlichen Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromlokomotive zu machen, beschränken sich die Ausführungen dieses Kapitels auf die elektrische Ausrüstung der Wechselstromlokomotiven für 16⅔ Hz. Auf die zum Teil recht beträchtlichen Abweichungen der Gleichstromlokomotiven und die verschiedenen Bauarten der Wechselstromlokomotiven für 50 Hz wird in den folgenden Kapiteln hingewiesen. Um das Verständnis für den Aufbau und das Zusammenwirken der einzelnen Geräte und Einrichtungen zu erleichtern, ist es zweckmäßig, anhand eines Schaltbildes den Stromverlauf in der elektrischen Lokomotive vom Stromabnehmer bis zu den Schienen zu verfolgen. Dabei wird zunächst die für kleine bis mittlere Leistungen allgemein übliche Niederspannungssteuerung zugrunde gelegt, während die Hochspannungssteuerung später getrennt behandelt wird. Bild 92 zeigt den Gesamtaufbau einer Wechselstromlokomotive und läßt die Lage der einzelnen Ausrüstungsteile erkennen. In Bild 93 ist die Schaltung der wichtigsten Aggregate angegeben, wobei auf alle Nebeneinrichtungen und Hilfsbetriebe bewußt verzichtet wurde.

3.1 Hochspannungsteil

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen dem Hochspannungs-Starkstromkreis, der vom Stromabnehmer über Trennschalter, Dachleitung und Hauptschalter bis zur Primärwicklung des Haupttrafos reicht, und dem Niederspannungs-Starkstromkreis, der von der

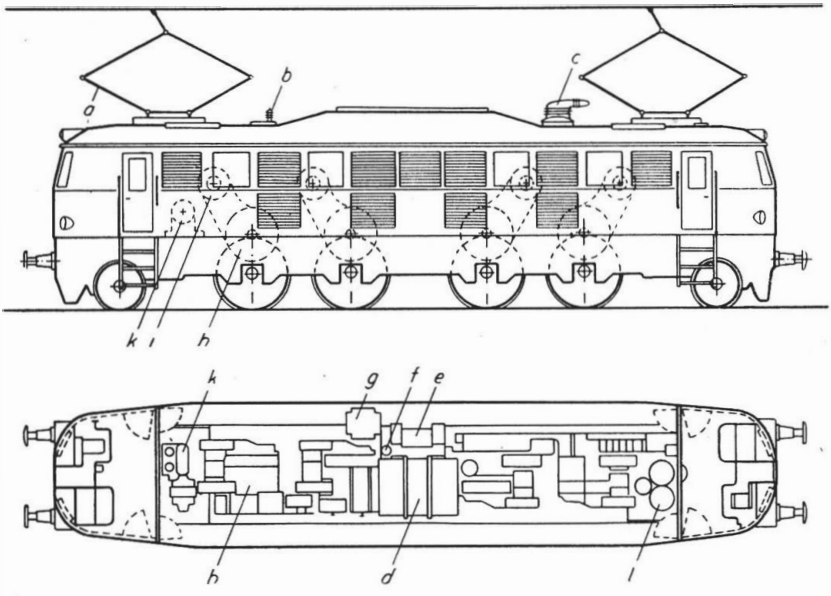


Bild 92. Geamtaufbau einer Wechselstromlokomotive

a Stromabnehmer
b Oberspannungswandler
c Hauptschalter
d Umspanner
e Lüfter für Umspanner
f Ölpumpe für Umspanner
g Steuerung
h Fahrmotor
i Lüfter für Fahrmotor
k Luftpresser
l Hauptluftbehälter

Sekundärwicklung des Haupttrafos über die Leistungssteuerung und Fahrtrichtungswender zu den Fahrmotoren geht.

3.11 Stromabnehmer

Während Dampf- und Diesellokomotiven ihre eigene Krafterzeugungsanlage stets mitführen und daher völlig freizügig sind, ist eine elektrische Lokomotive ständig von der Fahrleitung abhängig. Diese wird so aufgehängt, daß die elektrische Energie den Triebfahrzeugen auch bei hohen Geschwindigkeiten störungsfrei zugeführt werden kann. Die Fahrdrahthöhe beträgt in der Regel auf der freien Strecke 5500 mm, auf Bahnhöfen aus Sicherheitsgründen 5750 mm. Die höchste Fahrdrahtlage darf auf Bahhöfen 6000 mm, die tiefste (z. B. unter Brücken, in Tunneln oder in Bahnhofshallen) 4950 mm betragen.
Die Stromentnahme vom Fahrdraht geschieht durch den Stromabnehmer, der folgenden Bedingungen zu entsprechen hat, er muß

a) eine gut leitende Verbindung zwischen dem Fahrdraht und der elektrischen Ausrüstung der Lokomotive herstellen,

b) auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten eine ununterbrochene und möglichst lichtbogenfreie Stromabnahme gewährleisten,

c) die unterschiedlichen Fahrdrahthöhen schnell und schwingungsfrei ausgleichen,

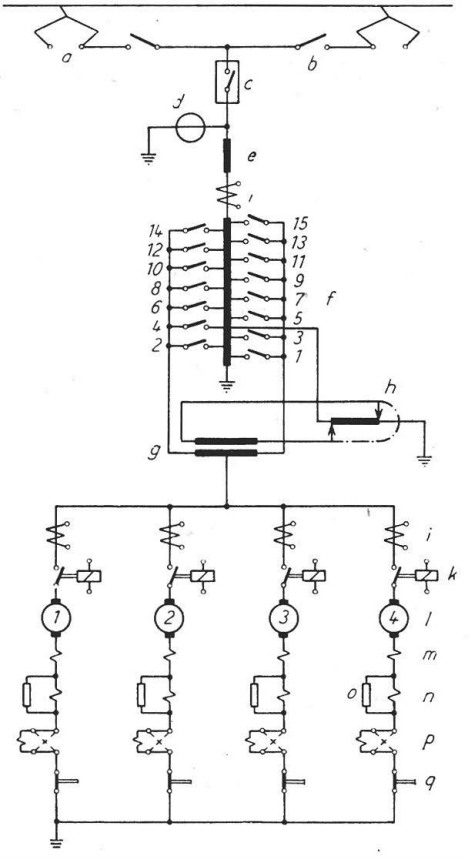


Bild 93
Prinzipschallbild einer Wechselstromlokomotive

a Stromabnehmer
b Trennschalter
c Hauptschalter
d Oberspannungswandler
e Hauptumspanner
f Schaltwerk
g Zusatzumspanner
h Feinregler
i Motorstromwandler
k Motortrennschütz
l Fahrmotor
m Kompensationswicklung
n Wendefeldwicklung
o Nebenschlußwiderstand
p Fahrtrichtungswender
q Motortrennschalter

d) ein schnelles Heben und Senken ohne allzu starke Stoßbeanspruchung der Fahrleitung und ohne Lichtbogenbildung ermöglichen,

e) durch geringe Trägheit des gesamten Gestänges auch den örtlichen Unregelmäßigkeiten des Fahrdrahtes leicht folgen,

f) eine große seitliche Stabilität auch bei starken Seitenschwingungen der Lokomotive aufweisen.

Außerdem sind folgende Forderungen zu erfüllen:

g) die Kontaktfläche darf durch die Bewegung des Gestänges nicht beeinträchtigt werden,

h) der Anpreßdruck soll von der Höhe des Fahrdrahtes unabhängig sein,

i) die durch den Fahrtwind hervorgerufenen, auf den Stromabnehmer wirkenden aerodynamischen Kräfte dürfen die Betriebssicherheit nicht beeinflussen,

k) die Form und die Lagerung der Schleifstücke müssen der Konstruktion der Fahrleitung entsprechen.

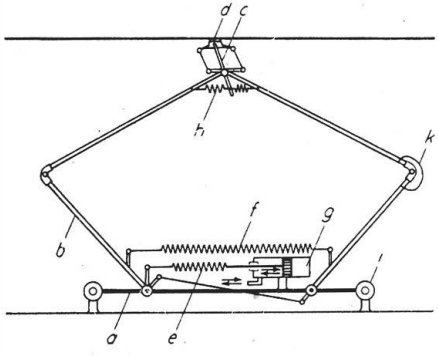


Bild 94
Scherenstromabnehmer

a Bügelrahmen
b Schere
c Wippe
d Schleifstück
e Hubfeder
f Ausgleichfeder
g Druckluftantrieb
h Wippenfeder
i Isolator
k Kupferlitze

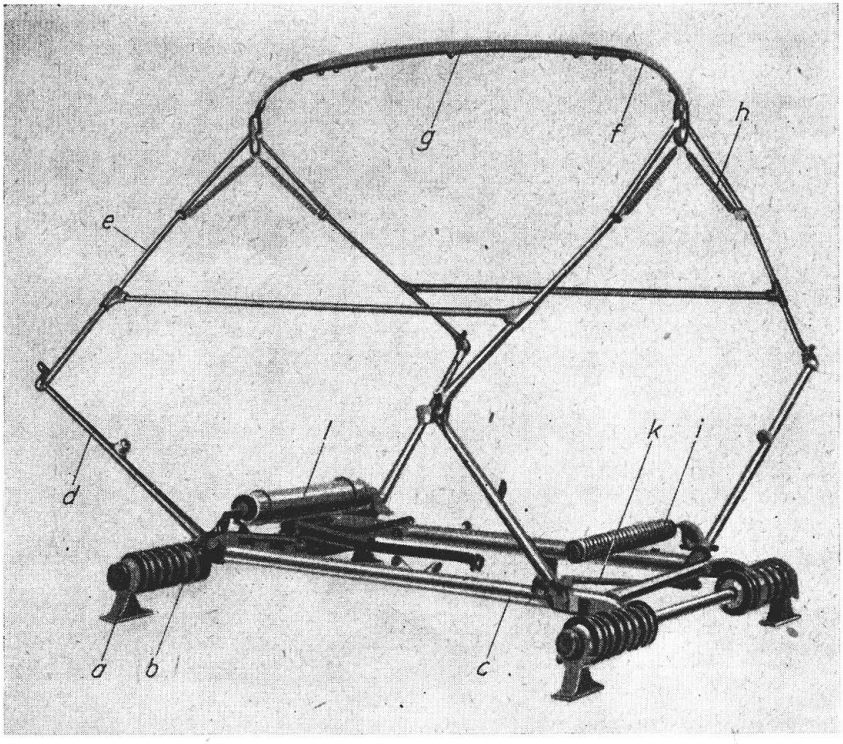


Bild 95. Scherenstromabnehmer

a Fuß
b Isolator
c Rahmen
d Scherenunterteil
e Scherenoberteil
f Wippe
g Schleifstück
h Wippenfeder
i Ausgleichfeder
k Kuppelstange
l Druckluftantrieb

Diese Voraussetzungen erfüllt am besten ein Scherenstromabnehmer (Bild 94 und 95). Er besteht aus

Bügelrahmen (Untergestell),
Schere mit Federung,
Wippe mit Federung und Schleifstück und
Antrieb mit Steuerung.

Der Bügelrahmen führt, wie der gesamte Stromabnehmer, Hochspannung und ist deshalb durch vier Tragisolatoren gegen das Lokomotivdach isoliert. Je nach Ausführung finden Glocken- oder Doppelglocken-Isolatoren, Rillenisolatoren oder auch einfache Stützisolatoren Anwendung.

Auf dem Untergestell ist die Schere gelagert. Sie setzt sich aus zwei Unter- und zwei Oberteilen zusammen, die gelenkig miteinander verbunden sind. Zwei der dazwischenliegenden vier Gelenke sind mit flexibler Kupferlitze überbrückt, um einen einwandfreien Stromübergang zu gewährleisten. Die Schere wird im allgemeinen aus nahtlos gezogenen Stahlrohren hergestellt. Es gibt auch Stromabnehmer, deren Scherenoberteile aus einer Alu-Legierung bestehen. Durch diese Gewichtsersparnis werden die beweglichen Teile weniger träge und können daher den Schwankungen des Fahrdrahtes besser folgen. Jedes Scherenunterteil besteht aus je zwei Armen, die durch eine querliegende Welle starr miteinander verbunden sind. Diese Wellen sind in den Rahmenknotenpunkten in Kugellagern drehbar gelagert. Die beiden Scherenunterteile sind auf der rechten und linken Seite durch je eine Kuppelstange miteinander verbunden, so daß stets eine symmetrische Bewegung der beiden Unterteile gewährleistet ist und ein Umkippen des gesamten Stromabnehmers nach vorn oder hinten vermieden wird.

Die Scherenoberteile tragen die Wippe, die in den oberen Gelenkpunkten pendelnd gelagert ist und durch vier Wippenfedern in der Mittelstellung gehalten wird. Während die Schere die Aufgabe hat, die großen Unterschiede in der Fahrdrahthöhe auszugleichen, soll die Wippe mit ihrer viel geringeren Masse bei kleinen Fahrdrahthöhenunterschieden für ständigen Kontakt sorgen. Es gibt Wippenbügel ohne Auflaufhörner, wie sie im allgemeinen bei der Deutschen Reichsbahn Verwendung finden und solche mit Hörnern (Bild 96). Letztere lassen eine schmalere und somit leichtere Ausführung des Stromabnehmeruntergestelles zu, jedoch ist die Gefahr einer Beschädigung des Fahrdrahtes bei einer evtl. Bügelentgleisung größer. Während der Fahrt wird die Wippe durch die Reibung des Schleifstückes am Fahrdraht und durch den Winddruck leicht nach hinten geneigt.

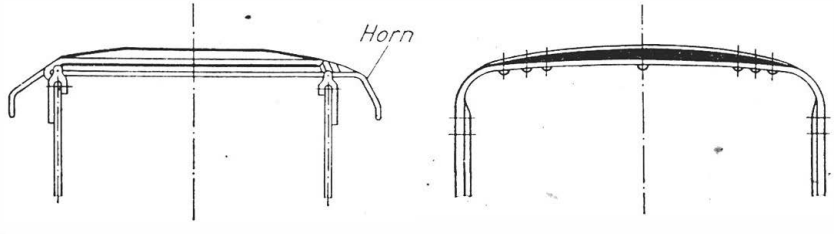


Bild 96. Schleifstück mit und ohne Hörnern

Um jedoch zu vermeiden, daß das Schleifstück dann nur mit einer Kante den Fahrdraht berührt, ist meist noch eine Parallelführung eingebaut. Diese sorgt dafür, daß das Schleifstück unabhängig von der Neigung der Wippe mit einer großen Berührungsfläche waagerecht am Fahrdraht anliegt.

Die Wippe trägt das leicht gewölbte Schleifstück, das früher aus Aluminium hergestellt wurde. Bei dem Stromübergang entstanden Lichtbogen, die den Fahrdraht aufrauhten, zu einem großen Verschleiß an Draht und Schleifstück führten und beträchtliche Störungen in den benachbarten Rundfunkgeräten hervorriefen. Diese Mängel werden wesentlich gemildert, seitdem man Kohleschleifstücke verwendet. Die Wippe wird dann aus Stahlblech hergestellt oder mit zwei Verstärkungsrippen aus Leichtmetall gegossen und trägt in einer schwalbenschwanzförmigen Nut das Kohleschleifstück (Bild 97). Dieses wird aus Elektrokohle hergestellt und ist gegenüber Schlag und Stoß sehr empfindlich. Da die eingegossenen Kohleschleifstücke beim Brennen leicht rissig werden, ist es neuerdings üblich, sie getrennt zu gießen und dann durch eine angeschraubte Leiste zu befestigen.

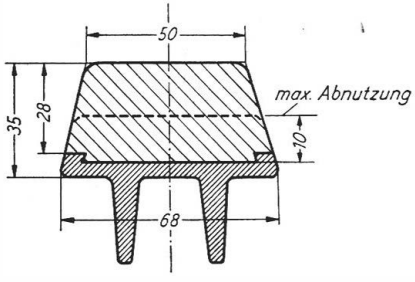


Bild 97
Eingegossenes Schleifstück eines Scherenstromabnehmers

Um eine Rillenbildung im Schleifstück des Stromabnehmers zu vermeiden, wird die Fahrleitung auf geraden Streckenabschnitten im Zickzack geführt und weicht dann bis zu 400 mm nach beiden Seiten von der Mittellage ab. Das Schleifstück hat eine Länge von etwa 1300 mm und wird zu beiden Seiten durch zwei Auflaufstücke begrenzt, so daß ein Entgleisen des Stromabnehmers praktisch ausgeschlossen ist.

Für ein Kohleschleifstück sind etwa 75···100 A als mittlere Dauerbeslastung zulässig, was bei einer Fahrdrahtspannung von 15 kV einer Dauerleistung von etwa 1100···1500 kVA entspricht. Das bedeutet, daß für eine Wechselstromlokomotive mittlerer Größe ein Stromabnehmer genügen würde. Um jedoch bei einem evtl. Springen des Bügels und beim Befahren von Streckentrennern eine Unterbrechung des Stromes und somit schwere Beschädigungen des Trafos und der Fahrmotoren zu vermeiden, wird im Zugdienst meist mit zwei Stromabnehmern gefahren. Rangierlokomotiven verwenden dagegen im allgemeinen nur einen Stromabnehmer.

Versuche mit schnellfahrenden Lokomotiven haben gezeigt, daß es auch bei sehr hohen Geschwindigkeiten zweckmäßig ist, mit nur einem Stromabnehmer zu fahren, weil durch den Windauftrieb der Anpreßdruck des vorderen Stromabnehmers stark vergrößert wird. Dadurch werden die elastisch aufgehängten Fahrleistungen leicht angehoben und die Stromabnahme verschlechtert. Um dies zu vermeiden, sind viele Bahnverwaltungen bereits dazu übergegangen, jeweils nur den, in Fahrtrichtung gesehen, hinteren Bügel aufzurichten. In diesem Falle ist jedoch eine einwandfreie Stromzufuhr nur dann gewährleistet, wenn man die Wippe mit zwei Schleifstücken versieht (Bild 98).

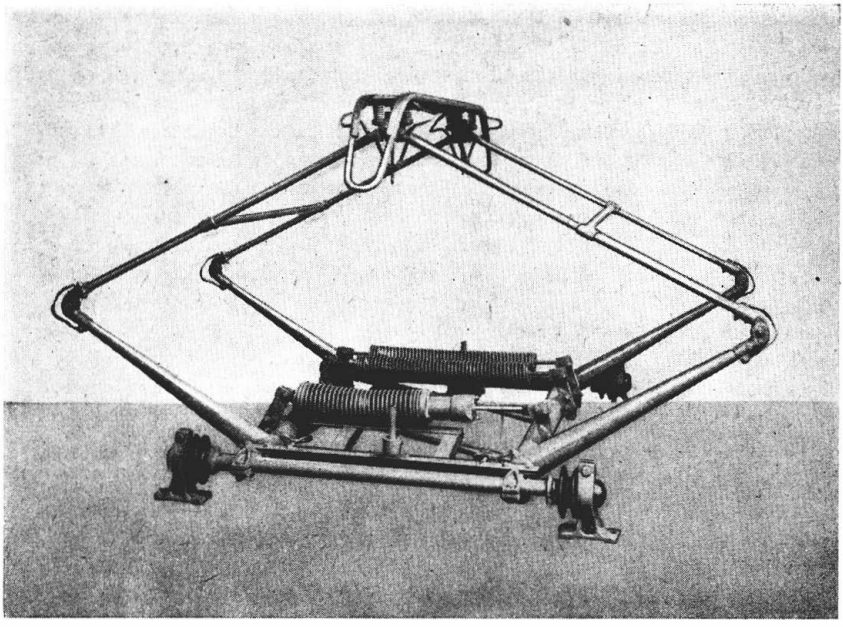


Bild 98. Scherenstromabnehmer mit zwei Wippen

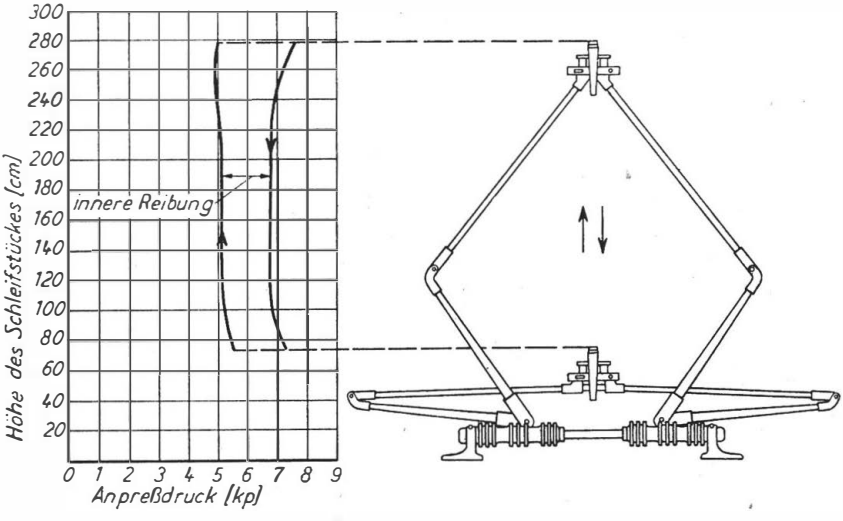


Bild 99. Anpreßdruck eines Stromabnehmers

Um das Gewicht der Schere teilweise abzufangen, sind ein oder zwei Ausgleichsfedern vorhanden, die beim Aufrichten der Schere entspannt werden. Eine dritte Feder, die sogenannte Hubfeder, übernimmt den Rest des Scherengewichtes und preßt das Schleifstück gegen den Fahrdraht. Dieser Anpreßdruck kann durch Einstellen der Federn verändert werden, er soll jedoch trotz des großen Hubes nach Möglichkeit bei den verschiedenen Fahrdrahthöhen gleich bleiben. Er darf 7 kp nicht überschreiten, um ein Anheben des Fahrdrahtes und einen zu starken Verschleiß von Draht und Schleifstück zu vermeiden. Er soll aber auch nicht unter 3 kp absinken, da ein zu geringer Anpreßdruck leicht zum Abklappen des Bügels und zu Lichtbogenbildung führen kann. Der Anpreßdruck läßt sich durch angehängte Gewichte leicht ermitteln. Bild 99 zeigt die Drücke eines aufsteigenden und eines niedergedrückten Stromabnehmers. Die Differenz beider Schaulinien ist ein Maß für die innere Reibung des Stromabnehmers.

Es gibt verschiedene Bauarten von Stromabnehmern, die durch Kurzbezeichnungen wie Hise 7, SBS 10, SBS 39 usw. gekennzeichnet sind. Außer der vorgenannten Einheitsbauart wurde für schnellfahrende Lokomotiven mit einer Höchstgeschwindigkeit über 120 km/h ein besonderer Stromabnehmer entwickelt. Dieser weist einen viel kleineren Luftwiderstand auf und führt auch bei hohen Geschwindigkeiten nur geringe seitliche Schwankungen

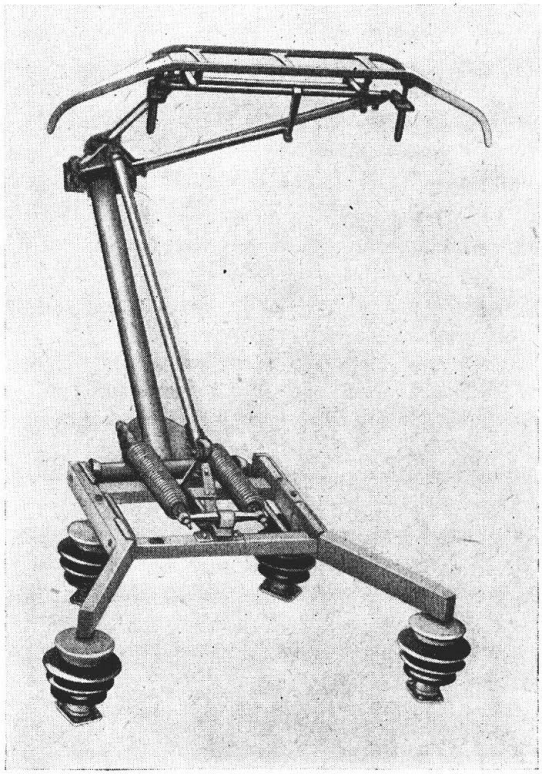


Bild 100
Einseitiger Stromabnehmer

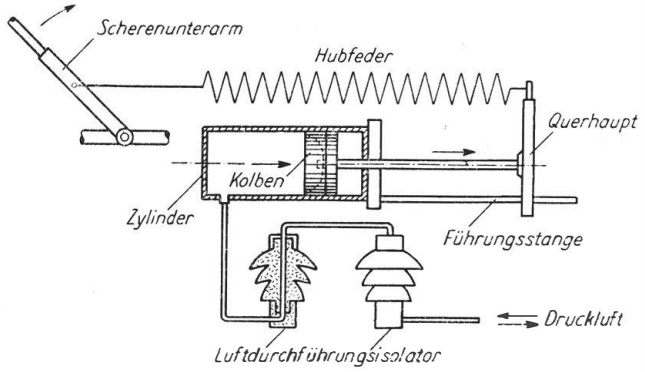


Bild 101
Antrieb für
Stromabnehmer

aus. Die Scherenoberteile und auch das Wippenrohr bestehen bei dieser Bauart nicht aus Stahl, sondern aus Bondur, einer besonders leichten und festen Aluminiumlegierung. Durch diese Gewichtsersparnis werden die beweglichen Teile weniger träge und können daher den Schwankungen des Fahrdrahtes besser folgen.

An neueren elektrischen Lokomotiven sind Stromabnehmer zu finden, deren Schere nicht den üblichen symmetrischen Aufbau aufweist, sondern einseitig ausgebildet ist (Bild 100). Wegen der geringen Masse ist diese Bauart für hohe Geschwindigkeiten besonders geeignet (siehe Bilder 272 und 274).

Die Stromabnehmer werden im allgemeinen durch Druckluft aufgerichtet. Zu diesem Zweck ist bei der Einheitsbauart auf einem der Rahmenrohre ein Luftzylinder mit Kolben angebracht, der die Hubfeder spannt und damit die Schere anhebt, sobald Druckluft zugeführt wird (Bild 101). Wird der Zylinder entlüftet, so senkt sich der Stromabnehmer und drückt durch sein Eigengewicht den Kolben in seine Ausgangslage zurück. Die Druckluft von mindestens 4 at Überdruck wird dem unter Spannung stehenden Zylinder über zwei

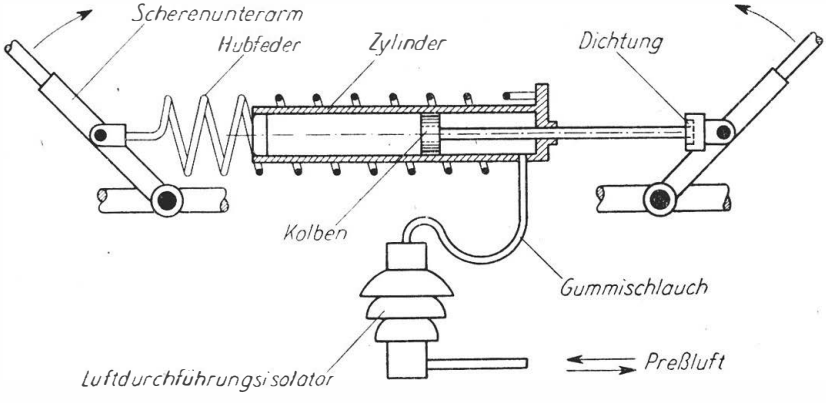


Bild 102. Antrieb für Stromabnehmer

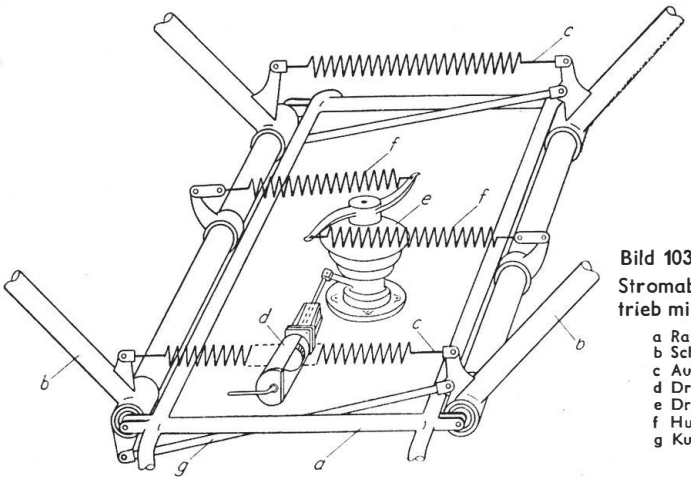


Bild 103
Stromabnehmerantrieb mit Drehisolator

a Rahmen
b Scherenunterarm
c Ausgleichfeder
d Druckluftantrieb
e Drehisolator
f Hubfeder
g Kuppelstange

Luftdurchführungisolatoren zugeführt, von denen der eine am Rahmen des Stromabnehmers, der andere auf dem Lokomotivdach befestigt ist.

Einen anderen Antrieb für Stromabnehmer zeigt Bild 102. Dabei ist der Druckluftzylinder innerhalb der Hubfeder angeordnet, die an einem Scherenunterteil befestigt ist, während die Kolbenstange am anderen Arm der Schere angreift. Strömt Druckluft in den Zylinder ein, so wird die Hubfeder gespannt und die Wippe angehoben. Wird jedoch der Zylinder entlüftet, so senkt sich der Schleifbügel und zieht durch die Hubfeder den Kolben in seine Ausgangsstellung zurück. Da sich bei diesem Antrieb nicht nur der Kolben, sondern auch der Zylinder bewegt, erfolgt die Luftzufuhr über einen Gummischlauch. Gummi ist ein guter Isolator, und so wird bei dieser Ausführung nur ein Luftzuführungsisolator benötigt.

Bei neueren Stromabnehmern ist der Druckluftzylinder auf dem Lokomotivdach befestigt. Er steht somit nicht unter Hochspannung, so daß die Luftdurchführungsisolatoren entfallen können. Als isolierendes Element dient ein sogenannter Drehisolator, der die Bewegung des Druckluftantriebes gleichzeitig auf die beiden Hubfedern überträgt, die an den Scherenunterteilen angreifen (Bild 103). Um zu vermeiden, daß beim schnellen Anheben das Schleifstück kräftig gegen den Fahrdraht schlägt und dabei evtl. beschädigt wird, rüstet man neuere Antriebe mit einem Drosselventil aus. Dadurch kann die Luft langsam in den Hubzylinder einströmen und den Bügel ohne Stoß aufrichten.

Die Bügelsteuerung erfolgt im allgemeinen pneumatisch, nur bei einigen Neubaulokomotiven elektro-pneumatisch. Bild 104 zeigt einen Rohrleitungsplan für pneumatische Steuerung. Das Heben und Senken der Stromabnehmer erfolgt durch das Führerbügelventil, das sich auf jedem Führerstand befindet und zugleich für die Betätigung des Hauptschalters verwendet wird. Es enthält einen Drehschieber, der die Rohrleitungen zu den Stromabnehmern und dem Hauptschalter entweder mit dem Druckluftbehälter oder einem Auspuffrohr verbindet. Von den insgesamt sieben Stellungen betreffen vier die Bügelbetätigung und nur in der Abschlußstellung kann der Handgriff aufgesteckt oder abgezogen werden. Außerdem ist bei Lokomotiven mit zwei Stromabnehmern auf dem einen

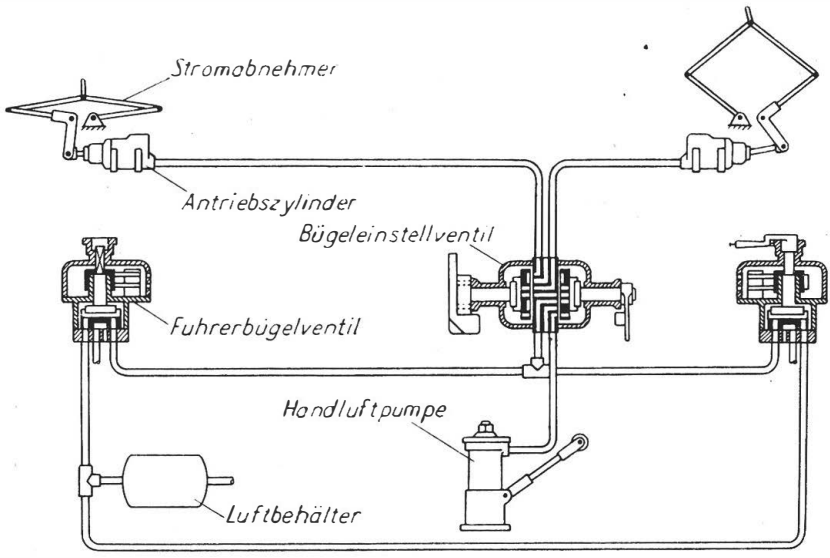


Bild 104. Rohrleitungsplan für pneumatische Bügelsteuerung

Führerstand noch ein Bügeleinstellventil vorhanden, das zwei Drehschieberventile enthält. Dieses ermöglicht das Abschalten eines Stromabnehmerantriebes und das Umschalten von „Motorpumpe" auf „Handluftpumpe". Die Handluftpumpe wird benötigt, wenn zu Beginn der Fahrt noch keine Druckluft vorhanden ist und ein Stromabnehmer aufgerichtet werden soll.

3.12 Oberspannungsleitung

Die beiden Stromabnehmer einer elektrischen Lokomotive sind durch eine Oberspannungsleitung, die sogenannte Dachleitung, miteinander verbunden. Dadurch wird eine ordnungsgemäße Stromzuführung auch dann gewährleistet, wenn ein Stromabnehmer z. B. bei hoher Fahrgeschwindigkeit durch Springen ausfällt. Diese Leitung steht, ebenso wie die Stromabnehmer, unter Hochspannung und ist daher rot gestrichen. Man stellt sie aus Stahlrohren, Flacheisen oder Kupferseilen her, die an Isolatoren auf dem Dach der Lokomotive befestigt sind. Wird die Hochspannungsleitung jedoch in den Maschinenraum geführt, so verwendet man ein Hochspannungskabel. Dieses besteht aus einem verzinnten Kupferseil, das durch eine starke Isolation aus Gummi oder Papier, durch ein Drahtgeflecht und durch ein Baumwollgewebe gegen Beschädigung und Feuchtigkeit geschützt ist. Um Überspannungen, die bei Gewittern oder Schaltvorgängen auftreten können, von der elektrischen Ausrüstung der Lokomotive fernzuhalten, wird häufig noch ein Überspannungsschutz eingebaut. Man verwendet hierfür sogenannte SAW-Ableiter (**S**pannungs**a**bhängige **W**iderstände). Einen gewissen Schutz bieten aber auch schon die Eingangswindungen des Hauptumspanners, sofern sie mit verstärkter Isolation versehen sind.

3.13 Trennschalter

Wie aus Bild 93 zu erkennen ist, sind in die Hochspannungsleitung noch zwei Trennschalter eingebaut, die es gestatten, den einen oder anderen Stromabnehmer bei evtl. Beschädigungen abzuschalten. Diese Schalter sind an Stützisolatoren auf dem Dach der Lokomotive befestigt und bestehen aus je einem feststehenden Kontakt und einem beweglichen, waagerecht liegenden Trennmesser. Die Trennschalter werden vom Führerstand oder vom Maschinenraum aus mit Hilfe eines Handgriffes bedient. Bei Neubaulokomotiven für Einbügelbetrieb werden die beiden Trennschalter meist in einem Schalter vereinigt, der mit zwei Trennmessern ausgerüstet ist und insgesamt vier Schaltstellungen zuläßt.
Um Unfälle zu vermeiden, ist es ratsam, noch einen besonderen Erdungsschalter einzubauen und diesen mit den Stromabnehmern und Trennschaltern so zu kuppeln, daß bei gesenktem Stromabnehmer die Dachleitung stets geerdet ist.

3.14 Hauptschalter

Verfolgt man den Hochspannungs-Starkstromkreis gemäß Bild 93 weiter, so stößt man auf den Haupt- oder Leistungsschalter. Dieser hat nicht nur die Aufgabe, normale Betriebsströme abzuschalten, sondern er soll auch bei evtl. eintretenden Störungen die gesamte elektrische Ausrüstung der Lokomotive schützen. Er muß daher imstande sein, bei einem unzulässigen Ansteigen des Stromes selbsttätig die elektrische Anlage der Lokomotive innerhalb kürzester Frist, d. h. in einer Zeit von etwa 0,05 s, vom Netz zu trennen und bei evtl. auftretenden Kurzschlüssen größere Zerstörungen zu verhüten. Er schaltet aber auch automatisch ab, wenn die Fahrdrahtspannung stark absinkt oder ganz ausbleibt, um bei Rückkehr der vollen Spannung eine Beschädigung der Fahrmotoren zu vermeiden.
Um diesen verschiedenen Anforderungen zu genügen, wurden für elektrische Lokomotiven besondere Schnellschalter entwickelt, die in der Lage sind, Ströme bis 15000 A abzuschalten und den bei der Stromunterbrechung entstehenden Lichtbogen so schnell zu löschen, daß ein Verschmoren der Kontakte vermieden wird. Werden diese Kontakte jedoch langsam voneinander getrennt oder bleiben sie sogar in geringer Entfernung voneinander stehen, so bildet sich ein Stehlichtbogen, der zu schweren Schäden oder sogar zur völligen Zerstörung des Schalters führen kann.
Kleine elektrische Lokomotiven und Triebwagen, bei denen die Unterbringung eines so schweren Leistungsschalters nicht möglich ist, erhalten leichtere Schalter, die lediglich das betriebsmäßige Ein- und Ausschalten übernehmen. Als Kurzschluß- und Überlastschutz werden dann Hochspannungssicherungen eingebaut.
Für die elektrischen Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn wurden Ölschalter, Expansionsschalter und Druckgasschalter entwickelt. Alle drei Ausführungen haben folgende Bauteile gemeinsam:

a) ein oder mehrere Kontaktpaare mit einem festen und einem beweglichen Kontakt,

b) ein Schaltwerk zum Bedienen des beweglichen Kontaktes und

c) einen Schalterantrieb mit Auslöser.

3.141 Ölschalter

Ältere elektrische Lokomotiven, die etwa vor dem Jahre 1933 in den Dienst gestellt wurden, sind mit einem Ölschalter ausgerüstet. Der grundsätzliche Aufbau eines Ölschalters ist aus Bild 105 zu erkennen. Man ordnet also mehrere Unterbrechungsstellen hintereinander an und öffnet diese gleichzeitig, um den Lichtbogen schneller löschen zu können.

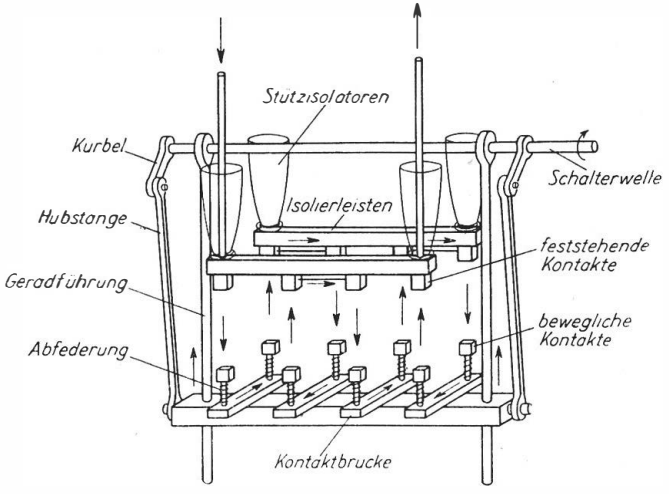


Bild 105
Schematische Darstellung des Ölschalters

Es gibt zwei um 30 mm im Hub voreilende Kontakte für den Schutzwiderstand und sechs in Reihe geschaltete Hauptkontakte. Die festen Kontakte sind an mehreren Isolatoren befestigt, durch die auch die Zu- und Ableitungen führen, während die beweglichen Kontakte paarig auf leitenden Kontaktbrücken befestigt sind. Diese sind auf einem Balken aus Isolierstoff angeordnet, der sich in vertikaler Richtung bewegen kann. Um einen gleichmäßigen Druck und somit auch einen guten Stromübergang zu erreichen, sind die unteren Kontaktklötze einzeln abgefedert.

Die Schaltbewegung wird von einem getrennt angeordneten Antrieb über Schalterwelle, Kurbel und Hubstange vorgenommen (Bild 106). Beim Einschalten werden zwangsläufig die Ausschaltfedern gespannt, die beim Auslösen des Klinkenschlosses von sich aus den gesamten Ausschaltvorgang bewerkstelligen. Dadurch werden die Kontakte schnell voneinander getrennt. Außerdem erreicht man bei diesem Schalter ein schnelles Abreißen der Lichtbögen dadurch, daß sämtliche Kontakte unter Öl liegen. Öl hat eine größere elektrische Durchschlagsfestigkeit als Luft und dient gleichzeitig als Kühlung.

Als Schalteröl darf nur reines, helles, ganz dünnflüssiges, wasser- und säurefreies Mineralöl verwendet werden. Seine Durchschlagsfestigkeit muß mindestens 80 kV/cm betragen, sein Flammpunkt darf nicht unter 145 °C, sein Brennpunkt nicht unter 165 °C liegen. Es muß von Zeit zu Zeit erneuert werden, da bei der Bildung von Lichtbögen kleine Mengen von Öl verkohlen und das gesamte Öl dadurch dunkel und dickflüssig wird. Ölgase, die sich bei schweren Abschaltungen bilden, entweichen durch Entlüftungsöffnungen im Deckel ins Freie.

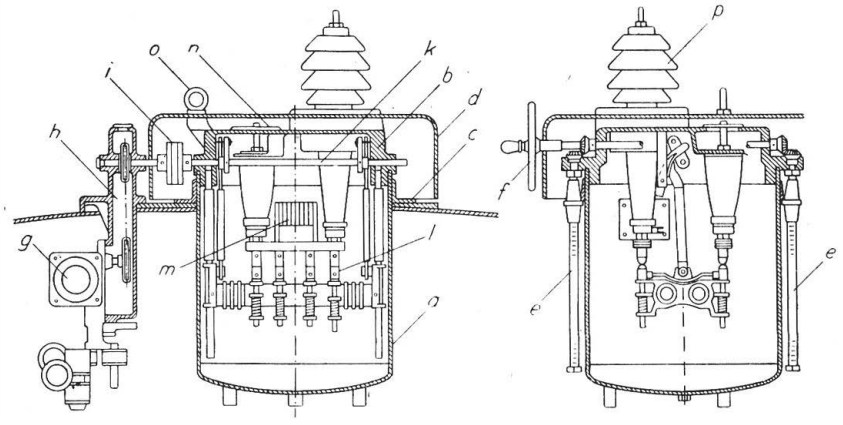


Bild 106. Ölschalter im Schnitt

a Ölkessel
b Deckel
c Winkeleisenring
d Schutzhaube
e Hubspindel
f Handrad
g Antriebszylinder
h Kettenantrieb
i Kupplung
k Schalterwelle
l Schaltkontakt
m Schutzwiderstand
n Explosionsklappe
o Aufhängeöse
p Isolator

Um den Schalter gut überwachen und das Öl leicht erneuern zu können, ist der Einheitsölschalter so eingerichtet, daß man ihn mit Hilfe von Hubspindeln leicht aus dem feststehenden Ölkessel herausheben kann (Bild 107). Dieser ist geschweißt und mit einem Hartpapierzylinder ausgekleidet, damit die Spannung nicht zur Wand überschlägt. Der Kessel hängt mit einem angenieteten Ringflansch im Dach der Lokomotive, so daß nur eine kurze Zuführungsleitung erforderlich ist und außerdem Platz im Maschinenraum eingespart wird. Der Ölkessel ist durch einen Deckel dicht abgeschlossen, so daß von außen keine Feuchtigkeit eindringen kann. Solange der vorgeschriebene Ölstand eingehalten und dadurch der Luftzutritt zu den Kontakten verwehrt wird, besteht keine Explosionsgefahr.

Der Ölschalter wird durch das Führerbügelventil mit Hilfe von Druckluft ein- und elektrisch ausgeschaltet. Außerdem kann er jederzeit unmittelbar von Hand ausgeschaltet werden. Bei elektrischen Lokomotiven für Wendezugbetrieb wird der Schalter vom Führerstand aus mittels eines Führerbügelschalters ausschließlich elektrisch ein- und ausgeschaltet.

Ist der Hauptschalter ausgeschaltet, so ist auch bei angelegten Stromabnehmern die gesamte elektrische Ausrüstung im Maschinenraum spannungsfrei. Trotzdem dürfen irgendwelche Arbeiten nur bei gesenkten Stromabnehmern ausgeführt werden. Eine Vorschrift für die Behandlung und Bedienung von Bahnölschaltern legt unter anderem die genauen Untersuchungsfristen fest, um Betriebsstörungen infolge unsachgemäßer Pflege von vornherein auszuschließen.

Ölschalter wurden in die elektrischen Lokomotiven der Baureihen E 04, E 17, E 21 und E 75 eingebaut und haben sich dort gut bewährt. Sie wurden jedoch später durch öllose Schalter verdrängt, die wesentlich leichter sind, keine Brand- und Explosionsgefahr aufweisen und höhere Schaltgeschwindigkeiten zulassen.

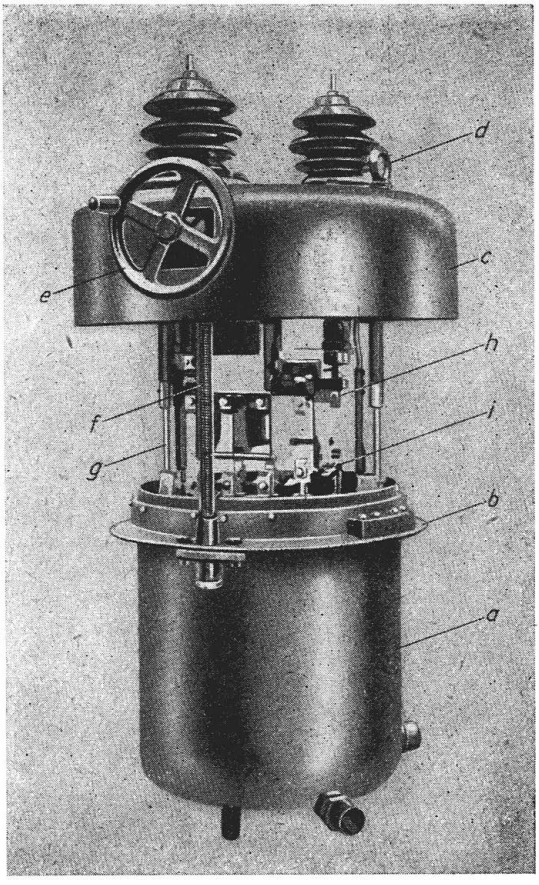


Bild 107
Ölschalter
(Haube angehoben)

a Ölkessel
b Ringflansch
c Deckel
d Aufhängeöse
e Handrad
f Hubspindel
g Geradführung
h feste Kontakte
i Kontaktbrücke

3.142 Expansionsschalter

Neuere elektrische Lokomotiven sind mit einem Expansionsschalter ausgerüstet, der gegenüber dem Ölschalter verschiedene Verbesserungen aufweist. Der Aufbau eines Expansionsschalters ist aus den Bildern 108 und 109 zu ersehen. Seine Grundplatte, die wiederum am Dach der Lokomotive befestigt wird, trägt den Durchführungsisolator und den Stützisolator, die oben durch eine Platte versteift sind. Darüber liegt das durch eine Schutzhaube verdeckte Schaltgestänge. Der Antriebszylinder und auch der Teil des Schalters, in dem der Strom unterbrochen wird, liegen unterhalb des Daches. Durch den hohlen Stützisolator geht die aus Isoliermaterial bestehende Zugstange hindurch, während in dem Durchführungsisolator die Stromschiene und der bewegliche Schaltstift untergebracht sind. Der Strom fließt von der Dachleitung zum Anschlußbolzen am Deckel und über die Stromschiene zum Gleitschaltstück, wo er auf den beweglichen Schaltstift übergeht. Dieser be-

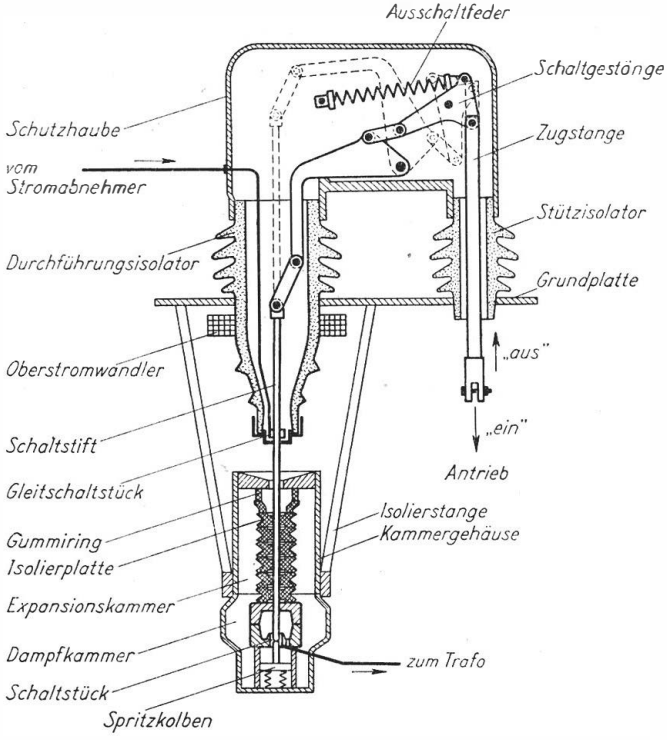


Bild 108
Expansionsschalter im Schnitt

rührt beim Einschalten das Schaltstück, von dem aus der Strom über eine kurze Verbindung an den Hauptumspanner weitergeleitet wird.

Im Gegensatz zum Ölschalter, bei dem auch die abgehende Leitung über dem Dach liegt und daher einen besonderen Durchführungsisolator erfordert, ist beim Expansionsschalter die abgehende Leitung bereits im Maschinenraum untergebracht.

Der Strom wird nur an einer Stelle unterbrochen, und zwar in dem Kammergehäuse, das an vier Isolierstangen an der Grundplatte aufgehängt ist. Es enthält im oberen Teil die Ausdehnungskammer, in der mehrere Isolierplatten durch einen Gummiring zusammengedrückt werden. Im unteren Teil liegen die Dampfkammer und das Schaltstück, das tulpenförmig ausgebildet ist, so daß der Schaltstift beim Einschalten einen guten Kontakt herstellt. Gleichzeitig drückt er den Spritzkolben nach unten in die Spritzkammer, die mit einem Löschmittel mit großem Ausdehnungsvermögen gefüllt ist.

Beim Ausschalten wird der Schaltstift durch Ausschaltfedern, die beim Einschalten gespannt wurden, aus dem Schaltstück schnell herausgerissen. Der Spritzkolben folgt unter dem Einfluß der darunter liegenden Feder und spritzt dem hochschnellenden Stift eine kleine Menge Schaltflüssigkeit nach, die in die Dampfkammer und in die Hohlräume zwischen den Isolierplatten gelangt. Der zwischen Schaltstift und Schaltstück entstehende Lichtbogen verdampft einen Teil des Löschmittels, und der dabei entstehende sehr hohe Druck preßt

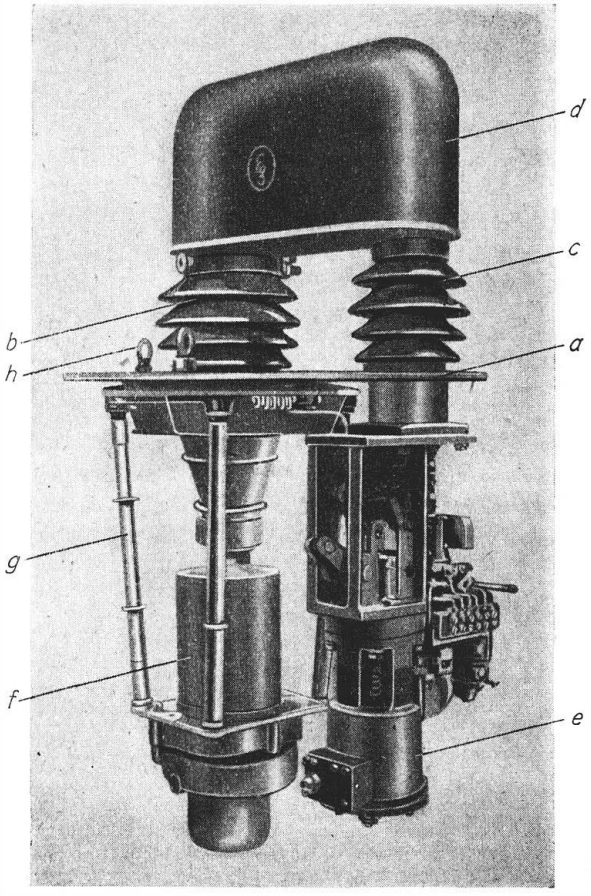


Bild 109
Expansionsschalter

a Grundplatte
b Durchführungsisolator
c Stützisolator
d Schutzhaube
e Antriebszylinder
f Kammergehäuse
g Isolierstange
h Aufhängeöse

den Gummiring zusammen und die Isolierplatten auseinander. Durch die dabei entstehenden ringförmigen Spalten kann der Dampf entweichen (Expansion), und die plötzliche Druckminderung bringt den Lichtbogen sofort zum Erlöschen. Der Dampf kondensiert dann wieder, und das Löschmittel fließt in die Spritzkammer zurück, so daß ein Ergänzen dieser Flüssigkeit nur in längeren Zeiträumen notwendig ist.

Um den Lichtbogen schnell und sicher zu löschen, muß der Schaltstift in kurzer Zeit einen großen Weg zurücklegen. Dies erreicht man durch Zwischenschalten von Kniehebeln. Außerdem erfolgt eine einwandfreie Löschung nur dann, wenn der sinusförmig verlaufende Strom gerade seinen Nullwert erreicht. Ist jedoch beim Nulldurchgang der Spannung der Mindestlöschabstand der beiden Kontakte noch nicht erreicht, dann brennt der Lichtbogen weiter bis zum nächsten Nulldurchgang. Will man diese Mehrbeanspruchung des Schalters vermeiden, so kann man einen Synchronauslöser einbauen und dadurch das selbsttätige

Abschalten infolge Überstromes so regeln, daß beim Nulldurchgang gerade der Mindestlöschabstand erreicht ist.
Auch der Expansionsschalter wird über das Führerbügelventil durch Druckluft ein- und elektrisch ausgeschaltet. Mit Expansionsschaltern sind die meisten elektrischen Lokomotiven der Baureihe E 44 und ein Teil der Lokomotiven der Baureihen E 04 und E 17 ausgerüstet.

3.143 Druckgasschalter

Auch diese Bauart findet bei neueren elektrischen Lokomotiven Anwendung und unterbricht, genau wie der Expansionsschalter, den Strom beim Abschalten nur einmal. Druckgasschalter arbeiten ohne jegliche Flüssigkeit und blasen den Lichtbogen durch ein strömendes Druckgas, im allgemeinen Druckluft, aus. Sie sind daher brand- und explosionssicher, wesentlich leichter als die vorgenannten Schalter und können bei relativ kleinen Abmessungen für sehr hohe Abschaltleistungen gebaut werden. Der bei der Deutschen Reichsbahn verwendete Druckgasschalter wurde von der Firma AEG entwickelt und im Jahre 1935 erstmalig in Lokomotiven der Baureihe E 18 eingebaut. Bild 110 zeigt einen Druckgasschalter im Schnitt. Er stützt sich auf das Dach der Lokomotive mit einer Grundplatte, die einen hohlen Stützisolator von ovalem Querschnitt trägt. Darauf sitzt der eigentliche Hochspannungsschalter, der aus einem beweglichen Schaltstift besteht und einem festen Kontakt, der von der Kappe durch einen Durchführungsisolator getrennt wird. In dessen Hohlraum befindet sich ein Tragrohr mit einer Düse aus keramischem Stoff, die den Schaltsift umgibt. In das Innere des Tragrohres kann durch ein Zuführungsrohr von

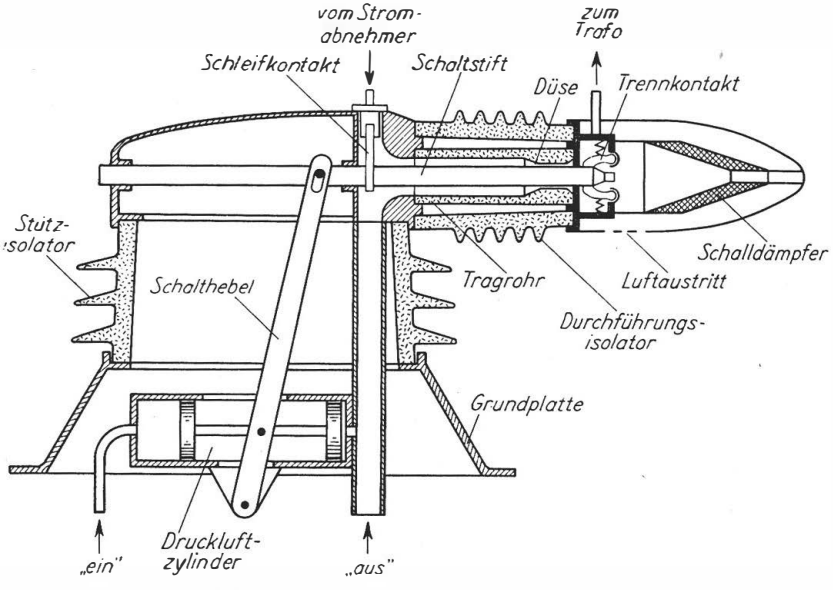


Bild 110. Druckgasschalter im Schnitt

großem Querschnitt Druckgas oder Druckluft geleitet werden, die dann durch den Schalldämpfer ins Freie entweicht.

Die Hochspannungsleitung ist an die obere Kappe angeschlossen, und durch einen Schleifkontakt wird der Strom dem beweglichen Schaltstift zugeführt. Der zweite Anschluß ist mit dem festen Trennkontakt verbunden und dient der Weiterführung des Stromes zum Trafo. Man benötigt also auch hier, genau wie beim Ölschalter, einen besonderen Durchführungsisolator.

Als Antrieb verwendet man bei einem solchen Druckgasschalter einen Druckluftzylinder, der in der Grundplatte untergebracht ist und durch einen Schalthebel aus Isolierstoff vom Hochspannungsteil getrennt wird. Die Unterbrechung des Stromkreises erfolgt dadurch, daß der bewegliche Schaltstift schnell aus dem Trennkontakt herausgerissen und durch die Düse zurückgezogen wird. Der dabei entstehende Lichtbogen wird durch Druckluft, die beim Ausschalten mit hoher Geschwindigkeit durch das Tragrohr in die Düse strömt, ausgeblasen. Der Druckluftstoß reinigt zugleich die Strecke zwischen dem feststehenden Kontakt und dem Schaltstift, so daß eine Neuzündung vermieden wird. Die schnelle Luftbewegung äußert sich als Knall, den man durch eine aufgesetzte Schalldämpferkappe abzumindern versucht. Beim Einschalten wird der Schaltstift in entgegengesetzter Richtung bewegt. Dabei ist es nicht erforderlich, den Trennkontakt anzublasen, da das Einschalten so schnell erfolgt, daß kein gefährlicher Lichtbogen entsteht. Bild 111 zeigt einen Druckgasschalter neuer Bauart und läßt deutlich erkennen, daß der Hochspannungsteil oberhalb des Daches liegt und daß lediglich der Antrieb und die Steuerung in das Innere des Maschinenraumes hineinreichen.

Druckgasschalter verschiedener Bauart, z. B. Form APB 102, 103 oder 104, sind auf den

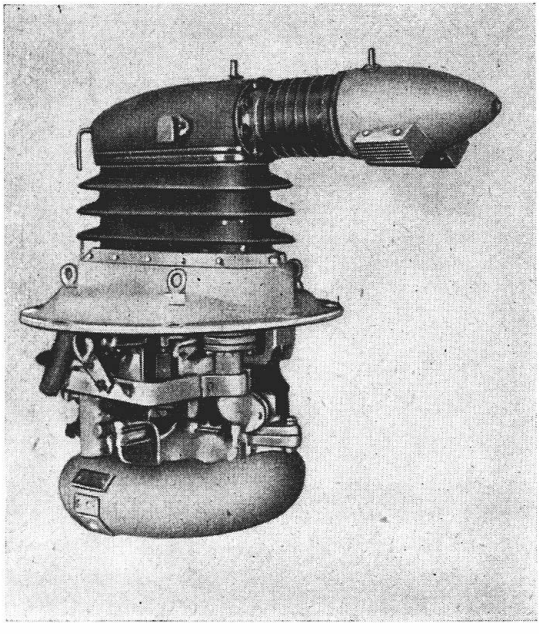


Bild 111
Druckgasschalter

von der Firma AEG gebauten elektrischen Lokomotiven der Baureihen E 18, E 19 und E 94 zu finden. Eine ausführliche Bedienungsvorschrift (DV 93092) sorgt dafür, daß ein einwandfreies Arbeiten jederzeit gewährleistet ist.

3.144 Druckluftschnellschalter

Der Druckluftschnellschalter wurde im Jahre 1944 von der Firma BBC, Baden (Schweiz) entworfen und später zum Einheitsschalter der Deutschen Bundesbahn weiterentwickelt. Er erinnert an den Druckgasschalter, zeichnet sich jedoch durch besondere Einfachheit in Aufbau, Antrieb und Steuerung aus. Seine Wirkungsweise ist aus Bild 112 zu erkennen. Die unter Hochspannung stehenden Teile, d. h. das Trennmesser und der Leistungsschalter, sind oberhalb der Grundplatte im Freien angeordnet, während die Teile, die den Schaltablauf steuern, in einem Behälter unterhalb des Daches untergebracht sind (Bild 113). Der Vorratsbehälter für die Druckluft ist unmittelbar an den Schalter angebaut. Der Teil, der in den Maschinenraum hineinragt, ist gegen Wärme isoliert, um einen Feuchtigkeitsniederschlag im Innern des Schalters zu vermeiden. Die Druckluft dient zum Öffnen der Löschkontakte, zum Löschen des Lichtbogens und auch zum Öffnen des Trennkontaktes. Der Betriebsdruck beträgt 8···11 at. Beim Ausschalten strömt die Druckluft aus dem Druckluft-

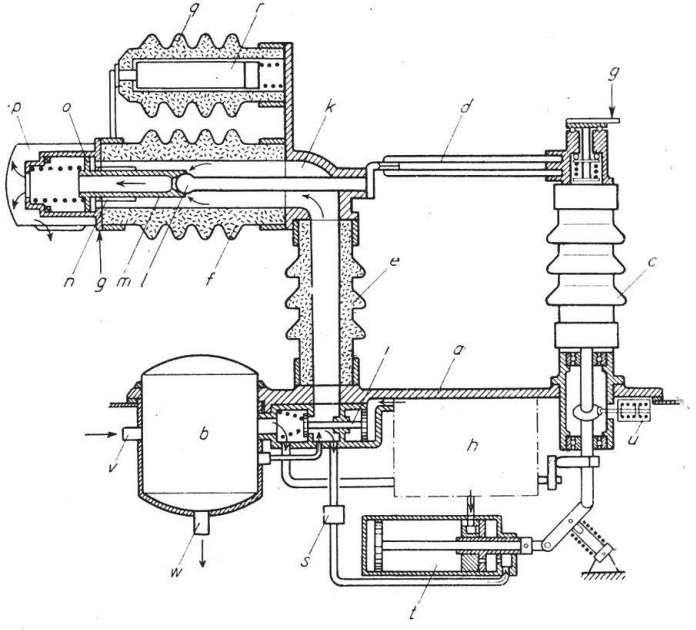


Bild 112. Druckluftschnellschalter im Schnitt (Schema)

a Grundplatte
b Druckluftbehälter
c Drehisolator
d Trennkontakt
e Stützisolator
f Löschkammer-Isolator
g Anschluß
h Steuerblock
i Hauptventil
k Löschkammer
l fester Löschkontakt
m beweglicher Löschkontakt
n Kontaktrohr
o Kolben
p Auspufftopf
q Isolator
r Widerstand
s Verzögerungsventil
t Trennkontakt-Antrieb
u Hilfsschalter
v Druckluftzuleitung
w Ablaß

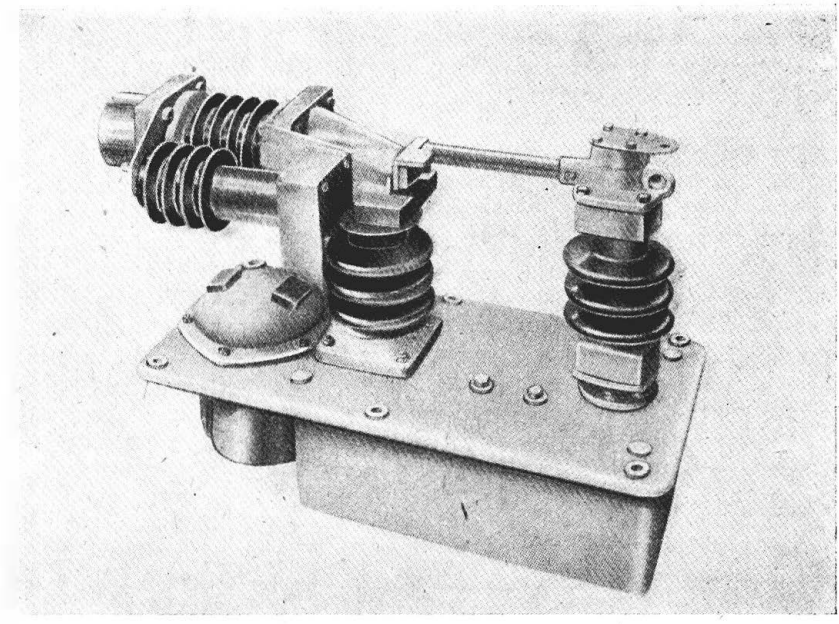


Bild 113. Druckluftschnellschalter

behälter durch das geöffnete Hauptventil und durch den Stützisolator in die Löschkammer. Dabei wird der mit dem beweglichen Löschkontakt verbundene Kolben gegen die Federkraft verschoben, und die Luft entweicht über einen Auspufftopf ins Freie. Der Lichtbogen wird beim Nulldurchgang des Wechselstromes durch den kräftigen Luftstrom gelöscht. Parallel zu dem Löschkontakt liegt ein Widerstand, der die Überspannung beim Ausschalten begrenzt.

Ein Teil der Druckluft strömt beim Ausschalten über ein Verzögerungsventil in den Antriebszylinder für das Trennmesser. Die Kolbenstange dreht die Welle mit dem Drehisolator und öffnet dadurch den Kontakt. Das Verzögerungsventil bewirkt, daß der Trennkontakt erst geöffnet wird, wenn der Lichtbogen bereits gelöscht und der Strom somit unterbrochen ist. Gleichzeitig wird der Druckluftstrom in der Löschkammer unterbrochen, und der bewegliche Kontakt wird durch die Federkraft wieder an den feststehenden Kontakt gedrückt. Beim Einschalten braucht also lediglich der Trennkontakt eingelegt zu werden.

Dieser neue Druckluftschnellschalter ist für einen Nennstrom von 400 A berechnet und hat eine Abschaltleistung von 200 MVA. Er hat eine Masse von nur 145 kg und wird bei allen Neubaulokomotiven der Deutschen Bundesbahn verwendet.

3.145 Schalterantrieb und -auslösung

Sämtliche Schalter sind mit einem besonderen Antrieb und einer Auslösevorrichtung versehen. Das Einschalten geschieht stets durch Druckluft. Während die beiden letztgenannten

Schalter auch durch Druckluft ausgeschaltet werden, erfolgt das Ausschalten der Öl- und Expansionsschalter durch Federn, die beim Einschalten gespannt werden. Der Antrieb besteht im allgemeinen aus einem Druckluftzylinder, einer Kupplungsvorrichtung und einer Einrichtung zur Handbetätigung. Das Ausschalten erfolgt durch einen Fernauslöser oder von Hand. Um die elektrische Ausrüstung der Lokomotive zu schützen, ist es auch möglich, daß die Schalter durch eine selbsttätige Auslösevorrichtung ausgeschaltet werden, und zwar durch den Überstromzeitauslöser, oder durch den Spannungsrückgangsauslöser. Zwischen Antrieb und Schaltwerk muß eine Freilaufkupplung eingebaut werden, da der schützende Überstromauslöser sonst nicht wirken kann, wenn ein Schalter bei Kurzschluß eingeschaltet wird. Diese Freilaufkupplung wird ausgerückt, wenn der Schalter durch einen der selbsttätigen Auslöser betätigt wird. Bei den Druckgasschaltern betätigen die Auslöser ein Luftventil, da diese Schalter auch durch Druckluft ausgeschaltet werden.

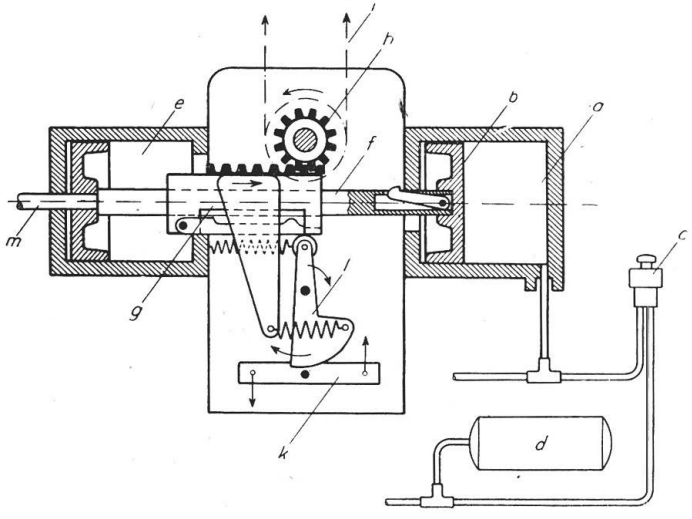


Bild 114. Ölschalterantrieb

a Antriebszylinder
b Kolben
c Führerbügelventil
d Luftbehälter
e Dämpfungszylinder
f Kolbenstange
g Zahnstange
h Ritzel
i Kette zur Schalterwelle
k Auslösehebel
l Zwischenhebel
m Handantrieb

Der Antrieb der verschiedenen Schalterbauarten ist recht unterschiedlich. Beim Ölschalter gibt es außer dem Antriebszylinder, der beim Einschalten über das Führerbügelventil mit Druckluft gefüllt wird, noch einen Dämpfungszylinder (Bild 114). Die beiden Kolben sitzen auf einer gemeinsamen Kolbenstange, die im mittleren Teil eine verschiebbare Zahnstange trägt. Durch ein Ritzel wird die hin- und hergehende Bewegung der Zahnstange in eine Drehbewegung umgesetzt und über Kettenräder und eine endlose Kette auf die Schalterwelle übertragen (siehe Bild 106). Die Kolbenstange ist jedoch nur dann mit der Zahnstange gekuppelt, wenn der Auslösehebel nicht durch eine der selbsttätigen Schutzeinrichtungen angehoben wird. Der Dämpfungskolben hat lediglich die Aufgabe, harte Stöße beim Einschalten zu vermeiden.

Der Expansionsschalter wird durch einen Antrieb eingeschaltet, der mittels eines unmittelbar angebauten Hebels von Hand oder von dem Führerstand aus über das Führerbügelventil mit Druckluft betätigt werden kann. Der Kolben geht nach dem Einschalten sofort wieder in seine Ausgangsstellung zurück. Während des Einschaltvorganges wird eine Rückzugfeder gespannt, die später den Schalter ausschaltet. Als Freilaufkupplung dient ein Kniegelenk, das in der Einschaltstellung durch einen Sperrhebel abgestützt wird, der durch den Auslösehebel verklinkt ist.

Der Ausschaltvorgang wird dadurch eingeleitet, daß die Verklinkung der Rückzugfeder gelöst wird. Dies kann mechanisch oder elektrisch geschehen, es kann jedoch auch durch das Führerbügelventil oder durch das Ansprechen einiger Schutzeinrichtungen eingeleitet werden.

Der Druckgasschalter wird im Gegensatz zu den vorgenannten Bauarten durch Druckluft ein- und ausgeschaltet. Damit er jederzeit betriebsbereit ist, muß eine bestimmte Menge Druckluft von 8 at zur Verfügung stehen. Es ist daher unter dem Schalter ein Luftbehälter angebracht, der von der Hauptluftleitung über ein Rückschlagventil gefüllt wird. Bei Inbetriebnahme der Lokomotive oder bei Störungen des Hauptkompressors wird die zum Schalten und Ausblasen des Lichtbogens erforderliche Druckluft durch einen kleinen Hilfskompressor erzeugt, dessen Antriebsmotor an eine Batterie angeschlossen ist. Beim Einschalten mit Hilfe des Führerbügelventils wird die Druckluft jedoch nicht unmittelbar dem Antriebszylinder zugeführt, sondern sie bewegt zunächst einen kleinen Einschaltkolben, der das Einschaltventil betätigt (pneumatische Steuerung). Dieses verbindet den Luftbehälter mit der linken Hälfte des Antriebszylinders, so daß der Kolben nach rechts bewegt und der Schalter eingelegt wird (siehe Bild 110). Beim Ausschalten mit dem Führerbügelventil wird der Stromkreis für den Ausschaltmagneten geschlossen, der das Ausschaltventil steuert (elektrische Steuerung).

Der Antrieb des Druckluftschnellschalters ist besonders einfach aufgebaut. Der Schalter wird durch zwei elektropneumatische Ventile gesteuert, wobei das eine als Einschaltventil mit Arbeitsstrom arbeitet, während das andere in Ruhestromschaltung den Schalter auslöst. Die Betätigungsspulen sind für 110 V Gleichstrom gewickelt. Der Schalter löst aus, wenn das Schaltwerk zwischen zwei Stufen stehenbleibt (Stufenüberwachung), oder wenn ein Nullspannungs- oder Überstromrelais anspricht. Ein Druckluftschnellschalter kann nur eingeschaltet werden, wenn ein Stromabnehmer am Fahrdraht anliegt und das Schaltwerk auf Null steht. Auch ist zum Betätigen des Schalters stets ein bestimmter Luftdruck erforderlich.

Außerdem ist bei sämtlichen Hauptschaltern eine Handbetätigung vorgesehen, die bei Inbetriebnahme der Lokomotive oder bei Störungen des Druckluftantriebes verwendet wird. Die Öl- und Expansionsschalter haben zu diesem Zweck einen Handhebel mit Klinke, der entgegen dem Zuge der Ausschaltfedern den Druckluftkolben und die Kupplungsteile in die Einschaltstellung bringt. Die Feder wird dabei angespannt und durch einen Auslösehebel verklinkt, der beim Ausschalten angehoben wird. Beim Druckgasschalter ist eine unmittelbare Bewegung des Schaltstiftes zum Zwecke des Ein- oder Ausschaltens nicht möglich. Der Handhebel bewegt dann lediglich den Schaltkolben, der über das Einschaltventil und den Antriebszylinder den Schalter einlegt.

Zur Handbetätigung dient eine Welle, die direkt unter dem Dach des Maschinenraumes gelagert ist. Sie endet in den beiden Führerständen in je einen Hebel, der durch roten

Farbanstrich besonders gekennzeichnet ist. Handgeschaltet wird im allgemeinen nur im Notfall, wenn eine Störung das elektrische Ausschalten unmöglich macht.

Zum Schutze der elektrischen Ausrüstung der Lokomotive dienen die selbsttätigen Auslösevorrichtungen. Der Überstromzeitauslöser erhält seinen Strom von einem Stromwandler, der in die Oberspannungsleitung eingefügt ist (Bild 115). Er wirkt bei Kurzschluß direkt auf eine Auslösespule des Schalters, bei Überlastung jedoch über ein Zeitrelais, das ein Abschalten bei kurzzeitigen bzw. geringfügigen Überstromstößen verhindert. Der Spannungsrückgangsauslöser spricht an, sobald die Spannung unter 6,5 kV absinkt oder ganz ausbleibt. Dieser Auslöser steht ebenfalls mit einem Zeitrelais in Verbindung, um zu vermeiden, daß der Schalter bei kurzzeitigen Unterbrechungen, z. B. Bügelspringen, anspricht.

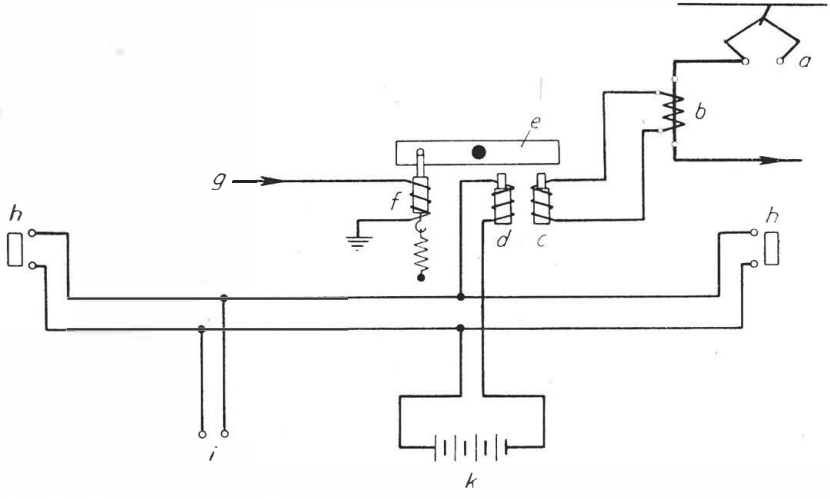


Bild 115. Schaltung der Auslösevorrichtungen

a Stromabnehmer
b Stromwandler
c Überstromzeitauslöser
d Fernauslöser
e Auslösehebel
f Spannungsrückgangsauslöser
g vom Umspanner
h Kontakt im Führerbügelventil
i sonstiger Auslösekontakt
k Sammler

Die einfachste Einrichtung zum Abschalten ist der Fernauslöser, ein Magnet, dessen Spule im allgemeinen durch Gleichstrom aus der Batterie gespeist wird. Dadurch wird erreicht, daß der Auslöser ständig betriebsbereit und von der Fahrdrahtspannung unabhängig ist. Auslösekontakte sind in die Führerbügelventile und in verschiedene Geräte eingebaut, die als Schutzeinrichtungen wirken. Sobald der Auslöser Strom erhält, wird der Hauptschalter ausgeschaltet.

3.2 Hauptumspanner

Umspanner, auch Transformatoren genannt, dienen zur Umwandlung von Wechselstrom einer bestimmten Spannung in Wechselstrom von höherer oder niedrigerer Spannung bei gleichbleibender Frequenz. Im Rahmen der elektrischen Ausrüstung einer Wechselstrom-

lokomotive fällt dem Umspanner eine entscheidende Bedeutung zu. Er beansprucht in dem Maschinenraum einen nicht unbeträchtlichen Platz und da auch seine Masse etwa 20 % von der der gesamten elektrischen Ausrüstung beträgt, ist er mit Rücksicht auf die Schwerpunktlage meist in der Mitte des Wagenkastens gelagert. Um einen leichten Ein- und Ausbau zu ermöglichen, kann der Teil des Daches über dem Umspanner abgehoben werden.

3.21 Aufgaben und Wirkungsweise

Der Lokomotivumspanner hat den Zweck, die Fahrdrahtspannung von 15 kV auf eine für die Fahrmotoren und Hilfseinrichtungen geeignete Spannung herabzusetzen, da diese sonst zu schwer ausfallen und umfangreiche Schutzeinrichtungen erfordern würden. Außerdem bietet der Umspanner die Möglichkeit, die Motorspannung in weiten Grenzen zu verändern und somit die Geschwindigkeit und die Zugkraft der Lokomotive praktisch verlustlos zu steuern. Den grundsätzlichen Aufbau eines Trafos zeigt Bild 116. Auf einem Eisenkern werden zwei Wicklungen angeordnet, die primäre, die mit der Stromquelle verbunden ist und den induzierenden Fluß erzeugt, und die sekundäre, die den Verbraucher speist. Beim Lokomotivumspanner ist das eine Ende der Oberspannungswicklung über den Stromabnehmer mit dem Fahrdraht verbunden, die Rückleitung erfolgt über die Fahrschienen.

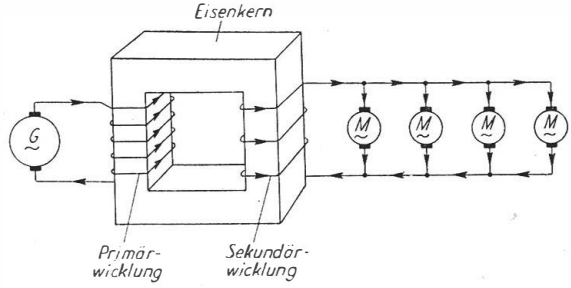


Bild 116
Wirkungsweise eines Umspanners (Schema)

Während die Energie für die Zugheizung der Oberspannungswicklung entnommen wird, gibt die Unterspannungswicklung die Leistung an die Fahrmotoren und verschiedenen elektrischen Hilfseinrichtungen ab. Da deren Spannung aus konstruktiven Gründen 500 V nicht überschreiten darf, beträgt bei einer Fahrdrahtspannung von 15000 V das Übersetzungsverhältnis etwa 1:30, d. h. die Primärwicklung hat 30mal sowiel Windungen wie die Sekundärwicklung. Bei der bisher allgemein üblichen Niederspannungssteuerung beruht die Änderung der Motorspannung darauf, daß man das Verhältnis der Windungszahlen ändert, indem man bei der Unterspannungswicklung einzelne Spulen zu- oder abschaltet. Zu diesem Zweck erhält die Wicklung etwa 15 Anzapfungen, an welche die Fahrmotoren jeweils angeschlossen werden (Stufenumspanner).
Die der Sekundärwicklung entnommene elektrische Leistung ist stets kleiner als diejenige, die der Primärwicklung zugeführt wurde. Die Ohmschen Verluste, die in den meist kupfernen Wicklungen des Umspanners auftreten und daher als „Kupferverluste" bezeichnet werden, betragen etwa 1···1,5 % der gesamten Umspannerleistung. Um die im Eisenkern entstehenden Wirbelstromverluste möglichst klein zu halten, ist es üblich, die Kerne aus

vielen dünnen Blechen von etwa 0,5 mm Dicke aufzubauen und diese durch Papier und Lackanstrich voneinander zu isolieren. Die Blechpakete werden dann durch isolierte Schrauben oder Niete zusammengehalten und durch Endbleche versteift.

Außerdem entsteht im Eisenkern dadurch Wärme, daß der Magnetfluß ständig seine Größe und Richtung verändert. Diesen Hysterese-Verlust und die obengenannten Wirbelstromverluste bezeichnet man als „Eisenverluste". Diese betragen jedoch insgesamt nicht mehr als 0,5···1 % der Umspannerleistung, so daß der Gesamtwirkungsgrad mit etwa 97···98 % der zugeführten Leistung angenommen werden kann. Dieses recht günstige Ergebnis ist darauf zurückzuführen, daß ein Umspanner keine umlaufenden Teile besitzt und somit auch keinerlei Reibungsverluste auftreten können.

Im rauhen angestrengten Bahnbetrieb und den dabei verwendeten hohen Spannungen sind Kurzschlüsse, auch solche im Transformator, unvermeidlich. Die dabei auftretenden Kurzschlußstromstärken sind durch die Ohmschen und induktiven Widerstände der Ober- und der Unterspannungswicklung bestimmt. Die Größe dieser Widerstände ist dadurch leicht meßbar, daß die Unterspannungsseite des Transformators kurzgeschlossen und seiner Oberspannungsseite lediglich jene geringe Spannung aufgedrückt wird, die in der kurzgeschlossenen Unterspannungswicklung gerade den Nennstrom hervorruft. Diese Spannung, die sogenannte Kurzschlußspannung, beträgt etwa 7···9 % der vollen Oberspannung. Je höher diese Spannung ist, desto kleiner sind zwar die bei einem Kurzschluß auftretenden Kurzschlußströme, desto mehr sinkt aber auch die Unterspannung mit der Belastung des Transformators ab.

3.22 Aufbau

Nach der Form des Eisenkernes unterscheidet man zwei verschiedene Bauarten, den Kern- und den Mantelumspanner (Bild 117). Während bei der Kernbauart die Wicklungen auf den beiden sich gegenüberliegenden Kernschenkeln untergebracht sind, werden bei der Mantelbauart alle Wicklungen auf dem Mittelstück vereinigt, und das Eisen wird auf beiden Seiten durch äußere Schenkel geschlossen. Damit man die Wicklungen aufbringen kann, muß der Kern geteilt sein. Er besteht daher aus zwei oder drei Schenkeln, die unten miteinander verbunden sind, und dem darüberliegenden Joch. Diese Teile müssen möglichst eng miteinander verbunden sein, damit sie dem Magnetfluß einen geringen Widerstand entgegensetzen.

Bei neueren elektrischen Lokomotiven mit Hochspannungssteuerung finden auch radial geblechte Umspanner Anwendung (Bilder 118 u. 128). Diese sind Mantelumspanner mit radial-

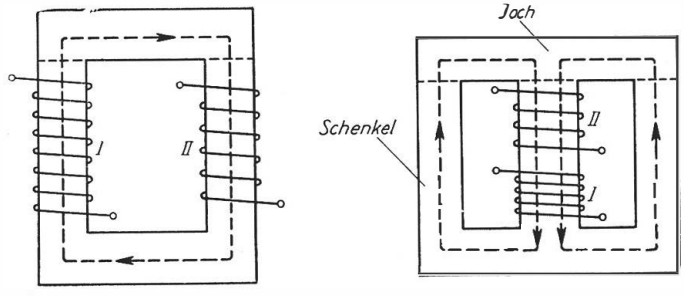


Bild 117
Kern- und Mantelumspanner (Schema)

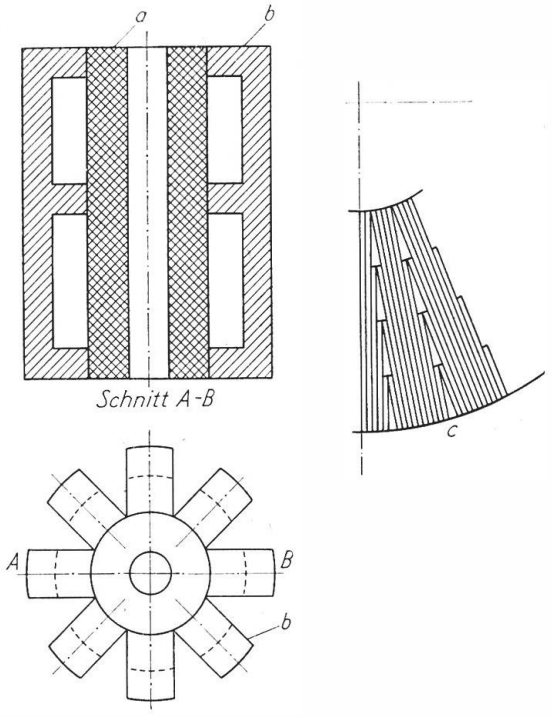


Bild 118
Umspanner mit radialgeblechter Kernsäule (Schema)
a radialgeblechte Mittelsäule
b angesetzter Schenkel
c Ausschnitt aus Mittelsäule (stark vergrößert),

geblechter Mittelsäule, an die sternförmig mehrere Joche stumpf angesetzt werden. Den Kreisquerschnitt der mittleren Kernsäule erreicht man dadurch, daß die jeweils zusammengehörenden Bleche verschiedener Breite durch Punktschweißung zusammengefügt werden. Diese Bauweise ermöglicht eine geringere Jochhöhe, einen kürzeren Magnetfluß, eine geringere Eisenmasse und ergibt durch den Kreisquerschnitt eine höhere Festigkeit für die Spulen und den Ölbehälter. Da das Öl durch den Hohlraum der Mittelsäule und durch die Spalten zwischen den Wicklungszylindern senkrecht aufsteigen kann, ergeben sich gute Kühlverhältnisse. Die Stellen des Kernes, auf welche die Wicklungen aufgebracht werden, erhalten eine kräftige Isolierung aus Hartpapier, damit keine Überschläge zwischen Kern und Wicklung entstehen. Würde man die Primär- und die Sekundärwicklung räumlich ganz trennen, so wäre eine starke Streuung die Folge. Um das zu vermeiden, unterteilt man die Wicklung in einzelne Spulen und ordnet durch Nebeneinander- oder Übereinanderlagerung abwechselnd eine Ober- und eine Unterspannungsspule an. Werden die Wicklungen nebeneinander untergebracht, so erhält man die Scheibenwicklung; ordnet man die Wicklungen in konzentrischen Röhren an, die übereinander gesteckt sind, so erhält man die Röhren- oder Zylinderwicklung (Bild 119). Dabei ist zu beachten, daß bei einer Scheibenwicklung die einzelnen Windungen einer Spule aufeinander, bei einer Röhrenwicklung jedoch nebeneinander liegen. Die Spulenscheiben werden durch Zwischenlagen von Preßspan oder Hartpapier getrennt, die Röhrenspulen werden auf Hartpapier-

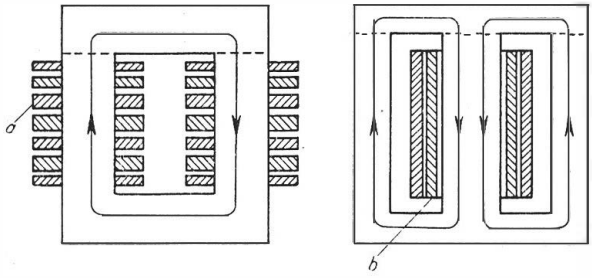


Bild 119
Umspanner mit Scheiben- oder Röhrenwicklung
a Scheibenspule
b Röhrenspule

zylinder gewickelt. Bei Röhrenspulen gibt es gewöhnlich nur eine innere Oberspannungs- und eine äußere Unterspannungsspule mit zahlreichen Anzapfungen. Scheibenspulen haben im allgemeinen Rechteckform mit abgerundeten bzw. abgeschnittenen Ecken. Die Wicklungen sind aus Kupfer, nur wenige elektrische Lokomotiven der Baureihen E 19, E 44 und E 94 wurden infolge kriegsbedingter Materialschwierigkeiten mit Alu-Wicklungen ausgerüstet. Man verwendet Rund- und Flachdraht, Litze oder gewalztes Flachkupfer. Die Windungen werden zu Spulen zusammengefaßt und müssen untereinander und auch gegenüber den anderen Wicklungen sorgfältig isoliert sein. Die Oberspannungsspulen, die in der Nähe der Einführung liegen, erhalten eine verstärkte Isolation, da sie bei Überspannungen am stärksten beansprucht werden. Auch die an Erde liegenden Teile der Oberspannungswicklung werden als Schutz gegen reflektierte Wanderwellen verstärkt isoliert. Die Teile der Unterspannungswicklung, die niedrige Spannungen, aber hohe Ströme führen, müssen einen verhältnismäßig starken Querschnitt haben. Die Spulen bestehen dann oft nur aus einer einzigen Windung, die aus einem entsprechend dicken Kupferblech geschnitten ist.

Lokomotivumspanner müssen große elektrische und magnetische Kräfte aufnehmen und unterliegen wegen der dauernden Stöße und Erschütterungen, die während der Fahrt auftreten, auch einer hohen mechanischen Beanspruchung. Aus diesem Grunde ist eine kräftige Versteifung des gesamten Umspanners durch Spannplatten, Bolzen, Winkeleisen usw. erforderlich. Es ist darauf zu achten, daß diese Verspannungen keine leitenden Bahnen um Magnetflüsse, insbesondere Streuflüsse, herum bilden, da sonst zusätzliche Verluste durch sich ausbildende Kurzschlußströme entstehen.

3.23 Schaltung der Wicklungen

Bild 120 zeigt die verschiedenen Schaltungen eines Umspanners bei Niederspannungssteuerung und läßt erkennen, daß das eine Ende der Oberspannungswicklung stets mit dem Fahrdraht verbunden ist. Das andere Ende und auch ein Punkt der Unterspannungswicklung sind bei der Normalschaltung geerdet (Bild 120a). Die Verbindung eines Punktes der Unterspannungswicklung mit der Erde bleibt jedoch stromlos, solange der Unterspannungskreis keine Isolationsfehler aufweist.

Sehr häufig verwendet man die Sparschaltung nach Bild 120b. Der Umspanner hat dann nur eine Wicklung, die der Strom bis zur gemeinsamen Erde durchfließt. Die Oberspannungswicklung wird an der Stelle, die der höchsten Spannungsstufe der Niederspannungswicklung entspricht, mit dieser verbunden. Der sonst erforderliche Rest der

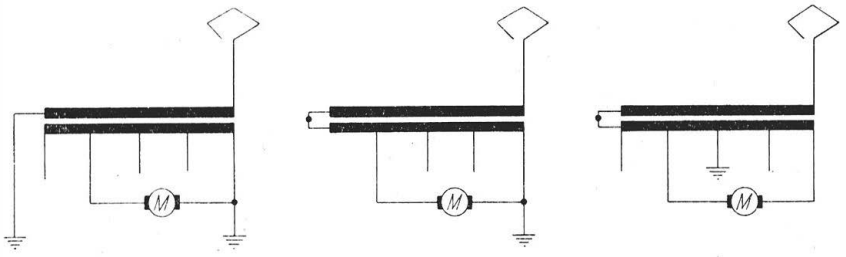


Bild 120. Schaltung eines Umspanners bei Niederspannungssteuerung

a Normalschaltung b Sparschaltung mit Erdung am Ende der Unterspannungswicklung c Sparschaltung mit Erdung in der Mitte der Unterspannungswicklung

Oberspannungsstufe bis zur Spannung Null kann entfallen, so daß bei dieser Schaltung ein etwas geringerer Kupferbedarf zu verzeichnen ist. In beiden Fällen ist die Spannung zwischen den stromführenden und den geerdeten Teilen des Motors gleich der Klemmenspannung des Motors.

Bild 120c dagegen zeigt einen Umspanner, bei dem nicht das Ende, sondern die Mitte der Unterspannungswicklung geerdet ist, so daß die Isolation des Motors gegen Erde schwächer gehalten werden kann. Bei allen drei Schaltungen erfolgt die Leistungsänderung durch eine Niederspannungssteuerung, d. h., die Fahrmotoren werden aus verschiedenen Anzapfungen der Niederspannungswicklung des Umspanners gespeist.

Die einzelnen Spulen müssen dabei so miteinander verbunden sein, daß die gegenseitige magnetische Verkettung zwischen Ober- und Unterspannungswicklung auch dann nicht wesentlich beeinträchtigt wird, wenn einzelne Teile der Niederspannungswicklung abgeschaltet werden. Es genügt daher nicht, wenn die Ober- und Niederspannungsspulen abwechselnd auf den Kern aufgebracht werden. Mit Rücksicht auf die Begrenzung der Stromkräfte und Streuspannungen muß man auch beachten, daß die den einzelnen Schaltstufen entsprechenden Spulen untereinander verschachtelt werden. Dadurch erreicht man eine fast gleichmäßige Verteilung über die Kernlänge auch dann, wenn nur wenig Spulen eingeschaltet sind. Bild 121 zeigt die Schaltung der Spulen beim Hauptumspanner der Baureihe E 44. An den einzelnen Anzapfungen betragen die Spannungen für die Fahrmotoren 75, 100, 143, 186, 229, 272, 315, 358, 401, 444, 487, 530, 573, 616 und 659 V. Außerdem sind noch zwei Anzapfungen für die Zugheizung (800 und 1000 V) und eine Anzapfung für den Steuerstrom und für die Hilfsmotoren (200 V) vorgesehen.

Für elektrische Lokomotiven bis zu einer Leistung von etwa 3000 kW ist die Niederspannungssteuerung am wirtschaftlichsten. Die Verluste sind besonders dann gering, wenn im Betrieb die oberen Fahrstufen wenig gebraucht werden.

Da jedoch bei modernen elektrischen Lokomotiven mit großer Leistung der Gesamtstrom der Fahrmotoren in Dauerbetrieb bis etwa 10000 A und beim Anfahren bis etwa 15000 A ansteigen kann, sind sehr starke Stromschienen und kräftige Schalteinrichtungen erforderlich, die die Masse der elektrischen Ausrüstung wesentlich erhöhen. Dies ist jedoch bei neuzeitlichen elektrischen Lokomotiven, die möglichst ohne Laufachsen auskommen sollen, unerwünscht, und es erwies sich als zweckmäßig, bei sehr hohen Leistungen anstelle der Niederspannungssteuerung eine Hochspannungssteuerung zu verwenden. Diese Schaltung

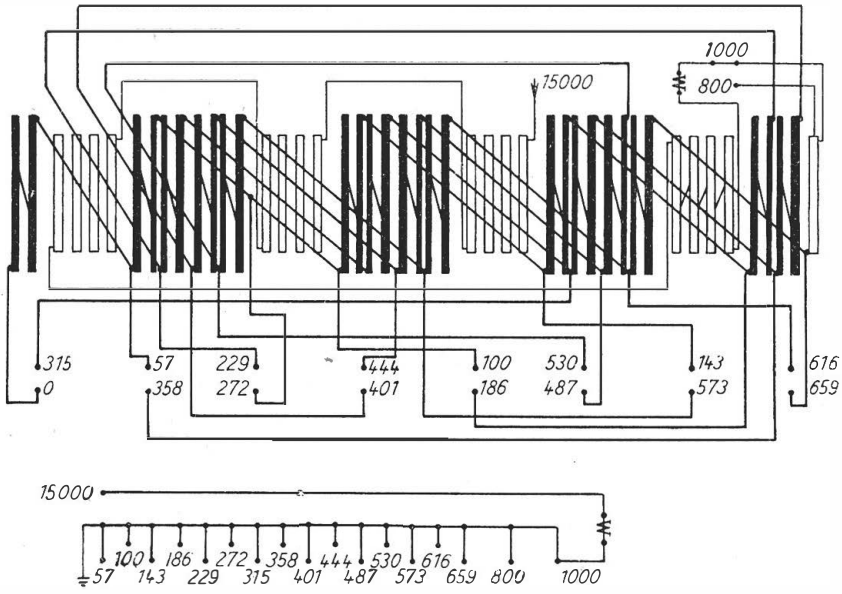


Bild 121. Anordnung der Spulen beim Hauptumspanner der Baureihe E 44

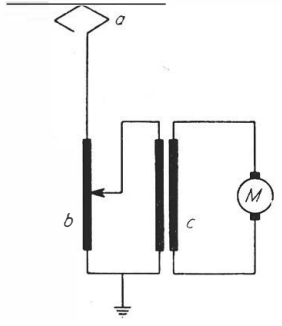


Bild 122. Schaltung eines Umspanners bei Hochspannungssteuerung

a Stromabnehmer
b Steuerumspanner
c Hauptumspanner

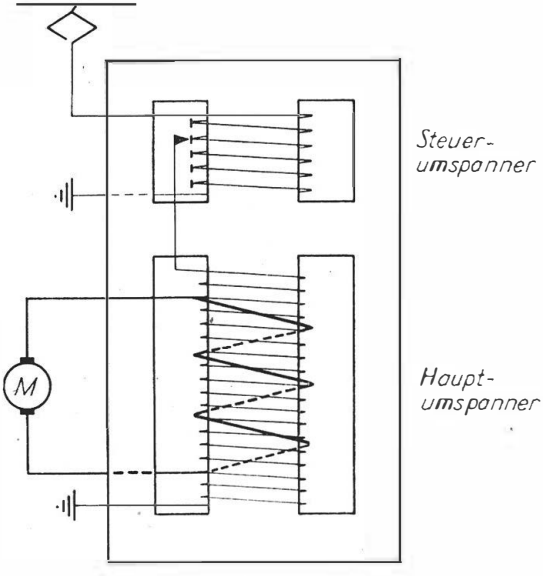


Bild 123. Radialgeblechter Trafo mit Hochspannungssteuerung

ist aus Bild 122 ersichtlich. Der Strom an der Hochspannungsseite des Umspanners beträgt entsprechend dem Verhältnis der größten Motorspannung zur Fahrdrahtspannung nur etwa $^1/_{30}$ des gesamten Fahrmotorstromes und erreicht daher im Dauerbetrieb nur etwa 300 A. Daher können auch die Schaltgeräte an der Hochspannungsseite trotz der hohen Spannung viel kleiner und leichter als bei der Niederspannungssteuerung ausgeführt werden.

Bei der Hochspannungssteuerung wird als Hauptumspanner ein gewöhnlicher Umspanner ohne Anzapfungen verwendet, an dessen Sekundärwicklung die Fahrmotoren ohne weitere Steuereinrichtungen angeschlossen sind. Da sich die Spannung der Sekundärwicklung eines Trafos im gleichen Verhältnis wie die der Primärwicklung zugeführten Spannung ändert, muß zur Steuerung der Fahrmotorspannung dem Haupttrafo noch ein besonderer Steuertrafo vorgeschaltet werden. Dieser besitzt nur eine Wicklung in Sparschaltung mit einer Reihe von Anzapfungen, an die der Anfang der Primärwicklung des Haupttrafos angeschlossen wird.

Beide Umspanner haben einen gemeinsamen Eisenkern. Handelt es sich um einen dreischenkligen Mantelumspanner, so trägt der eine Schenkel dann die Wicklung des Steuertrafos und der zweite beide Wicklungen des Haupttrafos, während der dritte nur dem magnetischen Rückfluß dient und die Differenz der Magnetflüsse der beiden Trafos führt. Findet jedoch ein Manteltrafo mit radialgeblechter Mittelsäule Verwendung, so sind im unteren Teil beide Wicklungen des Haupttrafos und über dem Mittelbalken die Wicklungen des Steuertrafos angeordnet (Bild 123).

Trotz der bei der Hochspannungssteuerung vorhandenen zwei Trafos sind die Masse und der Raumbedarf derselben einschließlich der Steuereinrichtungen wesentlich kleiner als bei den Niederspannungssteuerungen. Da noch weitere Vorteile hinzukommen, hat die Hochspannungssteuerung in letzter Zeit, besonders bei elektrischen Lokomotiven großer Leistung, vor allem im Ausland starke Verbreitung gefunden. Sie hat sich auch bei einigen elektrischen Lokomotiven der Deutschen Bundesbahn (E 10 002, 003 und 005) gut bewährt und wird daher auch bei den Neubauten der Deutschen Bundesbahn (Baureihe E 10^1, E 40 und E 50) angewendet. Für elektrische Lokomotiven geringerer Leistung ist jedoch die Niederspannungssteuerung am wirtschaftlichsten.

3.24 Kühlung

Obgleich der Gesamtwirkungsgrad eines Umspanners mit etwa 97···98 % als recht günstig angesehen werden kann, so gehen bei einem größeren Lokomotivumspanner von 1000 kVA Leistung doch etwa 25 kW in Form von Wärme verloren. Da 1 kW in der Stunde eine Wärmemenge von 860 kcal erzeugt, so entstehen hier stündlich 21500 kcal, die ausreichen, um 1000 l Wasser um 21,5 °C oder die gleiche Menge Öl um 43 °C zu erwärmen. Um während des Betriebes allzu hohe Temperaturen zu vermeiden, ist es daher erforderlich, diese Wärmemenge ständig abzuführen. Man erreicht dies z. B. dadurch, daß man den Eisenkern und die Wicklungen während des Betriebes mit Luft anbläst (Trockenumspanner). Diese Art der Kühlung war in den ersten Jahren des elektrischen Zugbetriebes allgemein üblich. Mit dem ständigen Ansteigen der Fahrdrahtspannungen traten jedoch nach einer gewissen Betriebsdauer häufig Störungen in Form von Durch- oder Überschlägen auf. Diese waren auf Verunreinigungen durch Kondenswasser oder Bremsstaub

zurückzuführen und konnten nur durch sorgfältige Pflege und ständige Reinigung der Einzelteile abgestellt werden.

Bei der Deutschen Reichsbahn sind Trockenumspanner nur noch bei den Baureihen E 17 und E 21 zu finden. Da sich jedoch infolge ungenügender Durchlüftung Wärmestauungen nie ganz vermeiden ließen und auch nur eine kurzfristige Überlastbarkeit des Trafos möglich war, ging man später allgemein zur Ölkühlung über.

In diesem Falle bringt man den ganzen Umspanner in einem Behälter unter, und der Eisenkern sowie sämtliche Wicklungen werden dann durch Öl gekühlt. Da der Ölumspanner eine größere Wärmekapazität besitzt, sind mit Rücksicht auf die starken Belastungsschwankungen des Lokomotivbetriebes bei ortsfesten Anlagen und auch bei elektrischen Lokomotiven überwiegend Ölumspanner in Gebrauch. Das Öl umspült die Wicklungen und den Eisenkern und schützt sie vor Feuchtigkeit und Verunreinigungen, und da es nicht nur als Kühlmittel, sondern auch als Isolierstoff dient, kann die Isolation der Wicklungen schwächer ausgeführt werden. Außerdem kann das Öl die bei Belastungsstößen erzeugte Wärme jederzeit ohne große Temperaturerhöhung aufnehmen.

Als Kühlöl wird Mineralöl verwendet, das durch Raffination oder Destillation aus Erdöl gewonnen wird. Das Öl muß frei von Säure und Wasser sein und darf auch nicht stocken, wenn die Lokomotive im Winter längere Zeit im Freien abgestellt wird. Die Durchschlagsfestigkeit soll nach Einfüllen 125 kV/cm und im Betrieb mindestens 80 kV/cm betragen. Der Flammpunkt darf nicht unter 185 °C liegen. Da sich nach längerem Betrieb Verunreinigungen des Öles zeigen, wird es alle 3 Monate im Bahnbetriebswerk auf Durchschlagsfestigkeit untersucht. Bei der Zwischenuntersuchung (Schadgruppe E 3) und der Hauptuntersuchung (Schadgruppe E 4) wird es grundsätzlich ausgewechselt. Da es sich jedoch um erhebliche Mengen handelt, die je nach Leistung zwischen 1000 und 2000 l schwanken, begnügt man sich meist damit, das Öl durch ein Regenerierverfahren aufzufrischen. Es wird dann durch Filter gereinigt oder bei starker Verschmutzung geschleudert und anschließend gebleicht. Ein zu hoher Wassergehalt wird durch Kochen bei 110 °C, am besten unter Vakuum, beseitigt. Als weiterer Nachteil der Ölkühlung seien noch die

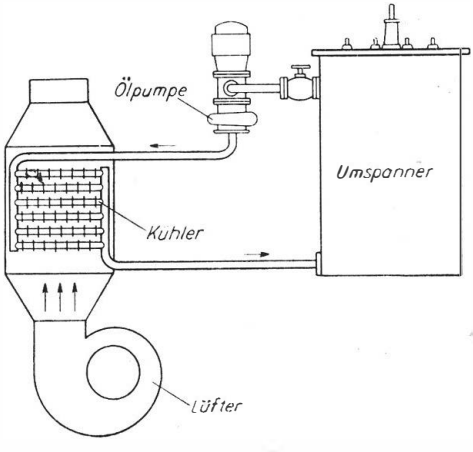


Bild 124
Ölkühlung für Lokomotivumspanner

große Brand- und Explosionsgefahr, eventuelle Undichtigkeiten an den Rohrleitungen und am Kessel und vor allem die hohe Masse des Öles erwähnt.
Um eine unzulässige Erwärmung des Öles im Betrieb zu vermeiden, ist für ständige Kühlung des Öles Sorge zu tragen. Da das selbsttätige, durch Temperaturunterschiede bedingte Umwälzen des Öles im Kessel bei höherer Leistung nicht genügt, sind größere Umspanner meist mit einer Ölpumpe ausgerüstet, die bis etwa 900 l/min fördert. Sie saugt das warme Öl im oberen Teil des Kessels ab, drückt es durch einen Kühler und führt es dann wieder dem unteren Teil des Kessels zu (Bild 124). In diesen Kreislauf sind meist noch Ölfilter eingeschaltet, die mitgerissene Fremdkörper und Unreinigkeiten auffangen.
Eine noch bessere Kühlung wird erreicht, wenn man die Kühlschlangen des Ölkühlers mit Frischluft anbläst, die durch besondere Lüfter angesaugt wird. Ein Lüftersatz besteht im allgemeinen aus zwei Schaufelrädern, die durch einen gemeinsamen Motor angetrieben werden (siehe Bild 182). Die Luft wird dann dem Maschinenraum entnommen, an den Kühlflächen vorbeigeführt und dann meist über das Dach ins Freie geleitet. Die benötigte Luftmenge ist recht erheblich und beträgt bis 5 m^3/s. Das Lokomotivpersonal hat jederzeit die Möglichkeit, den Ölstand und die Temperatur des Öles abzulesen.
Damit das Öl bei den Erschütterungen und Schwankungen der Lokomotive während der Fahrt nicht austritt und Schmutz und Feuchtigkeit von außen ferngehalten werden, wird der Trafokessel mit einem öldichten Deckel verschlossen. Aus diesem Grunde werden auch sämtliche Zu- und Ableitungen gut abgedichtet. Zwischen dem Ölspiegel und dem Deckel ist ein freier Luftraum, damit sich das Öl bei Erwärmung ungehindert ausdehnen kann. Um jedoch eine Luftberührung und somit rasches Altern des Öles zu vermeiden, werden neuere Lokomotiven meist mit einem Ölausdehnungsgefäß ausgerüstet.

3.25 Übliche Bauarten

Im Gegensatz zu den ortsfesten Umspannern, bei denen im allgemeinen keine besonderen Forderungen in bezug auf Masse und Größe gestellt werden, verlangt man von einem Lokomotivumspanner eine hohe Leistung bei niedriger Masse und geringem Platzbedarf. Die großen Erfolge, die auf diesem Gebiet in letzter Zeit erreicht wurden, gehen aus folgender Zusammenstellung hervor:

Lokomotiv-baureihe	Bauart des Transformators	Dauer-leistung kVA	Gesamt-masse kg	Masse je Leistungs-einheit kg/kVA	Indienst-stellung
E 44 (DR, DB)	Manteltransformator Scheibenwicklung Sparschaltung Niederspannungssteuerung	1450	7370	5,08	1932
E 94 (DR, DB)	Manteltransformator Scheibenwicklung Sparschaltung Niederspannungssteuerung	3060	9130	2,99	1939

Lokmotiv-baureihe	Bauart des Transformators	Dauer-leistung kVA	Gesamt-masse kg	Masse je Leistungs-einheit kg/kVA	Indienst-stellung
E 10[1]/E 40 (DB)	Manteltransformator Zylinderwicklung Hochspannungssteuerung	4040	11 500	2,85	1956/57
E 41[2]) (DB)	Halbmanteltransformator Zinderwicklung Sparschaltung Niederspannungssteuerung	2210	8100	3,65[2])	1956/57
E 50[1]) (DB)	Manteltransformator Zylinderwicklung Hochspannungssteuerung	4900	16100	3,30	1956/57
E 11 (DR)	Manteltransformator Sparschaltung Niederspannungssteuerung	2500	7520	3,01	1960

[1]) Einschließlich angebautem Schaltwerk.
[2]) Einschließlich Spannungsteiler-drosseln.

Bild 125 zeigt einen Mantelumspanner mit einer Leistung von 3 MVA im Bau. Um das Einlegen der Spulen zu erleichtern, wird der Kern, der im fertigen Trafo meist waagerecht liegt, während des Baues aufgestellt. Das obere Joch wird nach dem Einbau der Spulen stumpf auf die Schenkel aufgelegt und kräftig verschraubt.

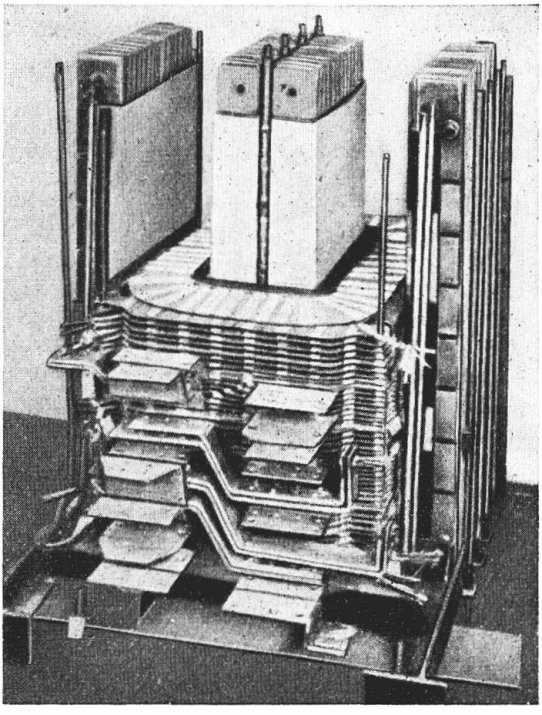


Bild 125
Mantelumspanner im Bau

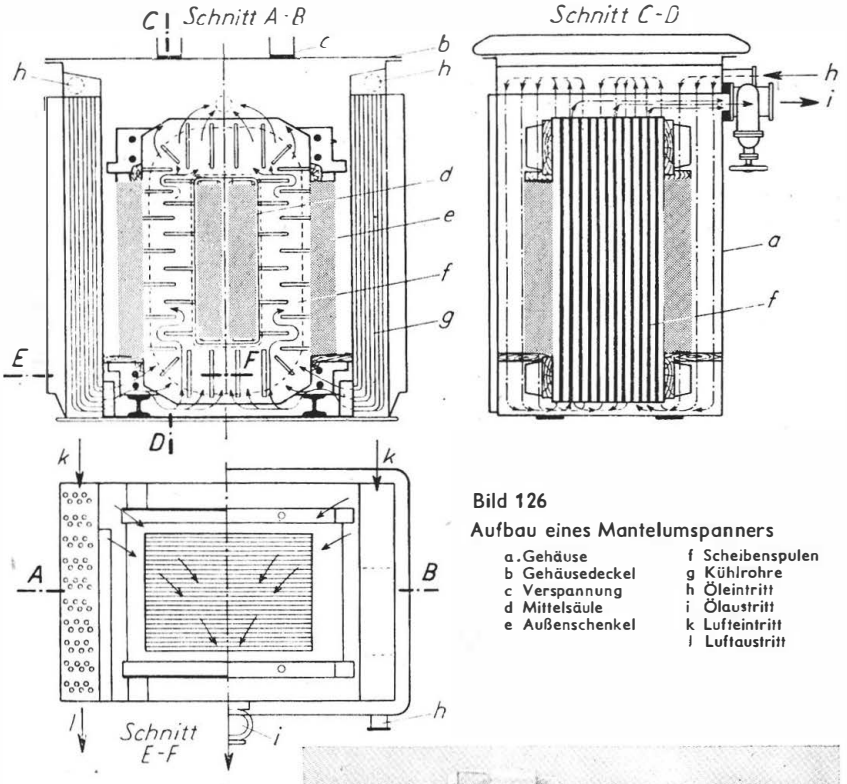


Bild 126

Aufbau eines Mantelumspanners

a. Gehäuse	f Scheibenspulen
b Gehäusedeckel	g Kühlrohre
c Verspannung	h Öleintritt
d Mittelsäule	i Ölaustritt
e Außenschenkel	k Lufteintritt
	l Luftaustritt

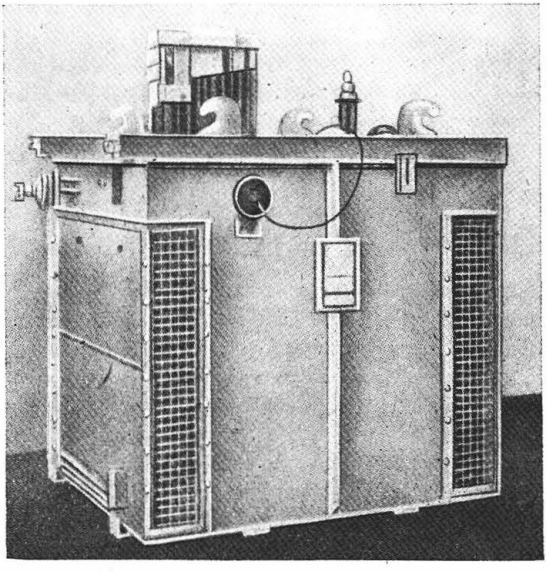


Bild 127

Mantelumspanner mit Ölkühlung

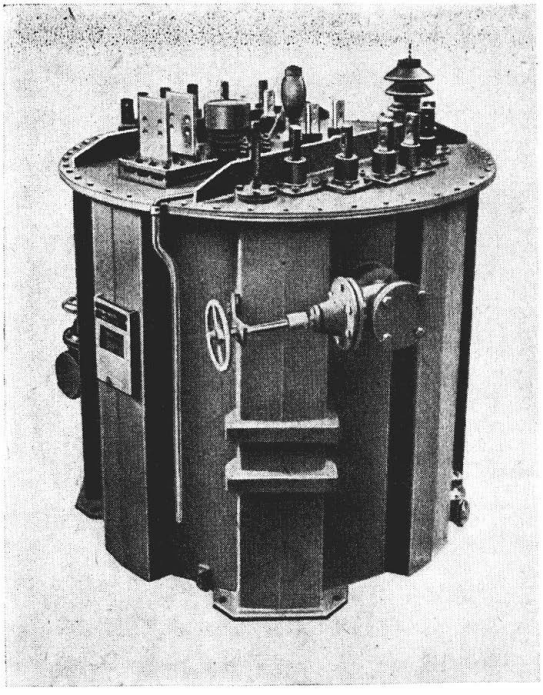


Bild 128
Radialgeblechter Umspanner

Den Aufbau eines kompletten Mantelumspanners, wie er für neuere Lokomotiven verwendet wird, zeigt Bild 126. Man erkennt daraus, daß zwischen den senkrecht stehenden Scheibenspulen besondere Isolierstege liegen, um den Umlauf des Kühlmittels zu ermöglichen. Die Kühltaschen für die Kühlrohre liegen an den beiden Stirnseiten des Gehäuses, an dem auch die Ölumwälzpumpe angebracht ist (Bild 127). Die Nennleistung dieses Umspanners beträgt etwa 3000 kVA, seine Masse einschließlich Öl und Kühleinrichtung etwa 9,5 t. Das Äußere eines radialgeblechten Umspanners ist aus Bild 128 zu erkennen.

3.3 Hilfsumspanner und Meßwandler

Außer dem obengenannten Hauptumspanner besitzen viele elektrische Lokomotiven noch einen Hilfs- oder Zusatzumspanner. Diese arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie die Hauptumspanner, sind jedoch für viel kleinere Leistungen bemessen. Ist der Hauptumspanner ein Trockenumspanner, so werden im allgemeinen auch die Hilfsumspanner mit Luft gekühlt und meist im Kühlluftstrom des Hauptumspanners angeordnet. Bei einem ölgekühlten Hauptumspanner ist es üblich, auch die Hilfsumspanner mit Öl zu kühlen und im Ölkessel des Hauptumspanners unterzubringen.
Bei dieser Anordnung kommt man zwar mit kurzen Verbindungsleitungen und ohne zusätzliche Kühleinrichtungen aus, doch muß man damit rechnen, daß sich eventuelle Störungen in den Hilfseinrichtungen auf den Hauptumspanner übertragen. Aus diesem Grunde

werden bei verschiedenen Baureihen der Deutschen Reichsbahn, z. B. E 04, E 17, E 18 und E 44, trotz des Vorhandenseins eines ölgekühlten Hauptumspanners luftgekühlte Hilfsumspanner verwendet.

Nach dem Prinzip eines Umspanners arbeiten auch die Meßwandler, die Spannung oder Strom auf die für die Meßinstrumente und Relais geeigneten Werte herabsetzen. Der im Hochspannungsteil liegende Oberspannungswandler ist an die Dachleitung angeschlossen (siehe Bilder 92 u. 93). Er speist einen Fahrdrahtspannungsmesser, der das Ablesen der Fahrdrahtspannung jederzeit gestattet, und zwar auch dann, wenn der Hauptschalter ausgeschaltet ist. Der Oberspannungswandler ist in das Dach der Lokomotive eingebaut und als Trockentransformator ausgeführt. Bei einer Fahrdrahtspannung von 15000 V herrscht an seiner Unterspannungswicklung eine Spannung von 150 V, mit der die Fahrdrahtspannungsmesser auf den beiden Führerständen gespeist werden. Auch das Nullspannungsrelais des Hauptschalters ist an diesen Oberspannungswandler angeschlossen. Eine wesentlich größere Bedeutung kommt den Stromwandlern zu, die an verschiedenen Stellen der Lokomotive zu finden sind. Ihre Wirkungsweise besteht im Prinzip darin, daß in einem mit kleinem Widerstand belasteten Trafo der Strom in umgekehrtem Verhältnis der Windungszahlen steht. Die Primärwicklung hat eine viel kleinere Windungszahl als die sekundäre und besteht bei großen Stromstärken meist überhaupt nur aus einer Windung. Der Wandler wird häufig in einer besonders einfachen Bauart als Durchführungswandler ausgebildet. Dabei dient als Primärwicklung unmittelbar die Leitung, deren Strom gemessen werden soll. Sie geht durch einen ring- oder rahmenförmigen Eisenkern, der die Sekundärwicklung trägt. Der Wechselstrom der Primärwicklung erzeugt in dem Eisenkern ein in sich geschlossenes Magnetfeld, das in der Sekundärwicklung den entsprechenden Strom induziert. Der Sekundärkreis ist in einem Punkt geerdet und führt daher nur sehr kleine Spannungen. Es ist darauf zu achten, daß ein Stromwandler im Betrieb niemals sekundärseitig unterbrochen werden darf, da die Spannung an den Klemmen sonst auf ein unzulässiges Maß ansteigen würde.

Stromwandler verwendet man zum Messen des Stromes im Hochspannungskreis, in den Motoren, im Heizstromkreis und für die Betätigung der Relais. Außerdem haben Stromwandler die Aufgabe, hohe Spannungen von den Meßgeräten und Relais fernzuhalten.

3.4 Steuerung

Die Einrichtungen, mit deren Hilfe man die Zugkraft und die Geschwindigkeit eines Triebfahrzeuges verändern kann, faßt man unter der Bezeichnung „Steuerung" zusammen. Neben dieser Leistungsänderung hat die Steuerung noch die Aufgabe, bei Leerlauf der Lokomotive die Selbsterregung der einzelnen Fahrmotoren zu verhindern, die Fahrtrichtung der Lokomotive zu verändern und gegebenenfalls die Widerstands- oder Nutzbremse einzuschalten.

3.41 Leistungssteuerungen

Während man bei Gleichstromlokomotiven die Leistung durch die aufeinanderfolgende Reihen-, Reihenparallel- und Parallelschaltung der Motoren in Verbindung mit Vorschaltwiderständen verändert, erreicht man bei Wechselstromlokomotiven die Leistungssteuerung am einfachsten dadurch, daß man den Fahrmotoren eine veränderliche Spannung zuführt, indem man sie mit den verschiedenen Anzapfungen des Trafos verbindet.

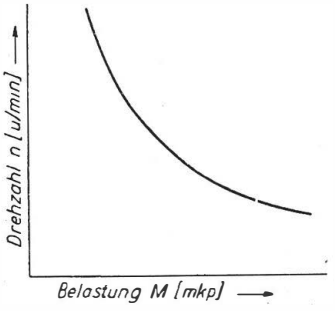


Bild 129. Drehzahlkennlinien eines Reihenschlußmotors in Abhängigkeit von der Belastung

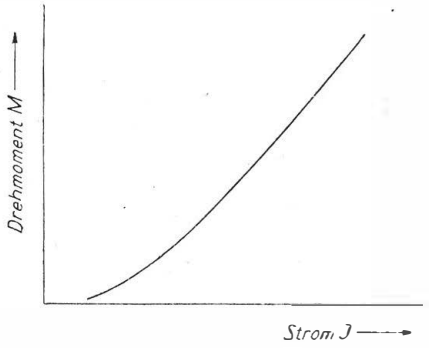


Bild 130. Zusammenhang zwischen Drehmoment M und Strom J eines Fahrmotors

Es wurde bereits erwähnt, daß als Bahnmotor der Reihenschlußmotor am besten geeignet ist. Er hat ein kräftiges Anzugsmoment, und seine Drehzahl nimmt mit steigender Belastung zunächst rascher, dann etwas weniger stark ab. Bild 129 zeigt die bekannte Funktion $n = f(M)$. Wegen des nahezu linearen Zusammenhanges zwischen Drehmoment M und dem Strom J eines Fahrmotors (Bild 130) zeigt auch die Funktion $n = f(J)$ ein ähnliches Aussehen. In Bild 131 sind für zwei verschiedene Spannungen die zugehörigen Drehzahl-Kennlinien eingezeichnet. Ist also eine bestimmte Fahrstufe eingestellt,

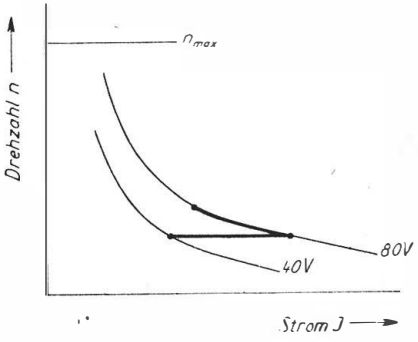


Bild 131. Drehzahlkennlinien eines Fahrmotors in Abhängigkeit vom Strom

dann nehmen die Motoren einen der augenblicklichen Drehzahl entsprechenden Strom auf, d. h. Zugkraft und Drehzahl halten sich gewissermaßen die Waage.

Will der Lokomotivführer die Geschwindigkeit erhöhen, so muß er die Motorspannung vergrößern, indem er auf die nächsthöhere Fahrstufe weiterschaltet. Die Drehzahl der Fahrmotoren kann sich aber nicht ruckartig ändern, sondern es wird sich zunächst auf der nächsthöheren Drehzahl-Kennlinie der größere M- bzw. J-Wert einstellen, der zu der im Augenblick des Aufschaltens vorhandenen Drehzahl gehört. Erst allmählich wird die Beschleunigung entsprechend der Drehzahl-Kennlinie zu dem neuen Beharrungswert führen. Dabei gehen Zugkraft und Strom wieder etwas zurück.

Beim Anfahren einer elektrischen Lokomotive, d. h. beim Aufschalten von einer Fahrstufe zur anderen, ergibt sich jedesmal ein stoßweises Ansteigen und anschließendes Absinken von Zugkraft und Stromaufnahme. Diese Schwankungen sind um so stärker, je gröber die Unterteilung der Spannungsstufen ist. Während sich die Stromschwankungen ungünstig auf die Stromversorgung auswirken, führen die Zugkraftschwankungen zu einer ruck-

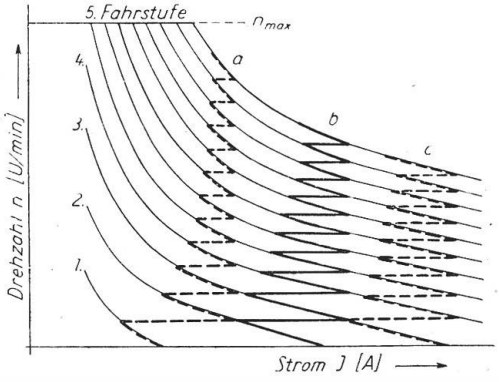


Bild 132
Zusammenhang zwischen Drehzahl n und Strom J eines Fahrmotors bei den einzelnen Fahrstufen und beim Aufschalten

a Aufschaltvorgang langsam
b Aufschaltvorgang normal
c Aufschaltvorgang schnell

artigen Beanspruchung des Zugapparates. Aus diesen Gründen ist eine möglichst feinstufige Steuerung anzustreben. Nur im untersten Geschwindigkeitsbereich kann eine gewisse Grobstufigkeit von Vorteil sein, um den Anfahrvorgang zu beschleunigen. Ein Stehen oder sehr langsames Fahren unter Strom kann nämlich zu Beschädigungen des Kommutators und der Bürsten führen.

Bild 132 zeigt den Aufschaltvorgang bei einer elektrischen Lokomotive mit 12 Fahrstufen. Abweichend von dem Normalfall (b) kann der Lokomotivführer auch schneller (c) oder langsamer (a) aufschalten und damit die Fahrmotoren mit höheren oder niedrigeren Stromstärken belasten. Um die Leistung einer elektrischen Lokomotive möglichst feinstufig steuern zu können, ist eine große Anzahl von Anzapfungen erforderlich. Je größer die Stufenzahl ist, um so mehr nähert sich die mittlere Anfahrzugkraft den Spitzenwerten, die durch die Reibung zwischen Rad und Schiene gegeben sind. Den Beweis hierfür liefert Bild 133, in dem die Fahrgeschwindigkeit als Funktion der Zugkraft aufgetragen ist. Man erkennt, daß bei geringerer Anzahl der Fahrstufen die mittlere Anfahrzugkraft ($Z_{mittel\,1}$) bedeutend weiter von der Reibungsgrenze (Z_{max}) entfernt ist als etwa bei der doppelten Stufenzahl ($Z_{mittel\,2}$). Während man sich bei den Niederspannungssteuerungen meist nur mit etwa 15 Fahrstufen begnügt, um durch eine weitere Vermehrung der Schaltgeräte und Ver-

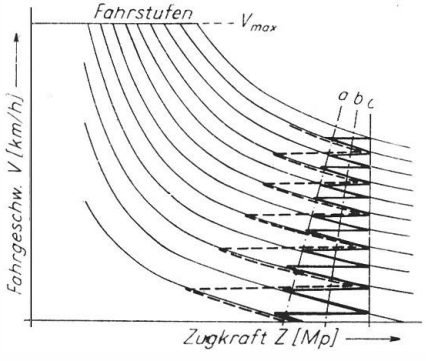


Bild 133
Vergrößerung der mittleren Anfahrzugkraft durch Erhöhung der Stufenzahl

a mittlere Anfahrzugkraft Z_1 (bei 6 Fahrstufen)
b mittlere Anfahrzugkraft Z_2 (bei 12 Fahrstufen)
c Reibungsgrenze Z_{max}

bindungsleitungen die Masse der elektrischen Ausrüstung nicht noch mehr zu erhöhen, findet man bei der Hochspannungssteuerung etwa die doppelte Anzahl von Fahrstufen, so daß hier bei etwa gleicher Masse eine wesentlich größere Ausnutzung des Haftwertes bzw. eine bessere Annäherung an die Reibungsgrenze erreicht wird.
Außerdem wird von einer Steuerung verlangt, daß sie einfach und übersichtlich aufgebaut ist, unbedingt betriebssicher arbeitet, möglichst leicht ist und wenig Platz beansprucht, geringen Verschleiß aufweist und ohne Wartung auskommt.

3.411 Schaltungsarten bei Niederspannungssteuerung

Das Überschalten von einer Stufe zur nächsten muß einerseits ohne Stromunterbrechung erfolgen, da diese eine Zugkraftunterbrechung zur Folge hätte, andererseits dürfen keine Wicklungsteile im Trafo kurz geschlossen werden, um eine übermäßige Erwärmung und Zerstörung dieser Wicklungen zu vermeiden. Das Überschalten erfolgt durch Schütze, Schlittenschaltwerke, Nockenschaltwerke und Wandernocken- oder Wanderwalzenschaltwerke.

3.4111 Einfache Schaltung

Bild 134 zeigt die schematische Darstellung einer einfachen Steuerung. Dabei ist der Motor über Schalter mit den verschiedenen Anzapfungen einer Niederspannungswicklung verbunden. Wegen der besseren Übersicht wurde bei den folgenden Schaltbildern dieses Abschnittes die Oberspannungswicklung weggelassen und anstelle mehrerer parallel geschalteter Fahrmotoren nur einer gezeichnet. Die angegebenen Spannungen dienen nur als Beispiel. Ein Überschalten von einer Stufe zur anderen ist in diesem Falle nur dadurch möglich, daß der Stromkreis kurzfristig unterbrochen wird. Dies würde eine Spannungs- und somit Zugkraftunterbrechung zur Folge haben und ist daher unerwünscht. Wollte man andererseits den Schalter 1 erst öffnen, nachdem der Schalter 2 bereits eingelegt ist, so würde der zwischen den beiden Schaltern liegende Teil der Trafowicklung vorübergehend kurzgeschlossen, was ebenfalls nicht statthaft ist. Ein Weiterschalten auf diese recht einfache Weise ist also nicht möglich.

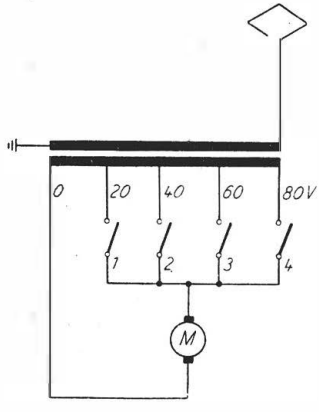


Bild 134
Einfache Schaltung

3.4112 *Schaltung mit einem Stromteiler*

Um sowohl eine Spannungsunterbrechung als auch einen Windungskurzschluß zu vermeiden, verwendet man einen Stromteiler (Schaltdrossel) nach Bild 135. Dieser ist wie ein Umspanner aufgebaut und besitzt einen Eisenkern, auf dem eine in der Mitte angezapfte Wicklung angeordnet ist (Bild 136). Legt man an A und B oder an A und O oder an B und O eine Stromquelle, so verhält sich der Stromteiler wie ein leerlaufender Umspanner. Werden also an die Anschlüsse A und B die beiden Stromschienen gelegt und zwei benachbarte Schalter geschlossen, so kann nur ein mäßiger Gegenstrom fließen, da ihm die Selbstinduktion entgegenarbeitet. Kurzschluß entsteht also nicht.

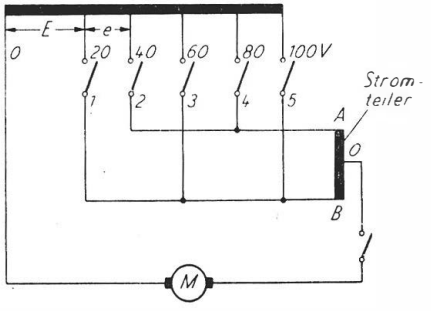


Bild 135. Schaltung mit einem Stromteiler

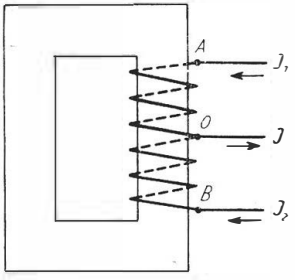


Bild 136. Stromteiler

Schließt man außerdem an O den Motor an, so fließt der Strom von beiden Stromschienen aus dort hin. Die beiden Wicklungshälften A–O und O–B sind völlig gleich. Der in A zugeführte Strom umfließt den Eisenkern auf dem Wege nach O, aber in entgegengesetzter Richtung wie der von B kommende. Die beiden Ströme erzeugen daher im Eisenkern einander entgegengesetzte Feldlinien. Ist der Strom in beiden Wicklungshälften gleich groß, so entsteht kein magnetischer Fluß.

Ist dagegen die Stromstärke in einer Wicklungshälfte größer als in der anderen, so bleibt ein Rest des magnetischen Flusses dieser Hälfte übrig, der eine Induktionsspannung dieser Spannung erzeugt. Sie arbeitet dem stärkeren Strom entgegen und unterstützt den schwächeren so lange, bis in beiden Wicklungshälften gleichgroße Ströme fließen.

Sind die Widerstände und die Ströme der beiden Wicklungshälften gleich, so muß auch der Spannungsabfall gleich groß sein. Die Spannung zwischen A und O ist also genau so groß wie die zwischen O und B, d. h. in O herrscht die mittlere Spannung zwischen den Spannungen A und B. Über die Schalter 1 und 2 fließt also jeweils der halbe Motorstrom und beide vereinigen sich hinter dem Stromteiler zum Gesamtstrom. Die Verluste sind unbedeutend, da nur die geringen Kupferverluste, wegen des fehlenden magnetischen Flusses aber keine Eisenverluste, entstehen können.

Ist jedoch nur eine Anzapfung mit dem Stromteiler verbunden, was z. B. beim Einschalten oder beim Weiterschalten der Fall ist, so fließt der Gesamtstrom durch die an Spannung liegende Wicklungshälfte. Die dabei hervorgerufene magnetische Wirkung wird nicht aufgehoben, da ja in der anderen Hälfte kein Strom entgegengesetzter Richtung fließt, und

es entstehen verhältnismäßig hohe Eisen- und Kupferverluste. Der Stromteiler darf also nur vorübergehend, z. B. beim Weiterschalten, einseitig angeschlossen werden.

Beim Anfahren ergibt sich folgender Schaltvorgang:
Zunächst wird Schalter 1 eingelegt, und es fließt Strom von der 20-Volt-Stufe über die B-Seite des Stromteilers zum Motor. Wird dann zusätzlich der Schalter 2 geschlossen, so wird der Strom je zur Hälfte der 20- und 40-Volt-Anzapfung entnommen, und der Motor erhält eine Spannung von $\frac{20 + 40}{2} = 30$ Volt (Dauerfahrstufe). Beim Weiterschalten wird zunächst der Schalter 1 geöffnet und es fließt kurzfristig Strom von der 40-Volt-Anzapfung über die A-Seite des Stromteilers zum Motor. Unmittelbar darauf wird jedoch der Schalter 3 eingelegt und der Motor erhält dann eine Spannung von $\frac{40 + 60}{2} = 50$ Volt. Der Motorstrom wird also nicht unterbrochen. Bezeichnet man die Spannung der ersten Stufe mit E und die durch die nächsten Stufen jeweils eintretende Spannungserhöhung mit e, so ergeben sich beim Aufschalten für die Dauerfahrstufen folgende Spannungen:

$$E + \frac{e}{2}, E + \frac{3e}{2}, E + \frac{5e}{2} \quad \text{usw.}$$

Die Spannungserhöhung beim Weiterschalten von einer Fahrstufe zur nächsten ist also gleich dem Stufensprung. Sie beträgt bei der üblichen höchsten Motorspannung von etwa 500 Volt und 15 Fahrstufen ungefähr 30···40 Volt.
Für einen angestrengten Betrieb ist eine solche Steuerung nicht recht geeignet, weil die Stufen zu groß sind und es bei schweren Anfahrten vorkommen kann, daß eine Stufe zum Anziehen noch nicht ausreicht, während bei der nächsthöheren die Treibräder schleudern. Während der Fahrt darf erst weitergeschaltet werden, wenn der Strom durch die steigende Geschwindigkeit auf die zulässige Stärke gesunken ist. Sind die Stufen zu groß, so dauert die Wartezeit zu lange, und die Leistung der Lokomotive kann beim Anfahren nicht genügend ausgenutzt werden.
Da jedoch aus betrieblichen Gründen auf die hohe Beschleunigung einer elektrischen Lokomotive besonderer Wert gelegt wird, ist eine feinstufige Spannungssteuerung erforderlich. Die Zahl der Anzapfungen am Trafo kann man aber nicht beliebig erhöhen, da die einzelnen Anschlüsse auf der Niederspannungsseite des Trafos wegen der großen Ströme und der daher erforderlichen Querschnitte viel Platz beanspruchen.
Um die Zahl der Fahrstufen, insbesondere die der Dauerfahrstufen zu erhöhen, wurde die

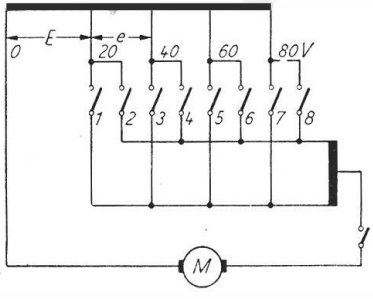


Bild 137
Schaltung miteinem Stromteiler und doppelter Schalterzahl

Steuerung mit einem Stromteiler und doppelter Schalterzahl entwickelt. Sie ist in Bild 137 dargestellt. In diesem Falle sind an jede Anzapfung zwei Schalter angeschlossen, die wiederum abwechselnd zu zwei Sammelschienen und damit zu den Wicklungen eines Stromteilers führen. Dadurch kann die Zahl der Dauerfahrstufen nahezu verdoppelt und eine viel feinere Spannungssteuerung erreicht werden. Der Schalttakt ist bei dieser Schaltung: (1,2); (2,3); (3,4) usw., so daß sich für die Dauerfahrstufen folgende Spannungen ergeben: $E, E + \frac{e}{2}; E + e, E + \frac{3e}{2}$ usw.

3.4113 Schaltung mit mehreren Stromteilern

Noch günstigere Verhältnisse ergeben sich, wenn man gleichzeitig zwei Stromteiler verwendet (Oefverholm-Schaltung). Bei der in Bild 138 gezeigten Anordnung sind an jede Trafoanzapfung drei Schalter angeschlossen, die zu drei Sammelschienen führen. In jeder Dauerfahrstufe sind drei benachbarte Schalter geschlossen, jeder führt ein Drittel des Motorstromes.

Während der erste Stromteiler wieder genau in der Mitte angezapft ist, wird die Wicklung des zweiten Stromteilers im Verhältnis 2:1 unterteilt. Man erreicht dadurch, daß beim Aufschalten die Spannung jeweils nur um $\frac{e}{3}$ ansteigt. Dem Schalttakt (1, 2, 3), (2, 3, 4), (3, 4, 5) usw. entsprechen die Motorspannungen $E, E + \frac{e}{3}; E + \frac{2e}{3}; E + e$ usw.

Bei elektrischen Lokomotiven mit großer Leistung ergeben sich trotz der dreifachen Unterteilung des Motorstromes noch so große Ströme für die einzelnen Schalter, daß diese zu schwer ausfallen. Eine weitere Unterteilung des Motorstromes erreicht man durch Verwendung von drei Stromteilern (Bild 139). Jede Trafoanzapfung ist mit zwei Schaltern verbunden. Eine Dauerfahrstufe liegt dann vor, wenn jeweils vier benachbarte Schalter geschlossen sind, von denen jeder ein Viertel des gesamten Motorstromes aufnimmt. Beim Übergang auf die nächsthöhere Fahrstufe schaltet man zunächst in der oberen, dann in

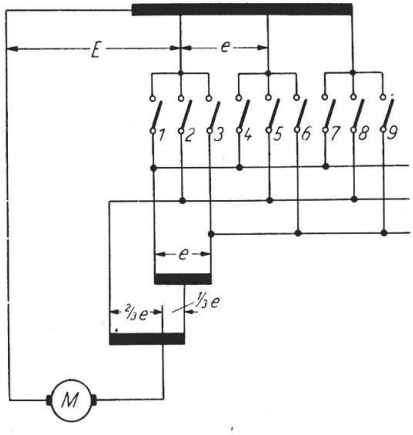


Bild 138. Schaltung mit zwei Stromteilern

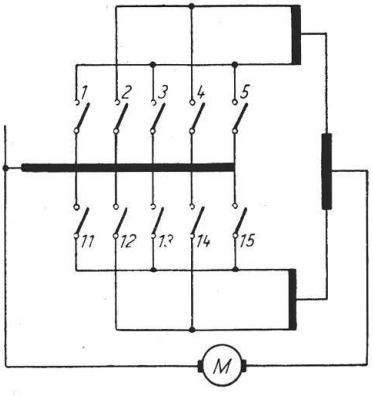


Bild 139. Schaltung mit drei Stromteilern

der unteren Reihe, also nicht gleichmäßig, sondern „versetzt". Dem Schalttakt (1, 2, 11, 12), (2, 3, 11, 12), (2, 3, 12, 13) usw. entsprechen die Motorspannungen $E + \frac{e}{2}$; $E + e$; $E + \frac{3e}{2}$ usw. Es sind die gleichen wie bei der Schaltung mit nur einem Stromteiler, doch kommt man mit bedeutend kleineren Schaltern aus.

In den ersten Fahrstufen sind nur ein bis drei Schalter geschlossen, die dann entsprechend höhere Ströme führen. Da auch die Stromteiler dann zum Teil nur einseitig angeschlossen sind und dadurch hohe Verluste entstehen, dürfen die ersten Fahrstufen nur vorübergehend verwendet werden.

3.4114 Ausgleichschaltungen

Wird eine elektrische Lokomotive durch zwei gleichstarke Motoren oder zwei gleiche Motorgruppen angetrieben, kann man durch verschiedene Ausgleichschaltungen eine feinstufige Steuerung erreichen, ohne die Zahl der Trafoanzapfungen zu erhöhen.

Bei der Schaltung nach Bild 140 erfolgt die Änderung der Motorspannung für jede der beiden Motorgruppen nach der bereits beschriebenen Schaltung mit je einem Stromteiler. Während dort aber die ausgleichende Wirkung beim Weiterschalten durch den dritten Stromteiler bewirkt wird, übernehmen diese Aufgabe hier die beiden Motorgruppen, die mit versetztem Schalttakt weitergeschaltet werden. In jeder zweiten Fahrstufe sind die Motorspannungen der beiden Gruppen einander gleich, so daß beide Gruppen auch gleiche Ströme aufnehmen und gleich große Zugkräfte entwickeln. In der dazwischen liegenden Fahrstufe erhält jedoch die eine Gruppe entsprechend dem versetzten Schalttakt eine um die Stufenspannung e höhere Motorspannung, nimmt daher auch einen größeren Strom auf als die andere und entwickelt eine größere Zugkraft. Die Zwischenstufen dürfen daher nicht als Dauerfahrstufen benutzt werden.

Dieser Mangel kann durch Verwendung eines Ausgleichumspanners vermieden werden

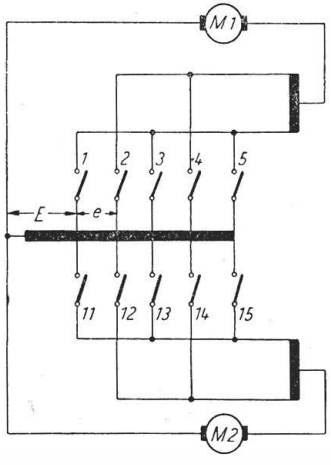


Bild 140
Schaltung mit versetztem Schalttakt

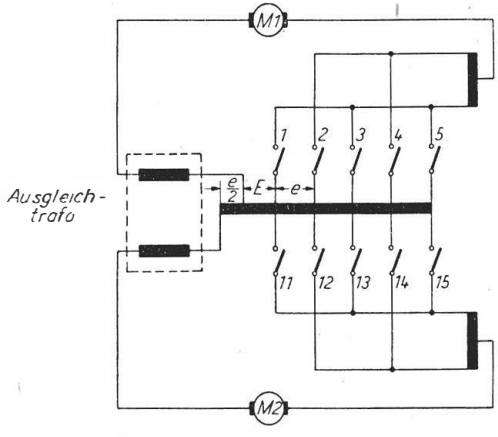


Bild 141
Schaltung mit Ausgleichumspanner

(Bild 141). Dieser ist wie ein gewöhnlicher Trafo aufgebaut, auf seinem Eisenkern sind zwei gleiche Wicklungen angebracht, von denen jede von dem Motorstrom einer Gruppe durchflossen wird. Die Wicklungen sind so angeordnet, daß sich die magnetisierende Wirkung der beiden Ströme auf den Eisenkern gegenseitig aufhebt. Sind die beiden Motorströme gleich, was bei jeder zweiten Fahrstufe zutrifft, dann ist der Ausgleichtrafo wirkungslos. Führt aber eine der beiden Wicklungen einen größeren Strom als die andere, dann entsteht im Ausgleichtrafo ein Magnetfluß, der in der Wicklung mit dem größeren Strom eine Gegenspannung, in der anderen aber eine Zusatzspannung, erzeugt. Auf diese Weise werden die unterschiedlichen Motorspannungen nahezu ausgeglichen. Die Zuleitungen der beiden Motorgruppen sind wie bei der Steuerung mit versetztem Schalttakt über die Stromteiler und Stufenschalter an den Trafo angeschlossen. Die Rückleitungen sind jedoch um die halbe Stufenspannung versetzt. Der Ausgleichtrafo braucht daher nur die Spannung ½ e wechselweise auszugleichen und kann entsprechend kleiner bemessen werden. Der Schalttakt ist der gleiche wie bei der vorherigen Schaltung, jedoch werden in diesem Falle die Zwischenstufen zu vollwertigen Dauerfahrstufen.

3.4115 Schaltung mit Zusatzumspanner

Eine besonders feinstufige Steuerung erreicht man auch durch Verwendung eines Zusatzumspanners (Bild 142). Hierbei wird wie bisher ein Stromteiler verwendet und in seine Verbindungsleitung zum Motor die Sekundärwicklung eines Zusatzumspanners eingeschaltet. Dieser wirkt lediglich als Drosselspule, solange seine Primärwicklung noch nicht an eine passende Spannung des Hauptumspanners angeschlossen wird. Ist das jedoch der Fall, dann wird in der Sekundärwicklung eine zusätzliche Spannung erzeugt (daher Zusatzumspanner), die sowohl positiv als auch negativ sein kann. Das Übersetzungsverhältnis des Zusatzumspanners wird meist so gewählt, daß die Zusatzspannung ein Viertel der Stufenspannung e des Hauptumspanners beträgt. Sie ist je nach Schließen der Schalter A oder B der Hauptspannungsrichtung gleich- oder entgegengesetzt gerichtet. Sind nur die Schalter 1 und 2 geschlossen, so beträgt die am Motor anliegende Spannung $E + \frac{e}{2}$. Wird der Schalter A geschlossen, so wird in der Sekundärwicklung des Zusatzumspanners eine Spannung $\frac{-e}{4}$ induziert, die der Hauptspannung entgegengerichtet ist. Die Motorspannung beträgt dann $E + \frac{e}{2} - \frac{e}{4} = E + \frac{e}{4}$. Beim Öffnen von Schalter A

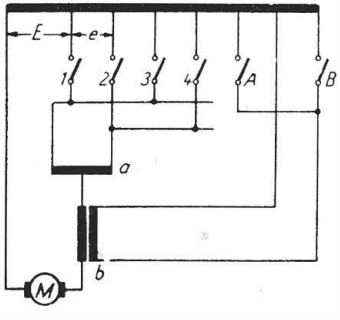


Bild 142
Schaltung mit Zusatzumspanner
a Stromteiler
b Zusatzumspanner

und Schließen von Schalter B ergibt sich: $E + \frac{e}{2} + \frac{e}{4} = E + \frac{3e}{4}$. Es wird also folgender Schalttakt angewendet: (1, 2, A); (1, 2, B); (2, 3, A); (2, 3, B) usw.

3.4116 Schaltung mit Zusatzumspanner und Feinregler

Eine noch weitere Abstufung der Motorspannung läßt sich erreichen, wenn die in der Sekundärwicklung des Zusatzumspanners erzeugte Zusatzspannung durch Abstufung der Spannung verändert wird, die man der Primärseite zuführt. In diesem Fall sind dann aber auch mehrere Schalter an den einzelnen Anzapfungen des Hauptumspanners erforderlich, was zu gewissen Schwierigkeiten führen könnte.

Eine noch wesentlich feinere, praktisch stufenlose Änderung der Motorspannung erreicht man durch die sogenannte Feinreglersteuerung (Bild 143). Diese besteht aus einem Zusatzumspanner, einem Feinregler und einem Spannungsteiler, der von dem Hauptumspanner gespeist wird. Der Zusatzumspanner besitzt einen Eisenkern wie ein normaler Umspanner und eine vom Spannungsteiler über den Feinregler gespeiste Primärwicklung. Seine Sekundärwicklung ist wie ein Stromteiler geschaltet, ihre Enden sind über zwei Sammelschienen wahlweise mit den verschiedenen Anzapfungen des Hauptumspanners verbunden.

Der Feinregler besteht aus einem Spannungsteiler, über den ein feststehender Kommutator gebaut ist (Bild 144). Ein drehbares Bürstenjoch trägt zwei diametral gegenüberliegende Kohlebürsten, die auf dem Kommutator schleifen. Es wird durch die Schaltwerkswelle über Kegelräder angetrieben (siehe Bild 158). Die Bürsten sind über zwei Schleifringe an die Enden der Primärwicklung des Zusatztrafos angeschlossen. Der Kommutator hat zwei sehr breite Segmente, die einander gegenüberliegen und dazwischen zwei Gruppen mit je 24···36 schmalen Lamellen, die alle untereinander und gegen den Tragkörper isoliert sind. Wegen der besseren Übersicht wurden auf Bild 143 nur acht Lamellen mit fünf Spannungsteiler-Anzapfungen gezeichnet. Je zwei spiegelbildlich gegenüberliegende Lamellen, die von den breiten Segmenten gleich weit entfernt liegen, sind miteinander durch Kupferbänder verbunden. Der Spannungsteiler ist wie eine Drossel aufgebaut. Das eine Ende dieser Wicklung ist über den Schalter b an eine eigene Anzapfung des Haupttrafos angeschlossen z. B. 200 V), das andere Ende ist geerdet. Die Wicklung hat in gleichen Abständen halb

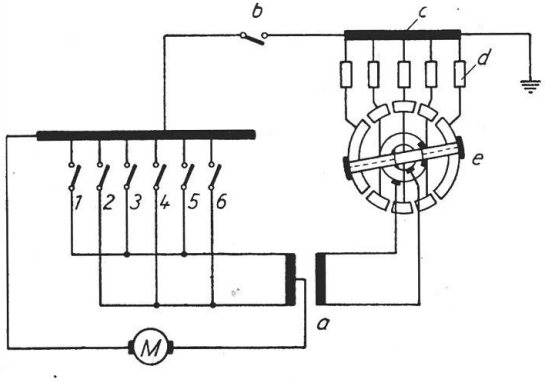


Bild 143
Schaltung mit Zusatzumspanner und Feinregler

a Zusatzumspanner
b Schalter
c Spannungsteiler
d Widerstandsband
e Feinregler

so viele Anzapfungen, wie der Feinregler schmale Lamellen besitzt. Während die breiten Segmente mit den Enden der Spannungsteilerwicklung verbunden sind, werden die schmalen Lamellen an die einzelnen Anzapfungen der Wicklung angeschlossen. Auf diese Weisewird jedem Lamellenpaar eine Spannung zugeführt, die auf jeder Seite des Kommutators von Lamelle zu Lamelle feinstufig von 0···200V ansteigt. Da die Bürsten jeweils zwei bis drei schmale Lamellen bedecken und damit die dazwischenliegenden Windungen des Spannungsteilers kurzschließen, sind zur Unterdrückung der Kurzschlußströme zwischen die Anzapfungen am Spannungsteiler und die Lamellen Widerstandsbänder eingeschaltet, so daß die Bürsten funkenfrei schalten.

Durch Drehen der Bürsten um den Kommutator wird über dieschmalen Segmente eine in der Größe veränderliche Spannung an die Primärwicklung des Zusatzumspanners abgegeben. Das Übersetzungsverhältnis des Zusatzumspanners wird so gewählt, daß bei einer Spannung von 200 V an der Primärwicklung in der Stromteilerwicklung eine Spannung induziert wird, die genau der Stufenspannung e entspricht. Auf diese Weise ist die Voraussetzung für ein spannungsloses Einschalten der nächsthöheren oder nächstniederen Schaltstufe gegeben. Die Stufenschalter dürfen jedoch nur betätigt werden, solange die Bürsten auf den breiten Segmenten gleiten.

Zum besseren Verständnis soll die Wirkungsweise des Feinreglers während des Aufschaltvorganges am Beispiel der Baureihe E 44 erläutert werden. Entsprechend den Anzapfungen am Hauptumspanner betragen die Motorspannungen in den ersten drei Fahrstufen 57,

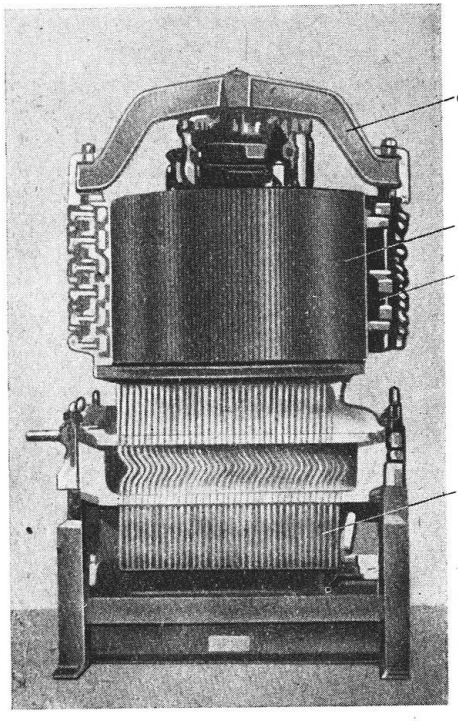


Bild 144
Feinregler
a Spannungsteiler
b Kollektor
c Bürstenjoch
d Kohlebürsten

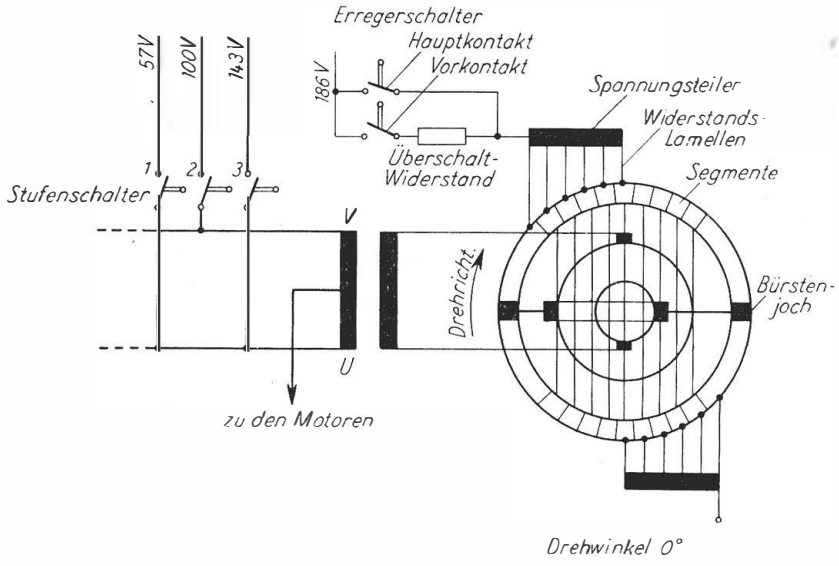


Bild 145. Schaltung mit Zusatzumspanner und Feinregler (Baureihe E 44)

100 und 143 V (siehe Bild 121). Der Spannungsteiler ist an eine Spannung von 186 V angeschlossen (Bild145). Der besseren Übersicht wegen wurde auch auf diesem Bild die Zahl der Anzapfungen und Lamellen wieder stark eingeschränkt.

In Ruhestellung sind alle Schalter offen, die Feinreglerbürsten stehen auf den breiten Lamellen. Während des Aufschaltvorganges dreht sich das Bürstenjoch im Uhrzeigersinn und schließt zunächst den Vorkontakt des Erregerschalters für den Spannungsteiler (Bild 146a) und ein wenig später den Hauptkontakt (Bild 146b). Beim Weiterdrehen wird

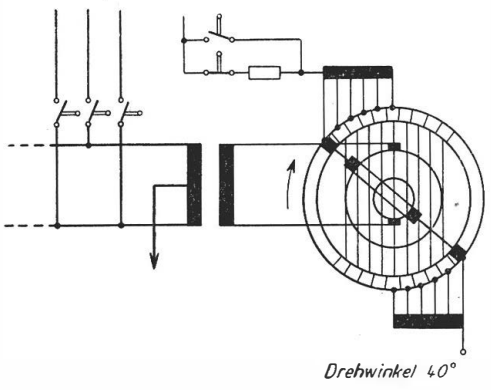
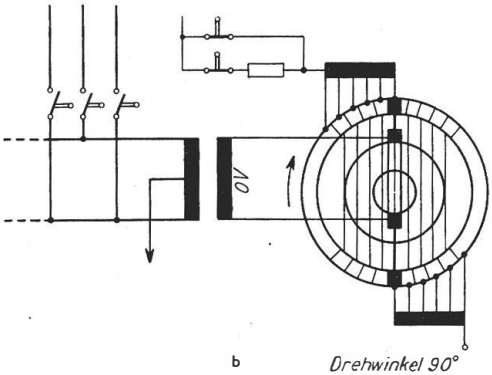
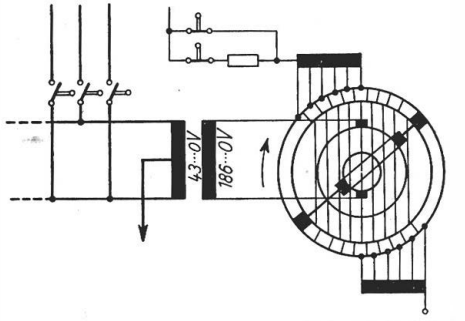


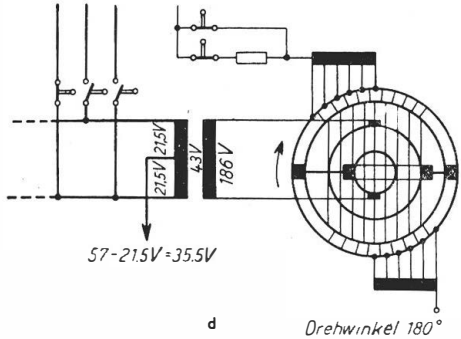
Bild 146
Schaltvorgang bei Feinreglersteuerung (Baureihe E 44)



b Drehwinkel 90°



c Drehwinkel 90° → 137°



d Drehwinkel 180°

in der Stromteilerwicklung eine Spannung erzeugt, die bis auf 43 V ansteigt (Bild 146c). Wird dann der Schalter 1 geschlossen, so wirkt der Motorspannung von 57 V die Spannung entgegen, die von der Primärwicklung des Zusatzumspanners in die obere Hälfte der Sekundärwicklung induziert wird. Der Motor erhält also eine Spannung von $57 - \frac{43}{2} = 35{,}5$ V (Bild 146d). Dann werden die Feinreglerbürsten weiter bis in die Mittelstellung gedreht, dabei sinkt die induzierte Gegenspannung bis auf Null. Der Motor erhält eine Spannung von 57 V (Bild 146e). Werden die Bürsten dann in gleicher Richtung weiter gedreht, so wird in der oberen Stromteilerhälfte statt einer Gegenspannung eine Zusatzspannung erzeugt, die allmählich anwächst (Bild 146f). Sie erreicht, sobald die Bürsten die breiten Lamellen bedecken, wieder den Wert von $\frac{43}{2}$ V, so daß sich die Motorspannung auf 78,5 V erhöht (Bild 146g).

In der unteren Stromteilerhälfte fließt bis dahin kein Strom. Da die Primärwicklung jedoch auch in diesen Teil eine Spannung induziert und der Spannungsunterschied zwischen U und V bekanntlich 43 V beträgt, liegt an der Klemme V eine Spannung von 57 + 43 = 100 V. Da die zweite Trafoanzapfung die gleiche Spannung führt, kann der Schalter 2 eingelegt werden, ohne daß sich ein nennenswerter Lichtbogen bildet. Zwischen den Klemmen U und V ist dann bereits die Spannung vorhanden, die sonst durch die Pri-

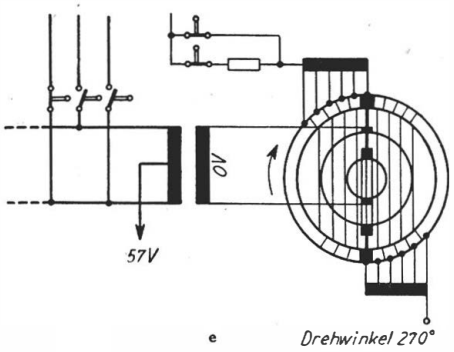
märwicklung induziert würde, so daß jetzt keine Induktion stattfindet. Die Primärwicklung führt nur Leerlaufstrom, und die Sekundärwicklung wirkt lediglich als Spannungsteiler. Der Motor liegt also an einer Spannung von $\frac{57 + 100}{2} = 78{,}5$ V.

Da der Motorstrom zu gleichen Teilen über die Klemmen U und V fließt, liegt in diesem Falle die erste Dauerfahrstufe vor. Beim Weiterdrehen des Feinreglers wird noch während des Kontaktes der Bürsten mit den breiten Lamellen der Schalter 1 ausgeschaltet. Die von der Trafoanzapfung 2 herrührende Spannung von 100 V wird um $\frac{43}{2}$ V auf 78,5 V verringert, so daß die Motorspannung zunächst unverändert bleibt. Beim Weiterdrehen sinkt die Gegenspannung, und dadurch erreicht man ein weiteres Ansteigen der Motorspannung (Bild 146h). Sobald die Bürsten in der Mitte zwischen den breiten Segmenten stehen, sinkt die Gegenspannung auf den Wert Null, und die Motorspannung erreicht 100 V entsprechend der 2. Trafoanzapfung.

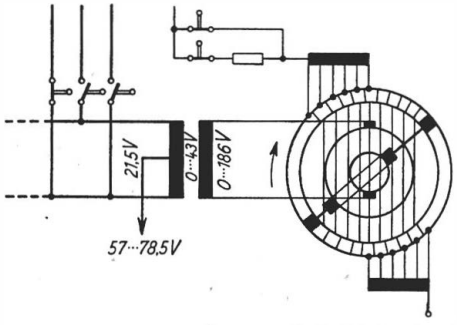
Beim Weiterdrehen tritt wieder Zusatzwirkung auf, bis die Bürsten auf den breiten Lamellen stehen und die Motorspannung den Wert von $100 + \frac{43}{2} = 121{,}5$ V erreicht (B. 146i).

Jetzt wird der Schalter 3 eingelegt. In der gleichen Weise wird auf die höheren Fahrstufen hochgeschaltet.

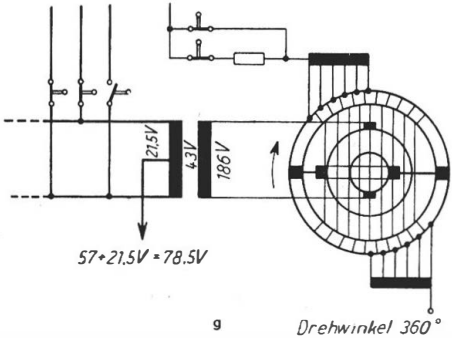
Der Antrieb des Bürstenjoches ist dabei zwangsläufig mit der Betätigung des entsprechenden Stufenschalters gekuppelt. Beim Zurückschalten spielen sich die gleichen Vorgänge in umgekehrter Reihenfolge ab.



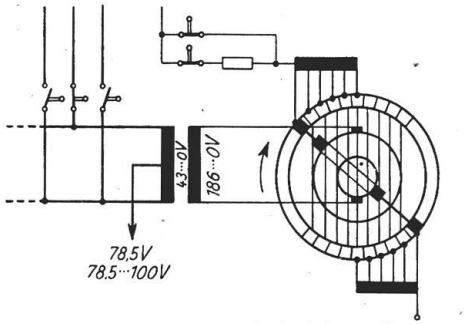
e Drehwinkel 270°



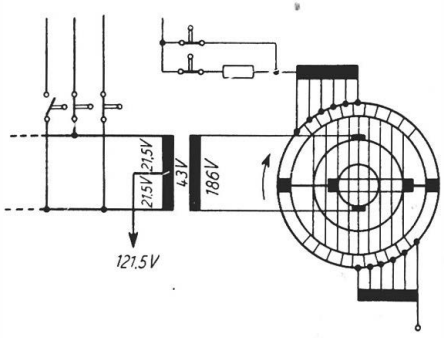
f Drehwinkel 270°-317°



g Drehwinkel 360°



h Drehwinkel 360°-43°-90°



i Drehwinkel 360°-180°

Die hohe Streuung des Zusatzumspanners und die stark veränderliche Streuung des Feinregler-Spannungsteilers haben leider zur Folge, daß der erwünschte gleichmäßige Spannungsanstieg beim Aufschalten besonders bei großer Belastung fast verlorengeht. Die dadurch stellenweise auftretenden Spannungsunterschiede bewirken Lichtbogenbildung und damit beträchtliche Kontaktabnützung. Trotz der fast stufenlosen Spannungsänderung gestattet die Feinreglersteuerung jedoch keine stufenlose Änderung des Motorstromes und damit der Zugkraft, da die Zeit, während der die Bürsten über die Lamellen des Kollektors hinweggleiten, wegen der Erwärmung des Feinreglers begrenzt ist. Man hat daher, um eine noch feinere Abstufung zu erreichen, bei einigen neueren Ausführungen in der Mitte zwischen den beiden breiten Segmenten noch je ein schmales Segment vorgesehen, auf dem die Bürsten kurze Zeit verweilen können. In dieser Stellung ist nämlich die Niederspannungswicklung des Zusatzumspanners kurz geschlossen und der Spannungsteiler nicht belastet. Die Zahl der Stufen wird durch diese Maßnahme praktisch verdoppelt.

Die Feinreglersteuerung wurde bei sämtlichen elektrischen Lokomotiven der Baureihen E 04, E 18, E 44, E 75, E 93 und E 94 und auch bei den Probelokomotiven E 10 001 und E 19 01 und 02 angewendet und hat sich ausgezeichnet bewährt.

3.4117 *Schaltung mit Transduktoren*

Eine noch bessere Steuerbarkeit der elektrischen Lokomotiven erreicht man bei Verwendung von Transduktoren, die, ebenso wie die Transistoren, in der modernen Regel- und Steuertechnik ständig an Bedeutung gewinnen. Transduktoren sind neue elektrische Schaltelemente mit Verstärkereigenschaften, deren Wirkungsweise auf dem nicht linearen magnetischen Verhalten des Eisens und dem Induktionsgesetz beruht. Diese kontaktlosen, stetig regelbaren Schaltelemente haben keine bewegten Teile, sie unterliegen daher keinem Verschleiß und benötigen keine Wartung.

Bild 147 zeigt eine Lokomotivsteuerung, bei der anstelle der sonst üblichen Schaltdrosseln

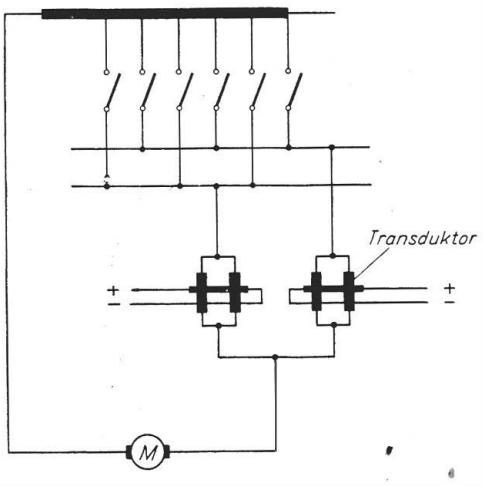


Bild 147
Steuerung mit Transduktoren

Transduktoren verwendet werden. In der Grundstellung, d. h. bei einer vollen Fahrstufe, sind beide Transduktoren halberregt. Jeder von ihnen führt den gleichen Motorstrom, da ihr Widerstand gleich groß ist. Beim Überschalten auf die nächste Fahrstufe werden die Transduktoren wechselweise „auf" und „zu" gesteuert. Wird z. B. der eine Transduktor ganz geöffnet und der andere ganz gesperrt, fließt der gesamte Motorstrom über den geöffneten Transduktor, und die Arbeitswicklung des gesperrten Transduktors kann praktisch stromlos auf die nächste Stufe umschalten. Dieser Vorgang wiederholt sich von Stufe zu Stufe, und es ist auch möglich, in jeder Zwischenstellung beliebig lange zu fahren. Die wechselweise Erregung der Transduktoren wird von einem Kommutatorpotentiometer abgenommen.

3.412 Schaltungsarten bei Hochspannungssteuerung

Aus dem Abschnitt 3.2 „Hauptumspanner" ist bereits bekannt, daß bei modernen leistungsstarken elektrischen Lokomotiven sehr hohe Motorströme auftreten. Wenn diese vom Schaltwerk sicher bewältigt werden sollen, so ist eine entsprechend schwere Ausführung aller Schaltwerksteile und der dazugehörigen Einrichtungen erforderlich. Man braucht große Kontakte, die beim Schalten hoher Ströme einen starken Abbrand aufweisen. Verlegt man jedoch die Leistungssteuerung von der Niederspannungsseite auf die Hochspannungsseite, dann sind entsprechend dem Übersetzungsverhältnis des Trafos wesentlich kleiner Ströme zu schalten. Sie betragen nur noch 200 · · · 500 A, so daß auch ihre Steuerung mit einem wesentlich leichteren Schaltwerk möglich ist. Daß man allerdings außer dem Hauptumspanner zusätzlich noch einen Steuerumspanner benötigt, ist aus den vorstehenden Ausführungen und auch aus Bild 122 bereits bekannt.

Als weiterer Vorteil der Hochspannungssteuerung gegenüber der Niederspannungssteuerung mit Feinregler sei erwähnt, daß die Spannungssprünge von einer Stufe zur anderen nicht konstant sein müssen, sondern verschieden groß gewählt werden können. Man führt deshalb im Anfahrbereich, in dem zur möglichst guten Ausnutzung der Reibungs-

zugkraft die Zugkraftsprünge klein sein sollen, die Hochspannungssteuerung feinstufiger aus als im oberen Bereich.
Während Bild 123 die Wicklungsanordnung bei einem radialgeblechten Trafo mit Hochspannungssteuerung zeigt, ist in Bild 148 die Schaltung eines dreischenkligen Manteltrafos mit Hochspannungssteuerung dargestellt. Das gleichzeitig eingezeichnete Schlittenschaltwerk wird im Abschnitt 3.422 erläutert.

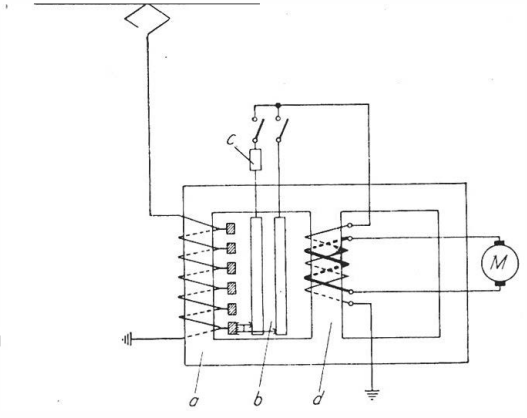


Bild 148
Mantelumspanner für Hochspannungssteuerung
a Steuerumspanner
b Schlittenschaltwerk
c Überschaltwiderstand
d Hauptumspanner

Genaue Untersuchungen und Berechnungen haben ergeben, daß die wirtschaftliche Grenze zwischen Nieder- und Hochspannungssteuerung bei etwa 10000 A des Gesamtstromes im Niederspannungskreis liegt. Dabei wird vorausgesetzt, daß moderne Umspanner und Schaltwerke mit Lastschaltern und Stufenwählern Verwendung finden. Aus diesem Grunde entschied sich auch die Deutsche Bundesbahn bei den schweren elektrischen Lokomotiv-Baureihen E 10^1, E 40 und E 50 für die Hochspannungssteuerung, während für die leichte Baureihe E 41 die Niederspannungssteuerung gewählt wurde.

3.42 Steuerelemente der Leistungssteuerungen

Für sehr kleine Leistungen (z. B. bei Straßenbahnen) bevorzugt man unmittelbare Steuerungen, bei denen die Schaltelemente des Hauptstromkreises direkt von Hand geschaltet werden können. Infolge der geringen Motorströme fallen die Schalter so klein aus, daß sie ohne Schwierigkeit im Fahrschalter untergebracht werden können.
Für größere Leistungen, wie sie bei elektrischen Lokomotiven zu finden sind, verwendet man stets die mittelbare Steuerung. Hier werden die Schaltelemente des Starkstromkreises über Steuerstromkreise beeinflußt. Wegen der hohen Motorströme sind dann schwere Starkstromschalter erforderlich. Diese beanspruchen einen größeren Platz und werden daher stets im Maschinenraum untergebracht. Zur Zeit finden verschiedene Arten von Steuerelementen Verwendung.

3.421 Schütze

Unter einem Schütz versteht man einen Schalter für große Stromstärken, der für Fernbetätigung eingerichtet ist. Um große Leistungen schalten zu können, muß das Schütz eine

hohe Schaltgeschwindigkeit und eine besondere Lichtbogenlöscheinrichtung besitzen. Jedes Schütz besteht aus zwei kupfernen Kontakten, von denen der eine fest und der andere beweglich ist. Der bewegliche Kontakt ist mit der Anschlußklemme durch ein flexibles Band aus geflochtenem Kupfer verbunden. Bei geschlossenem Schütz müssen beide Kontakte fest aufeinandergepreßt werden, damit der Übergangswiderstand möglichst klein bleibt. Sonst entsteht an der Berührungsstelle eine zu starke Erwärmung, die leicht zu einem Zusammenschmoren der Kontakte führen kann. Um einen gleichmäßigen Anpreßdruck zu erreichen, sind die großen Auflageflächen der Kontakte häufig unterteilt.

Nach der Art der Betätigung der Schütze unterscheidet man die elektromagnetischen Schütze oder Magnetschütze und die elektropneumatischen Schütze. Bei elektromagnetischen Schützen wird die zum Einschalten und Erzeugen des Kontaktdruckes erforderliche Kraft durch einen Elektromagneten ausgeübt (Bild 149). Durch ein Kniehebelgelenk wird erreicht, daß der bewegliche Kontakt beim Einschalten des Steuerstromes (im allgemeinen Wechselstrom von 200···220 V) zunächst sehr schnell bewegt wird. Kurz bevor er den festen Kontakt berührt, wird die Geschwindigkeit gesenkt, die Anpreßkraft jedoch erhöht. Die zwischengeschaltete Druckfeder soll für eine satte Berührung sorgen (Wälzkontakt). Nachteilig ist jedoch, daß die Kniehebelwirkung ein schleichendes Ausschalten und demzufolge einen großen Abbrand der Kontakte zur Folge hat.

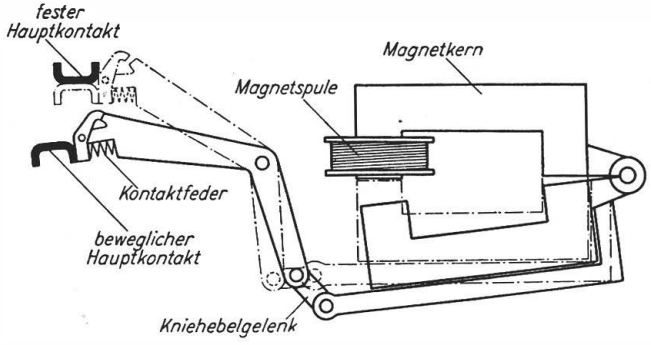


Bild 149
Elektromagnetisches Schütz

Da bei einem Wechselstrommagnet die Stromstärke und somit auch die magnetische Kraft stark schwanken, neigen Wechselstromschütze zum „Schnarren". Man vermeidet dies durch Dämpferspulen, die in den Kern eingebaut werden.

Wird jedoch die Einschaltbewegung durch einen Druckluftantrieb bewirkt, so bezeichnet man dieses Schütz als Druckluftschütz.

Wird das Ventil durch einen Elektromagnet gesteuert, so bezeichnet man dieses Schütz als elektropneumatisches Schütz (Bild 150). Als Steuerstrom verwendet man dann im allgemeinen Gleichstrom mit einer Spannung von 24···48 V. Am Schütz sind noch Hilfskontakte angebracht, die als Ruhe- oder Arbeitskontakte ausgebildet sind.

Neben dem Hauptkontakt sitzen Lichtbogenhörner, die sich beim Einschalten des Schützes zuerst berühren. Erst im Laufe der weiteren Schließbewegung erfolgt der Stromübergang am Hauptkontakt. Die Hörner werden aus einem die Wärme gut leitenden und massiven Werkstoff, meist Rotguß, hergestellt.

Sämtliche Schütze werden dadurch ausgeschaltet, daß die beim Einschalten angehobenen

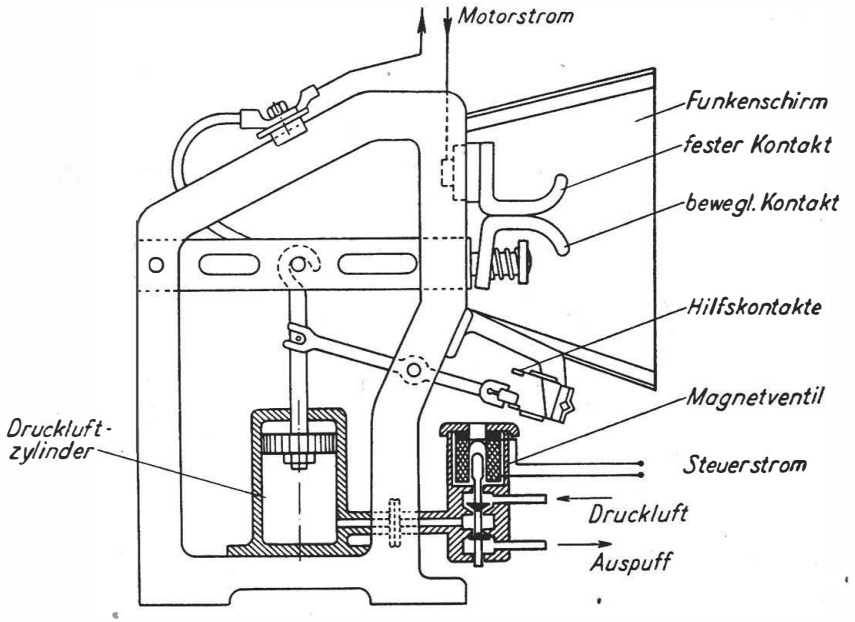


Bild 150. Elektropneumatisches Schütz

Teile abfallen, sobald die Antriebskraft nachläßt. Den Ausschaltvorgang unterstützen kräftige Federn, die beim Einschalten gespannt werden. In dem Augenblick, in dem das Schütz öffnet, wandert die Stromübergangsstelle vom Hauptkontakt wieder zu den Funkenhörnern (Abreißkontakten). Durch den unvermeidlichen Lichtbogen werden diese im Betrieb sehr schnell rauh und uneben und sind deshalb so konstruiert, daß sie leicht ausgewechselt werden können. Die Kontakte müssen sich stets rasch und weit genug entfernen, damit der Lichtbogen schnell und sicher abreißt. Um dies zu erreichen, ordnet man noch eine Blasspule an. Sie beruht im Prinzip darauf, daß der Lichtbogen durch ein Magnetfeld seitlich abgelenkt wird (Bild 151). Die Wicklung des Blasmagneten wird vom Motorstrom gespeist. Da dieser sehr stark ist, genügen ein bis zwei Windungen. Der Windungssinn muß so gewählt werden, daß der Lichtbogen nach außen, also vom Schalter weggeblasen wird. Da die Luft durch den Lichtbogen ionisiert, d. h. leitend gemacht wird, besteht die Gefahr, daß der Lichtbogen auf andere Bauteile überschlägt. Man baut deshalb um die beiden Hauptkontakte eine abnehmbare,

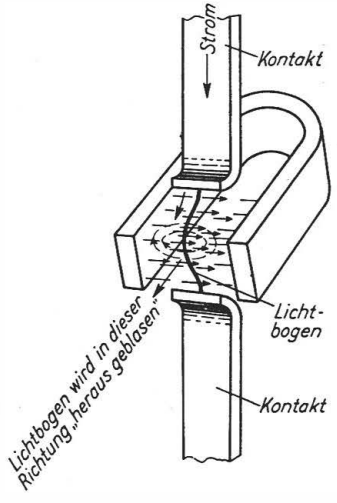


Bild 151. Blasmagnet

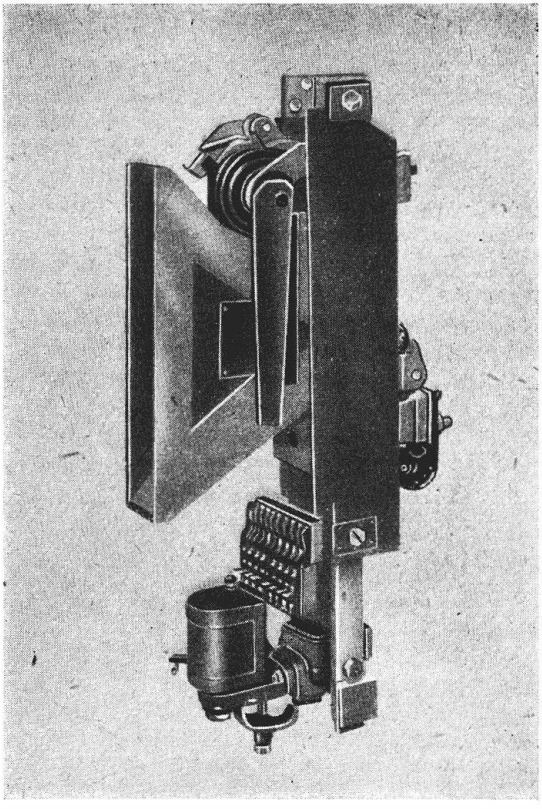


Bild 152
Elektropneumatisches Schütz

vorn offene Funkenkammer an, die aus einem feuerfesten Isolierstoff hergestellt wird (Bild 152). Schützensteuerungen werden bei Neubauten von Wechselstromlokomotiven im allgemeinen nicht mehr verwendet, sie sind jedoch noch an vielen älteren elektrischen Lokomotiven zu finden.

3.422 Schlittenschaltwerke

Den prinzipiellen Aufbau eines Schlittenschalters zeigt Bild 153. Er besteht aus einem drehbaren Schalthebel, der über die Motortrennschütze mit den Fahrmotoren verbunden ist, und vielen einzelnen Kontaktklötzen, die er beim Schalten nacheinander berührt. Diese Kontakte sind mit den verschiedenen Trafoanzapfungen verbunden. Ist die Breite des Schalthebels kleiner als der Abstand der Kontakte voneinander, so tritt beim Schalten von einer Stufe zur anderen eine Stromunterbrechung und somit eine Zugkraftschwankung auf. Ist der Schalthebel jedoch breiter als der Kontaktabstand, so werden in der Zwischenstellung zwei Kontakte kurzgeschlossen.
Da bei der Steuerung einer elektrischen Lokomotive eine Zugkraftunterbrechung genauso unzulässig ist wie das Kurzschließen zweier Trafoanzapfungen, wird der Schalthebel geteilt

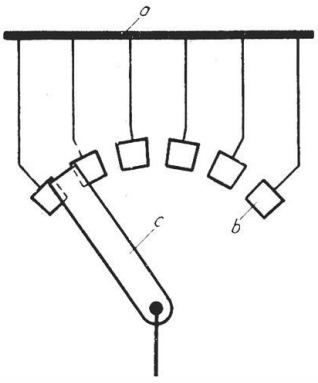


Bild 153
Grundprinzip eines Schlittenschalters
a Trafo (Sekundärwicklung)
b Kontakt
c Schalthebel

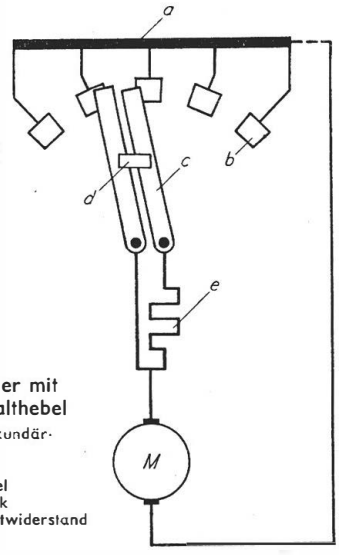


Bild 154
Schlittenschalter mit geteiltem Schalthebel
a Trafo (Sekundärwicklung)
b Kontakt
c Schalthebel
d Isolierstück
e Überschaltwiderstand

ausgeführt (Bild 154). Die beiden Hälften sind durch einen Überschaltwiderstand miteinander verbunden, so daß der Kurzschlußstrom unschädlich gemacht wird. Da zwischen den einzelnen Kontakten ein Spannungsunterschied vorhanden ist, würde sich beim Schalten von Stufe zu Stufe zwischen dem Schalthebel und den Kontakten ein Lichtbogen bilden. Es könnten an den Kontaktstellen Überschläge und starke Verschmorungen auftreten, die den Schalter nach kurzer Zeit zerstören würden. Um dies zu vermeiden, baut man Lastschalter ein, welche die eigentliche Leistung schalten, so daß die vorgenannten Kontakte spannungslos geschaltet werden können.

Bei den Schlittenschaltwerken für Lokomotiven werden die einzelnen Kontakte im allgemeinen nicht im Kreisbogen, sondern in einer Reihe nebeneinander angeordnet, so daß der Schalthebel zu einem „Schlitten" umgestaltet wird (Bild 155). Dieser besteht wieder aus zwei voneinander isolierten Bürsten, die oben auf den Kontaktklötzen und unten auf zwei Sammelschienen gleiten. Die eine Schiene, die zum Überschaltwiderstand führt, wird nur vorübergehend vom Strom durchflossen und kann daher schwächer sein als die Hauptschiene. Beide Schienen sind so kurz, daß sie vom Schlitten nicht mehr berührt werden, wenn dieser in Endstellung steht.

Der Kontaktschlitten wird durch eine Schraubenspindel angetrieben, die über Wellen und Kettenzüge von den beiden Führerständen aus durch ein Handrad bewegt wird. Gleichzeitig dient der Antrieb dazu, die beiden Lastschalter im versetzten Takt zu öffnen und zu schließen, so daß die Bürsten beim Überschalten der Kontakte stromlos sind. Da verhältnismäßig große Kräfte zum Bewegen des Kontaktschlittens aufgewendet werden müssen, finden derartige Schlittenschaltwerke mit Handantrieb bei Neubauten kaum noch Verwendung.

Aus dem Schlittenschaltwerk wurde das Stufenschaltwerk entwickelt, das nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet. Es hat sich bei den Neubaulokomotiven der Deutschen Bundesbahn

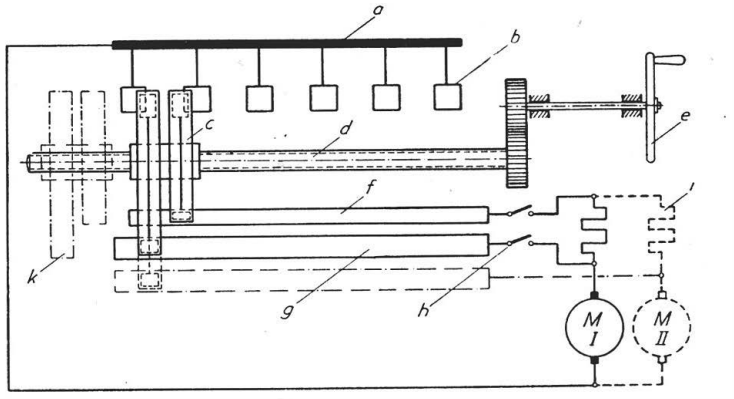


Bild 155. Schlittenschaltwerk

a Trafo (Sekundärwicklung)
b Kontaktklotz
c Schlitten
d Spindel
e Fahrhandrad
f Vorkontaktbahn
g Hauptkontaktbahn
h Lastschalter
i Überschaltwiderstand
k Schlitten in Endstellung

mit Hoch- und Niederspannungssteuerung gut bewährt und wird dann stets mit einem elektromotorischen Schaltwerksantrieb ausgerüstet.

3.423 Nockenschaltwerke

Bei der Deutschen Reichsbahn sind die Lokomotiven der Baureihen E 04, E 18, E 19, E 44, E 93 und E 94 mit einem Nockenschaltwerk ausgerüstet. Dieses besteht aus mehreren Nockenschaltern, die für große Stromstärken geeignet sind und rein mechanisch durch eine Kurvenscheibe betätigt werden. Jeder Nockenschalter hat, ähnlich wie ein Schütz, einen feststehenden und einen beweglichen Kontakt aus Kupfer und wird durch die Nockenscheibe und eine starke Feder eingeschaltet (Bild 156). Das Ausschalten erfolgt ebenfalls durch die Nockenscheibe, so daß ein Hängenbleiben der Kontakte ausgeschlossen ist. Um einen guten Stromübergang zu erreichen, werden die Kontaktflächen entsprechend groß ausgeführt und häufig noch unterteilt.

Der feste Kontakt ist über einen Kontaktbock mit der Halteleiste und der kupfernen Anschlußschiene verbunden. Der bewegliche Kontakt ist an einem Kontakthebel befestigt, der mit dem eigentlichen Schalthebel gelenkig verbunden ist. Durch eine Druckfeder wird bei geschlossenem Schalter ein gleichmäßiger Anpreßdruck erreicht. Der Schalthebel dreht sich um einen Bolzen, der gleichzeitig das Lager für den etwa gleichschenkligen Rollenhebel bildet. Diese beiden Hebel sind durch eine nachstellbare Schraube verbunden, so daß man den Kontaktdruck einstellen und die Abnutzung der Kontakte ausgleichen kann. Der Rollenhebel ist leicht gekröpft. Seine Einschaltrolle läuft stets über den an der Kurvenscheibe seitlich befestigten Einschaltnocken, während seine Ausschaltrolle immer an der mit einer Aussparung versehenen Nockenscheibe anliegt. Der Schalter muß also stets zwangsläufig öffnen und schließen.

Beim Einschalten berühren sich zunächst die Spitzen der Kontakte. Beim weiteren Zusammendrücken gleitet der bewegliche Kontakt ein wenig auf dem festen, so daß er sich

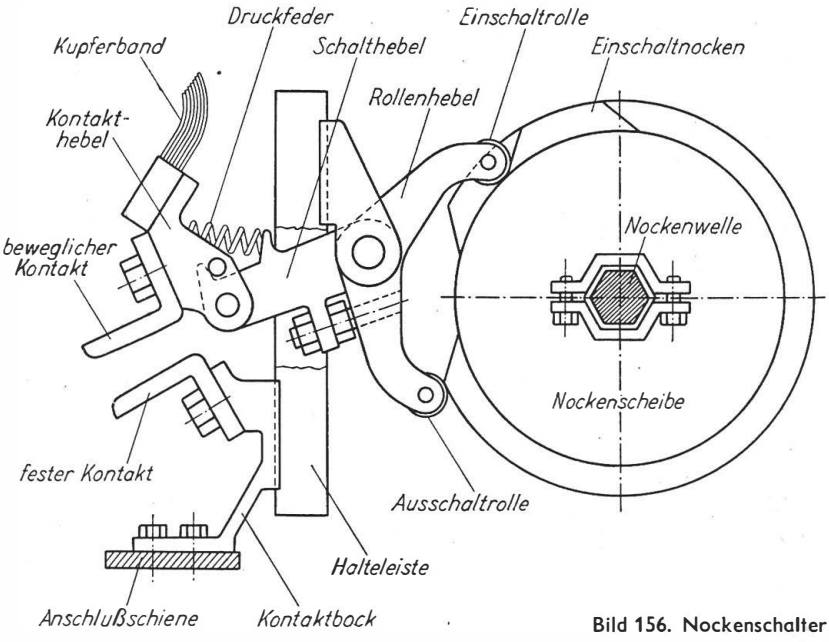


Bild 156. Nockenschalter

eine saubere Kontaktfläche schafft (Wälzkontakt). Beim Ausschalten wird der Kontakthebel durch einen Nocken am Schalthebel mitgenommen. Dadurch wälzen sich die beiden Kontakte wieder aneinander ab und die Stromunterbrechung erfolgt nicht an der eigentlichen Kontaktfläche, sondern an den Abreißkontakten bzw. an den Funkenhörnern. Der Strom wird über ein flexibles Kupferband dem beweglichen Kontakt zugeführt. Dieser ist über die verschiedenen Hebel mit der Nockenscheibe elektrisch leitend verbunden, so daß auch diese stets unter Spannung steht. Sie wird daher gegen die Schaltwerkswelle (Nockenwelle) isoliert und von den anderen Scheiben weit genug entfernt befestigt.

Nockenschalter haben gegenüber Schützen nur eine geringe Schaltgeschwindigkeit, die auch durch rasches Drehen der Nockenscheiben nicht über ein gewisses Maß gesteigert werden kann. Sie sind daher nur zum Unterbrechen von Stromkreisen geeignet, die im Augenblick des Öffnens bereits stromlos sind oder nur geringe Spannungsunterschiede zwischen den Kontakten aufweisen. Dies ist der Fall, wenn die Spannung der Fahrmotoren durch einen Feinregler oder einen Zusatztrafo gesteuert wird. Sind jedoch beim Öffnen des Schalters größere Spannungsunterschiede zwischen den Kontakten vorhanden, so ist es erforderlich, die Nockenschalter mit Blaseinrichtungen und Funkenkammern auszurüsten, wie sie auch bei Schützen verwendet werden.

Ein Nockenschaltwerk für Lokomotiven enthält entsprechend der Anzahl der Fahrstufen etwa 15 Nockenschalter. Die einzelnen Nockenscheiben sind dabei auf einer gemeinsamen Nockenwelle übereinander angebracht und gegeneinander um einen solchen Winkel versetzt, daß die einzelnen Schalter bei einer vollen Umdrehung der Welle der Reihe nach im vorgeschriebenen Schalttakt zur Wirkung kommen.

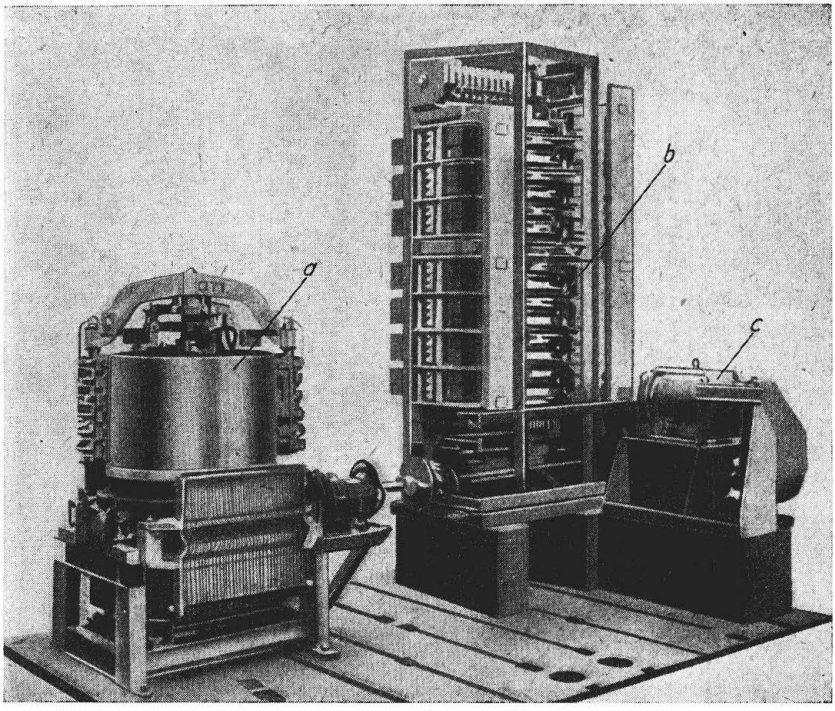


Bild 157. Nockenschaltwerk mit Feinregler
a Feinregler b Nockenschaltwerk c Steuermotor

Bild 157 zeigt das Nockenschaltwerk einer elektrischen Lokomotive mit Feinreglersteuerung.
Die Nockenwelle wird entweder durch ein Handrad von den Führerständen aus über Wellen und Kettenzüge oder durch einen besonderen Schaltmotor angetrieben. Der Antrieb ist so ausgebildet, daß er gleichzeitig den Feinregler betätigt (Bild 158). Die dazwischenliegende Rastenscheibe mit dem dreiarmigen Stern treibt dabei ein Malteserkreuz an, das den Zweck hat, die langsame und gleichmäßige Drehung der Verbindungswelle in eine schnelle und ruckweise Drehung der Nockenwelle zu verwandeln. Die Bewegungen sind untereinander so abgestimmt, daß eine Drehung der Bürsten um 180° einem Weiterschalten des Nockenschaltwerkes um eine Stufe entspricht.

3.424 Wandernocken- und Wanderwalzen-Schaltwerke

Während das gewöhnliche Nockenschaltwerk so viele Nockenschalter hat wie Trafoanzapfungen für die Spannungssteuerung vorhanden sind, benötigt das Wandernockenschaltwerk für alle Fahrstufen zusammen nur zwei wandernde Nockenschalter (Bild 159). Die Anzapfungen des Hauptumspanners führen zu den in zwei Reihen angeordneten festen Kontaktklötzen. Diese werden über die beiden Nockenschalter mit der darunterliegenden

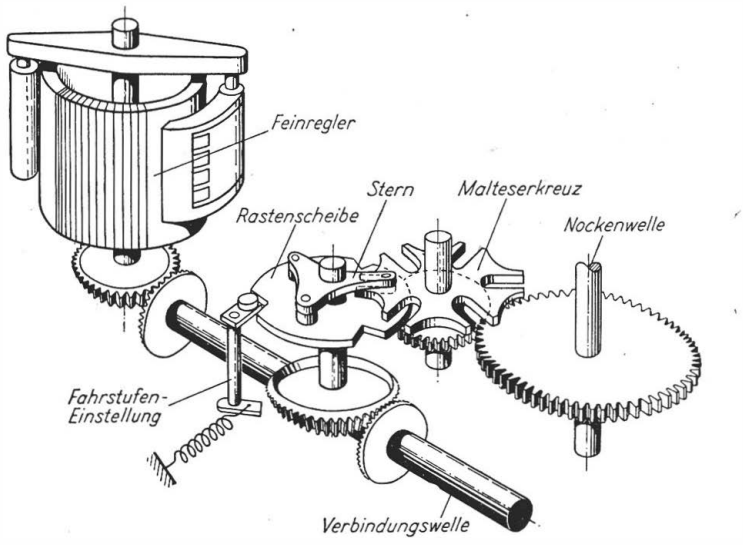


Bild 158. Antrieb des Nockenschaltwerkes

Sammelschiene verbunden. Das Ein- und Ausschalten des Stromkreises beim Weiterschalten übernehmen zwei Lastschalter, die meist mit Blaseinrichtungen und Funkenhörnern ausgerüstet sind. Daher schalten die Nockenschalter völlig stromlos und haben eine sehr geringe Kontaktabnutzung.

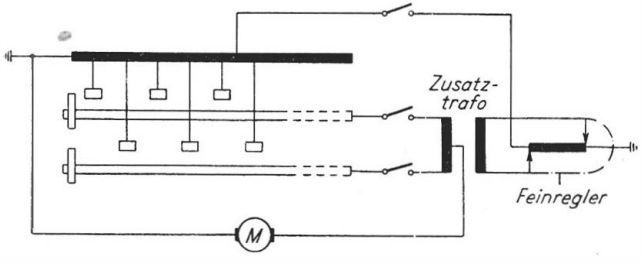


Bild 159
Wandernocken-
schaltwerk mit
Feinregler

Im übrigen entspricht der Aufbau dieses Schaltwerkes der bereits bekannten Feinreglersteuerung. Steht das Schaltwerk auf einer Dauerfahrstufe, so verbinden die zwei Nockenschalter zwei benachbarte feste Kontaktklötze mit der jeweiligen Sammelschiene. Die Lastschalter sind dabei geschlossen, das Bürstenjoch des Feinreglers steht auf den breiten Segmenten des Kollektors. Um das richtige Zusammenarbeiten der Nockenschalter und Lastschalter mit dem Feinregler sicherzustellen, wird das Wandernockenschaltwerk zusammen mit dem Feinregler angetrieben.
Ein Wandernockenschaltwerk ist nur halb so groß wie ein Nockenschaltwerk üblicher Bauart, so daß man es über dem Trafo anordnen kann und daher mit kurzen Zuleitungen auskommt.

Einen ähnlichen Aufbau zeigt das Wanderwalzen-Schaltwerk, das in die E 10 001 der Deutschen Bundesbahn eingebaut wurde. Hierbei werden anstelle der Wandernocken wandernde Walzen verwendet, die über ein Getriebe und ein Malteserkreuz bewegt werden. Das Ein- und Ausschalten des Stromkreises übernehmen auch hier wieder Lastschalter mit besonderen Einrichtungen.

3.43 Übertragungssteuerungen

Die Übertragungssteuerung hat die Aufgabe, die Schaltbefehle vom Führerstand bzw. von einer Befehlsstelle aus an die Steuerelemente der Leistungssteuerung zu übermitteln. Es ist bereits bekannt, daß man nur für sehr kleine Leistungen, z. B. Straßenbahnen, unmittelbare Übertragungssteuerungen verwendet, da infolge der geringen Motorströme die Schalter dann so klein ausfallen, daß sie ohne weiteres in dem vom Fahrzeugführer bedienten Fahrschalter (Kontroller) untergebracht werden können.
Für größere Leistungen, wie sie bei elektrischen Lokomotiven zu finden sind, bevorzugt man mittelbare Übertragungssteuerungen, da wegen der hohen Motorströme die Fahrschalter zu groß und zu schwer werden. Man ersetzt dann zweckmäßigerweise die beiden Fahrschalter auf den Führerständen durch einen in der Nähe des Trafos aufgestellten Zentralfahrschalter bzw. durch ein Schaltwerk.
Diese werden von einem der beiden Führerstände aus mit Hilfe der sogenannten Blindfahrschalter auf mechanischem Wege über Wellen, Zahnräder und Kettenzüge betätigt, sie können aber auch elektromagnetisch oder elektropneumatisch oder auch auf rein elektrischem Wege durch einen Stellmotor bedient werden. Die Entwicklung der letzten Jahre läßt deutlich die Tendenz vom nichtautomatischen über den halbautomatischen zum vollautomatischen Betrieb erkennen. Man will auf diese Weise den Lokomotivführer von der schweren körperlichen Schaltarbeit befreien und zugleich erreichen, daß er sich der Beobachtung der Strecke und Signale mit größerer Konzentration widmen kann.

3.431 Mechanische Handsteuerung

Hierbei wird die im Maschinenraum aufgestellte Schalteinrichtung (z. B. Nocken- oder Schlittenschaltwerk) auf rein mechanischem Wege über Wellen, Kegelradgetriebe und Kettenzüge bedient (Bild 160). Da der zur Überwindung der Bewegungswiderstände erforderliche Kraftaufwand recht hoch ist, empfiehlt es sich, ein verhältnismäßig großes Handrad so anzuordnen, daß es sich um eine waagerechte Welle dreht. Außer der Nullstellung sind etwa 15 Fahrstufen vorhanden und durch einen kleinen Zeiger wird auf einer Skala angegeben, welche Fahrstufe gerade eingeschaltet ist. Um die am Handrad aufzuwendende Kraft möglichst klein zu halten, baut man in das Gestänge zum Schaltwerk meist eine große Übersetzung ein, so daß zum Weiterschalten von einer Fahrstufe zur anderen eine halbe, oft sogar eine ganze Umdrehung des Handrades erforderlich ist. Die genauen Stellungen werden durch Einrasten einer kleinen Rolle gekennzeichnet.
Diese einfache mechanische Handsteuerung ist z. B. bei den Lokomotiven der Baureihen E 04, E 44 und E 94 zu finden.

3.432 Schützensteuerung

Um den Lokomotivführer von der schweren körperlichen Schaltarbeit zu befreien und auch die Möglichkeit zu schaffen, mehrere Triebfahrzeuge von einem Führerstand aus zu

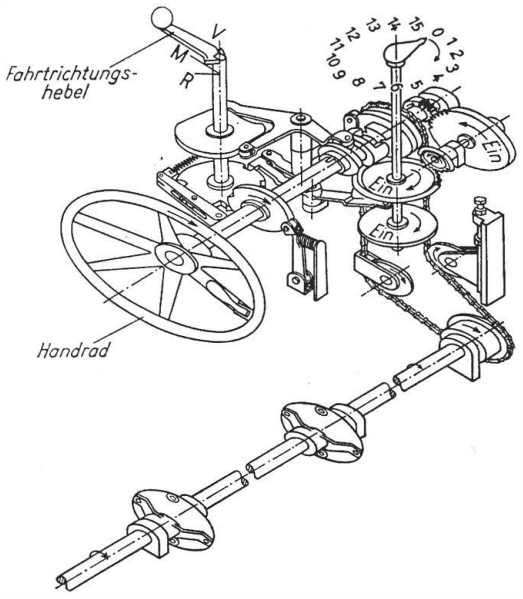


Bild 160
Mechanische Handsteuerung

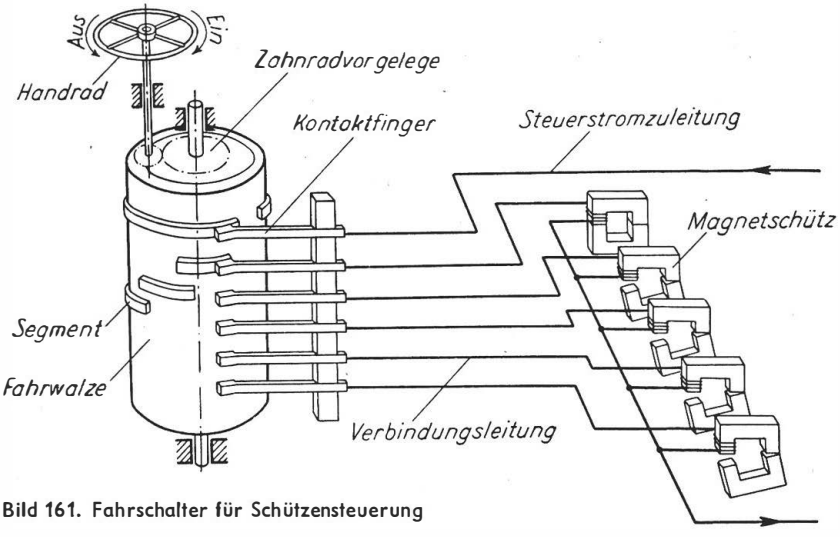


Bild 161. Fahrschalter für Schützensteuerung

steuern (Mehrfachsteuerung), wurde die elektrische Schützensteuerung entwickelt. Bei dieser ist in jedem Führerstand eine Fahrwalze (Meisterwalze) angeordnet, die durch Drehen eines horizontal angeordneten oder schwach geneigten Handrades betätigt wird (Bild 161). Sobald eine Fahrstufe erreicht ist, rastet ein federnder Rollenhebel in eine Rastenscheibe ein.

Um mit einer kleinen Kraft auszukommen und ein zu rasches Drehen der Walze zu vermeiden, schaltet man zwischen Handrad und Walze eine Zahnradübersetzung. Beim Schalten von „Null" bis zur nächsten Fahrstufe dreht sich die Walze um nahezu 360°. Die Segmente für die einzelnen Fahrstufen sind über den ganzen Umfang gleichmäßig verteilt und elektrisch miteinander verbunden (Bild 162). Ein Kontaktfinger stellt dann über die Steuerstromleitungen die Verbindung mit dem entsprechenden Schütz her. Abgesehen von Fahrstufe 1 sind stets zwei benachbarte Schütze eingeschaltet. Zwischen dem Ende eines jeden Segmentes und dem Anfang des übernächsten muß ein genügend großer Abstand a vorhanden sein, damit das zugehörige Schütz genügend Zeit zum Ausschalten hat, bevor das übernächste einschaltet.

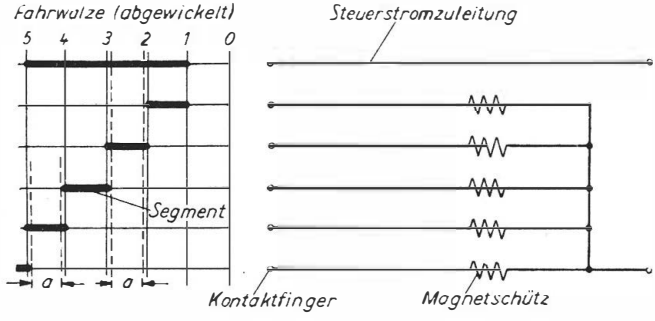


Bild 162
Einfaches Steuerstromschaltbild

Um Fehlschaltungen zu vermeiden, führt man den Steuerstrom eines Schützes über Verriegelungskontakte, die an den anderen Schützen angeordnet sind. Sobald der Steuerstrom unterbrochen wird, fallen die Schütze ab, und der Motorstrom wird ausgeschaltet. Es genügt also zum Schnellausschalten ein einfacher Druckknopfschalter (Schnellabschaltknopf), der in der Deckplatte des Fahrschalters untergebracht ist. Bei dieser Steuerung, die z. B. bei den Lokomotiven der Baureihen E 17 und E 21 Verwendung fand, ist es ohne weiteres möglich, mehrere Lokomotiven von *einem* Führerstand aus zu steuern.

3.433 Auf-Ab-Steuerung mit Stellmotor

Bei neueren elektrischen Lokomotiven mit Nocken- oder Schlittenschaltwerken ist es üblich, den Fahrschalter durch einen Stellmotor (Schaltmotor) anzutreiben, um die Schaltzeiten zu verkürzen und den Lokomotivführer von der körperlichen Schaltarbeit zu entlasten. Der Stellmotor ist im allgemeinen ein Reihenschlußmotor, der mit Wechselstrom von 200 V oder Gleichstrom von 24 V arbeitet und etwa 0,1 kW leistet. Er muß für Vor- und Rückwärtslauf eingerichtet sein und wird vom Lokomotivführer mit Hilfe eines kleinen Stellhebels über Relais gesteuert.

Man unterscheidet folgende Stellungen:

1. Nullstellung. Die Fahrmotoren sind durch die Trennschütze abgeschaltet, das Schaltwerk läuft in die Nullstellung zurück.
2. Stellung „auf". Das Schaltwerk wird durch das Auf-Relais so lange aufgeschaltet, als der Hebel in dieser Stellung steht. Das Hochfahren von der Nullstellung bis zur höchsten Fahrstufe dauert etwa 70 s.

3. Stellung „Fahrt". Das Schaltwerk bleibt in der gerade eingenommenen Fahrstufe stehen.
4. Stellung „ab". Das Schaltwerk wird durch das Ab-Relais so lange zurückgeschaltet, bis entweder die Nullstellung erreicht ist oder der Stellhebel in die Fahrstellung gebracht wird.

Da zum Anziehen schwerer Züge geringe Spannungen nicht ausreichen und das Verweilen auf den unteren Fahrstufen wegen der hohen Ströme leicht zu Kommutatorschäden führt, wird zusätzlich noch die Stellung „schnell auf" eingebaut. Sie ist durch eine Sperrtaste besonders gesichert und bewirkt das Aufschalten bis zur höchsten Fahrstufe in 10 s. Dementsprechend ist auch eine Stellung „schnell ab" vorgesehen. Diese wird jedoch nur selten benutzt, da der Lokomotivführer beim Abschalten das Schaltwerk meist nur wenige Fahrstufen zurücklaufen läßt, um allzu starke Zugkraftschwankungen zu vermeiden, und dann den Schnellabschalteknopf drückt. Dadurch wird der Steuerstrom unterbrochen und die Trennschütze sprechen an, die den Motorstrom sofort abschalten (siehe Abschnitt 3.441). Besondere Einrichtungen sorgen dafür, daß das Schaltwerk dann selbständig in die Nullstellung zurückläuft und ein Weiterschalten über die höchste oder niedrigste Fahrstufe hinaus ausgeschlossen ist. Außerdem ist eine mechanische oder elektrische Einrichtung zum Abbremsen des Stellmotors vorhanden. Durch Malteserkreuze oder Einfallklinken wird erreicht, daß das Schaltwerk nur in den Fahrstufen und nicht in den Zwischenstellungen stehenbleibt.
Um den großen Aufwand für Stellmotor und Abbremsvorrichtung zu verringern, wurden früher anstelle eines Schaltmotors für die Fernbetätigung der Steuerelemente der Leistungssteuerungen auch Schaltmagnete verwendet. Diese trieben über Klinke und Klinkenrad die Schaltwalze an. Da hierbei jedoch nur eine Drehrichtung möglich war, wurden zwei Schaltmagnete eingebaut, die in entgegengesetzter Richtung arbeiteten. Beim Auf- bzw. Abschalten wurde dann jeweils ein Magnet stoßweise erregt.
Auch bei Verwendung eines Stellmotors oder eines Schaltmagneten kann man an einer Skala ablesen, welche Fahrstufe eingeschaltet ist.
Moderne elektrische Lokomotiven und vor allem auch Triebwagen sind mit Schaltwerken ausgerüstet, die automatisch oder halbautomatisch gesteuert werden. In diesem Falle leitet der Lokomotivführer den Steuervorgang nur ein. Strombegrenzungsrelais sorgen dafür, daß beim Aufschalten die zulässige Schaltgeschwindigkeit nicht überschritten wird. Bei den Steuerungen mit Stellmotoren ergibt sich eine besonders einfache Lösung für den Einsatz von Vorspannlokomotiven und für Wendezugbetrieb, da hier nur verhältnismäßig wenig Steuerleitungen weitergeführt zu werden brauchen.

3.434 Nachlaufsteuerung

Bei Neukonstruktionen bevorzugt man gern eine sogenannte Nachlaufsteuerung. Hierbei stellt der Lokomotivführer eine bestimmte Fahrstufe ein, die dann innerhalb einer bestimmten Zeit vom nachlaufenden Schaltwerk erreicht wird.
Ein Vergleich zwischen der Stellung des Handrades und der des Schaltwerkes ist mit Hilfe einer Welle, also auf rein mechanischem Wege, ohne weiteres möglich (Bild 163a). Wird das Handrad im Uhrzeigersinn z. B. auf Stufe 3 eingestellt, so dreht das Ritzel das große Stirnrad in entgegengesetzter Richtung und bewegt die damit verbundenen Schalter um die noch stehenden Nockenscheiben. Der „Auf"-Schalter wird betätigt, wodurch

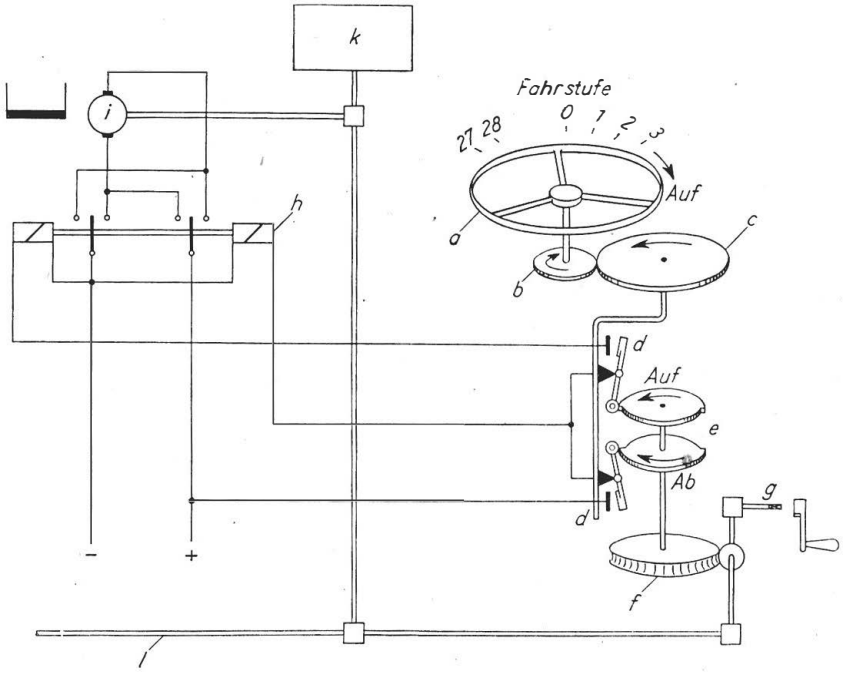


Bild 163a. Nachlaufsteuerung mit mechanischer Welle

a Handrad
b Ritzel
c Vorgelegerad
d Schalter
e Nockenscheibe
f Schneckengetriebe
g Handantrieb
h Relais
i Stellmotor
k Schaltwerk
l Antrieb für 2. Fahrschalter

der Stromkreis zum zugehörigen Relais für die Einschaltung des Stellmotors geschlossen wird. Dieser dreht das Schaltwerk, wobei die Drehbewegung gleichzeitig durch ein mechanisches Wellensystem auf die Nockenscheiben übertragen wird, so daß diese in ihrer Bewegung den Nockenschaltern „nachlaufen". Stimmt die Stellung des Schaltwerkes mit der des Handrades überein, so wird der „Auf"-Schalter durch die Nocke wieder geöffnet und der Steuervorgang ist beendet.

Für die „Ab"-Richtung gilt sinngemäß das gleiche bei jeweils entgegengesetzter Drehrichtung. Bei Störung der elektrischen Steuerung kann das Schaltwerk mit Hilfe einer Kurbel über die Welle betätigt werden, was außerordentlich vorteilhaft ist.

Gebräuchlicher sind jedoch Nachlaufsteuerungen mit Spannungsvergleich, die auch für Mehrfachbespannung und Wendezugbetrieb geeignet sind. Bild 163b zeigt das Prinzip einer Nachlaufsteuerung durch Spannungsvergleich mit gepoltem Relais. Rechts sei die Einrichtung im Führerstand, links die am Schaltwerk angedeutet. Wird das Handrad im Führerstand gedreht, so wird der Abgriff b am rechten Spannungsteiler in eine Stellung gebracht, die der gewünschten Fahrstufe entspricht. Dadurch entsteht ein Potentialunterschied zwischen den beiden Spannungsteilern. Das polarisierte Relais wird wegen des fließenden Brückenstromes ansprechen und je nach Stromrichtung den „Auf"- oder

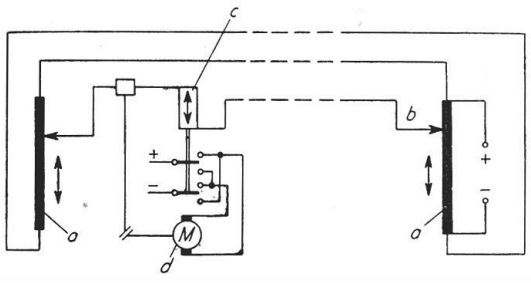


Bild 163b
Nachlaufsteuerung mit Spannungsvergleich
a Spannungsteiler
b Fahrwalze
c gepoltes Relais
d Stellmotor

„Ab"-Kontakt für den Stellmotor schließen. Dieser läuft an und dreht das Schaltwerk und den damit verbundenen Abgriff am linken Spannungsteiler in eine Stellung, bei der sich die Stellungen beider Spannungsteilerabgriffe decken. Es besteht also wieder Übereinstimmung zwischen der Stellung des Handrades und der des Schaltwerkes. Diese Schaltung wurde z. B. bei der E 10 002 erprobt. Für die Neubaulokomotiven der Deutschen Bundesbahn, und zwar für die Baureihen E 10^1, E 40, E 41 und E 50, wurde eine einheitliche Übertragungssteuerung für das motorisch angetriebene Schlittenschaltwerk vorgesehen. Es ist eine kombinierte Nachlauf- und Auf-Ab-Steuerung, die folgenden Anforderungen genügt:

1. Die Steuerung des Schaltwerkes soll mittels Stellmotors sowohl von den Führerständen der Lokomotive als auch von einem Steuerwagen aus möglich sein,
2. die Steuerung des Schaltwerkes soll von einer anderen Lokomotive aus möglich sein, wenn die Zugkraft eines Triebfahrzeuges nicht ausreicht, und
3. das Schaltwerk soll bei Störungen von Hand betätigt werden können, und zwar vom Führerstand aus, jedoch ist diese Forderung auf die betreffende Lokomotive beschränkt.

3.435 Mehrfach-, Fern- und Funksteuerung

Von Mehrfachsteuerung spricht man, wenn zwei oder mehrere Triebfahrzeuge gemeinsam von einem Führerstand aus bedient werden. Dies ist im allgemeinen nur bei Triebwagen üblich, kann jedoch auch bei elektrischen Lokomotiven Anwendung finden, wenn die Zugkraft einer Lokomotive zum Befördern sehr schwerer Züge nicht ausreicht. Man vermeidet dadurch den Bau sehr großer Einheiten, die häufig nicht voll ausgelastet werden und auch sehr hohe Anschaffungs- und Unterhaltungskosten erfordern.
Um Fernsteuerung handelt es sich, wenn nur ein Triebfahrzeug vorhanden ist und dieses von einem Steuerwagen aus, der evtl. am Ende des Zuges läuft, gesteuert wird. Der Steuerwagen ist dann ein Reisezug- oder Gepäckwagen, dessen Steuerabteil mit allen erforderlichen Steuer-, Brems- und Meßeinrichtungen versehen ist. Die zwischen dem Triebfahrzeug und dem Steuerwagen laufenden Beiwagen sind dann zusätzlich mit den entsprechenden Steuerstromkabeln und Steuerstromkupplungen ausgerüstet. Während bei Schützensteuerung ein solches Steuerkabel etwa 20···45 einzelne Steuerleitungen enthalten muß, genügen bei einer modernen Steuerung mit Stellmotor nur 4···6 Steuerleitungen. Neuerdings werden Versuche durchgeführt, für Fernsteuerung die Steuerimpulse mittels Trägerfrequenz über die Heizleitung zu senden, um die Steuerleitungen einzusparen.

Von der Fernsteuerung macht man beim Wendezugbetrieb Gebrauch. Die elektrische Lokomotive bleibt dann stets am gleichen Zugende, das Umsetzen fällt fort, und man kommt mit kürzeren Wendezeiten aus. Da es bei Mehrfach- und Fernsteuerungen natürlich nicht möglich ist, das Schaltwerk auf mechanischem Wege zu bedienen, werden in einem solchen Falle stets Schützensteuerungen oder Schaltwerke verwendet, die durch einen Stellmotor oder Schaltmagnete betätigt werden.

Die Entwicklung der Funktechnik schuf in den letzten Jahren auch die Möglichkeit, elektrische Tiebfahrzeuge von einer ortsfesten Befehlsstelle aus drahtlos fernzusteuern. Diese Neuerung wird zur Zeit im Bergbau und auch im Rangierdienst praktisch angewendet und hat sich bestens bewährt. Hierfür sind die Auf-Ab-Steuerung mit Stellmotor und auch die Nachlaufsteuerung mit Spannungsvergleich am besten geeignet. Man benötigt bei Funksteuerung auf der Lokomotive zusätzlich nur einen Empfänger und einen Steuergeber, der die empfangenen Signale in Steuerbefehle umsetzt. Außerdem ist noch ein kleiner Sender erforderlich, um die Steuerquittungen an die Leitstelle zurückzusenden. Für den Fall, daß eine Wechselsprechverbindung vorgesehen wird, braucht man insgesamt drei Kanäle, nämlich einen für Steuerung und Bremsung, den zweiten für die Steuerquittungen und den dritten für das Wechselsprechen.

Die Französischen Staatsbahnen dehnten im April 1955 ihre Versuchsfahrten mit Funksteuerung sogar auf den Streckendienst aus und fuhren auf der elektrifizierten Strecke Paris–Le Mans einen Zug, der aus einer Bo'Bo'-Lokomotive und vier Wagen bestand, ohne Lokomotivführer und ohne Fahrgäste. Auf dem Nachbargleis wurde dieser Zug von einem elektrischen Triebwagen begleitet, der Ingenieure und Gäste aufnahm. Von dort aus wurden mit Hilfe drahtloser Telefonie die gewünschten Bewegungen des Zuges einem ortsfesten Kommandoturm übermittelt, der die Steuerkommandos an die Fahr- und Bremsausrüstung der elektrischen Lokomotive wiederum durch Funk weitergab. Zur Überwachung der unbemannten Lokomotive waren dann noch weitere Kanäle vorgesehen.

Bei dieser Versuchsfahrt, die ohne jeden Zwischenfall verlief, wurde eine Geschwindigkeit von 120 km/h erreicht und der Zug an der vorgesehenen Stelle zum Halten gebracht. Dieser Erfolg bestätigte, daß bei Einführung der Automatik mit Hilfe elektronischer Geräte die Sicherheit des Eisenbahnbetriebes noch erhöht werden kann.

3.44 Steuereinrichtungen

Neben der reinen Leistungssteuerung hat die Steuerung einer elektrischen Lokomotive noch andere Aufgaben zu erfüllen. Sie ist daher mit einigen zusätzlichen Einrichtungen ausgerüstet, die nachfolgend erläutert werden.

3.441 Fahrmotoren-Trennschalter

Bei mehreren parallel geschalteten Fahrmotoren muß die Steuerung auch in der Lage sein, bei Leerlauf der Lokomotive jeden Motor von den anderen zu trennen, um die sonst durch den remanenten Magnetismus bedingte Selbsterregung zu verhindern. Diese würde zu einer starken Erwärmung führen und dadurch die Motoren beschädigen und evtl. sogar zerstören.

Es werden daher in die Leitungen zu den einzelnen Fahrmotoren Schalter eingebaut, die die Aufgabe haben, einen Motor bei Überlastung oder Kurzschluß selbsttätig abzuschalten. Sie müssen bei Rangierbewegungen oder im Gefahrfall unabhängig von der Schaltwerks-

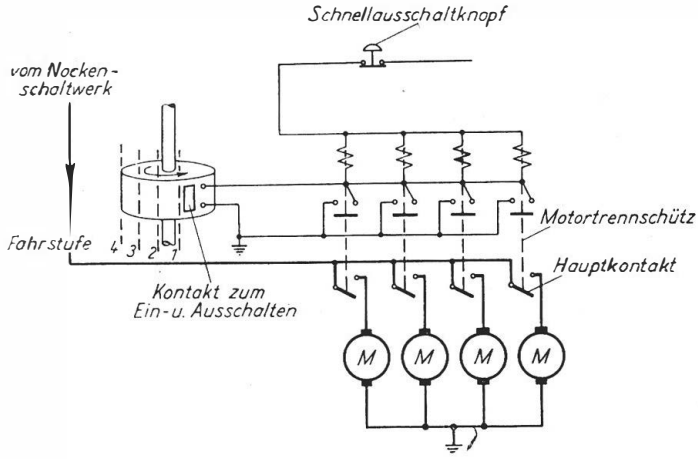


Bild 164. Schaltung der Motortrennschütze beim Nockenschaltwerk

stellung den Strom in kürzester Zeit unterbrechen, da bei einigen Steuerungen, z. B. mit Schlitten- oder Nockenschaltern, der Rücklauf von einer höheren Fahrstufe zur Nullstellung zu lange dauern würde.

Die Schalter müssen imstande sein, den vollen Motorstrom und bei Kurzschluß noch wesentlich höhere Leistungen einwandfrei abzuschalten und sind daher stets als Schütze, sogenannte Motortrennschütze, ausgebildet. Ihre Schaltung ist aus Bild 164 zu ersehen. Sie werden durch den Fahrschalter vor dem Einschalten der ersten Fahrstufe geschlossen und bei Zurückschalten auf Nullstellung geöffnet. Sie unterbrechen auch sofort, wenn die in den Motorstromkreis eingebauten Überstromrelais oder sonstige Schutzeinrichtungen ansprechen. Sie können aber auch durch den Schnellabschaltknopf bedient werden.

Um einen schadhaften Fahrmotor abschalten zu können, ist zu dem Trennschütz meist noch ein Handtrennmesser in Reihe geschaltet. Dieses darf nur im stromlosen Zustand bedient werden.

3.442 Fahrtwender

Eine weitere Aufgabe der Steuerung ist, die Fahrtrichtung der elektrischen Lokomotive ohne Verwendung eines mechanischen Getriebes zu verändern. Man erreicht das am einfachsten dadurch, daß man die Drehrichtung der Fahrmotoren umkehrt. Dies geschieht im allgemeinen durch Verändern der Stromrichtung in den Erregerwicklungen oder auch in den Läuferwicklungen der Fahrmotoren mit Hilfe der Fahrtrichtungswender (Bild 165). Diese bestehen aus vier Schaltern und enthalten meist die Kontakte für die Richtungsänderung mehrerer Fahrmotoren. Da alle Fahrmotoren stets gleichzeitig umgepolt werden müssen, erscheint es zweckmäßig, die Schalter für alle Fahrmotoren in einem einzigen Fahrtwender zu vereinigen. Da in diesem Falle jedoch die Zuleitungen zu den einzelnen Motoren zu lang würden, ordnet man jeweils für eine Motorengruppe, z. B. für alle Motoren eines Drehgestelles, einen Fahrtwender an. Dieser kann dann verhältnismäßig klein aus-

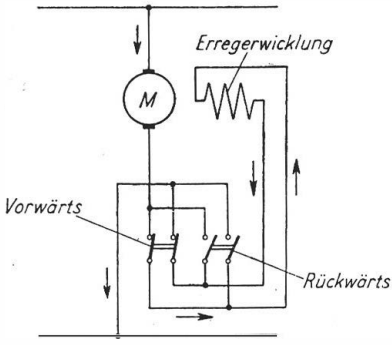


Bild 165
Schaltung des Fahrtrichtungswenders

fallen, da die Kontakte nur im stromlosen Zustand schalten. Aus diesem Grunde kann man auch auf Funkenhörner, Blaseinrichtungen usw. verzichten.
Die Richtungswender werden entweder als Nockenfahrtwender, Schwenkhebelfahrtwender oder auch als Walzenfahrtwender ausgeführt. Sie werden von den Führerständen aus mit Hilfe des Fahrtrichtungshebels auf rein mechanischem, auf elektromagnetischem oder elektropneumatischem oder auch auf rein pneumatischem Wege betätigt. Bei den Baureihen E 04 und E 44 werden die Richtungswender z. B. durch zwei Druckluftzylinder mit elektrisch gesteuerten Ventilen angetrieben. Ein Fahrtwender kann nur die drei Stellungen „Vorwärts", „Null" und „Rückwärts" einnehmen.

3.443 Bremsumschalter

Einige elektrische Lokomotiven sind mit einer elektrischen Widerstandsbremse ausgerüstet, um bei längeren Talfahrten Bremsklötze und Radreifen zu schonen (siehe Abschnitt 3.6). Die Fahrmotoren arbeiten dann nach einer entsprechenden Umschaltung als Generatoren. Beim Übergang von Fahrt mit Leistung auf elektrische Bremsung sind dann verschiedene Umschaltungen erforderlich, die durch Bremswender erledigt werden. Da die Umschaltung bei Leerlauf der Motoren erfolgt und die Kontakte daher in stromlosem Zustand schalten, genügen verhältnismäßig kleine Nocken- oder Walzenschalter in der Art der Richtungswender. Ihr Antrieb geschieht fast ausschließlich auf elektropneumatischem Wege. Der Bremswender wird durch den Bremswendehebel von „Fahrt" auf „Bremse" oder umgekehrt gestellt. Fehlt ein eigener Bremswendehebel, so besitzt der Fahrtwendehebel noch zwei oder mehrere Kontakte zum Umstellen auf elektrische Bremse.

3.444 Verriegelung

Sämtliche Bedienungshebel, Schalter und Meßinstrumente sind in übersichtlicher Form auf den Führerständen angeordnet. Sie können vom Lokomotivführer gut übersehen und bei neueren elektrischen Lokomotiven auch im Sitzen bedient werden. Steuerhandrad, Fahrtwendehebel und, soweit vorhanden, auch Bremswendehebel sind gegeneinander verriegelt, um zu vermeiden, daß der Lokomotivführer versehentlich bei voller Fahrt den Fahrtwendehebel umstellt. Dies kann zu schweren Schäden an der elektrischen Ausrüstung führen. Die Verriegelung geschieht meist elektrisch über die Steuerstromkreise und zugleich mechanisch. Der Fahrtwendehebel kann nur dann umgestellt werden, wenn das

Handrad sich in der Nullstellung befindet. Andererseits ist das Handrad in der Nullstellung blockiert, wenn der Fahrtwendehebel in der Mittelstellung steht, in der er abgezogen werden kann. Auf jeder elektrischen Lokomotive ist nur ein Fahrtwendehebel vorhanden, so daß eine gleichzeitige Betätigung beider Fahrschalter unmöglich ist.

3.5 Fahrmotor

Es sei an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen, daß sich sämtliche Betrachtungen dieses Kapitels auf die elektrische Ausrüstung von Wechselstromlokomotiven beschränken, so daß auch in diesem Abschnitt nur der Einphasen-Reihenschlußmotor behandelt werden soll. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Wirkungsweise und der prinzipielle Aufbau eines Elektromotors bereits bekannt sind.

Im Gegensatz zu einem stationären Motor, dessen Größe und Masse im allgemeinen keiner Einschränkung unterliegen, verlangt man von einem Fahrmotor, daß er bei möglichst geringer Masse und kleinem Raumbedarf eine hohe Leistung abgibt, kurzfristig stark überlastbar ist und in einem großen, feinstufig steuerbaren Drehzahlbereich einen guten Wirkungsgrad und Leistungsfaktor aufweist. Der Motor soll beim Anfahren eine große Zugkraft entwickeln, die bei zunehmender Geschwindigkeit allmählich abfällt. Bild 166 zeigt, daß der Reihenschlußmotor diese Forderung weitgehend erfüllt. Ebenso kann man den Wirkungsgrad einer Wechselstromlokomotive als durchaus befriedigend bezeichnen (siehe Abschnitt 1.411). Er steigt mit zunehmender Geschwindigkeit stark an und erreicht bei etwa 30 ··· 40 % der Höchstgeschwindigkeit einen nahezu konstanten Wert, der im Mittel bei etwa 80 % liegt (Bild 167). Der Leistungsfaktor beträgt bei 16⅔-Hz-Lokomotiven im Mittel $\cos \varphi \approx 0{,}92$.

Durch neue Erkenntnisse im Motorenbau, durch bessere Isolierstoffe und eine reichlich bemessene Luftkühlung war es möglich, trotz der räumlichen Beschränkung die Leistung eines Fahrmotors für Einzelachsantrieb bis auf etwa 900 kW zu erhöhen und das Verhältnis Masse zu Leistungseinheit bis auf einen Wert von etwa 4,5 kg/kW zu senken. Da ein Reihen-

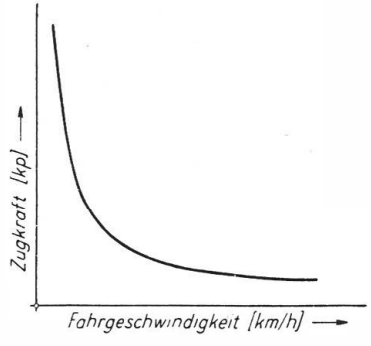


Bild 166. Zugkraftverlauf bei einem Reihenschlußmotor

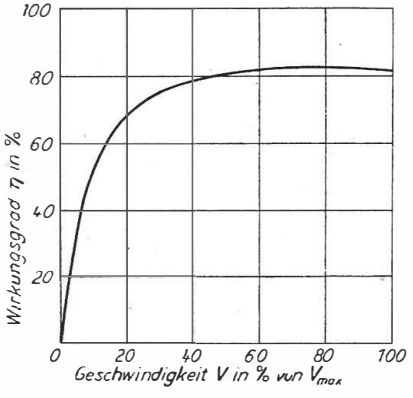


Bild 167. Wirkungsgrad einer Wechselstromlokomotive

schlußmotor auch auf 200···250 % überlastet werden kann, ist ein moderner Bahnmotor in der Lage, sämtliche vorgenannten Forderungen zu erfüllen.
Außerdem hat man gelernt, die Motorencharakteristik so zu wählen und die Steuerung so zu entwickeln, daß mit einer Universallokomotive sowohl Schnellzüge als auch Güterzüge wirtschaftlich befördert werden können. Dadurch ist es möglich, die Vielzahl der bisherigen Lokomotivtypen wesentlich einzuschränken und somit die Herstellungs- und Unterhaltungskosten in großem Umfang zu senken.

3.51 Aufbau des Ständers und Läufers

Jeder Fahrmotor besteht aus dem Motorgehäuse, dem Ständer, dem Läufer mit dem Stromwender und dem Bürstenring. Während das Gehäuse früher im allgemeinen gegossen wurde, bevorzugt man heute Schweißkonstruktionen, um mit einer geringeren Masse auszukommen. Je nach der Art des verwendeten Antriebes kann das Gehäuse noch Tatzlager oder Lager für eine Hohlwelle, für Zahnräder, Schutzkästen oder dergleichen enthalten (siehe Bilder 56 und 71). An die beiden Stirnseiten des Gehäuses werden Lagerschilde angeschraubt, die zugleich die Lager für die Läuferwelle aufnehmen. Während man früher meist Gleittager, und zwar sogenannte Ringschmierlager verwendete, bevorzugt man heute im allgemeinen Wälzlager. Diese weisen einen geringen Reibwert auf und benötigen auch weniger Wartung, da das Lagerfett nur etwa alle 1½ Jahre ergänzt zu werden braucht. Durch Labyrinth- und Spritzringe, Filzpackungen usw. ist das Lager sorgäfltig abzudichten, da evtl. eindringendes Öl die Isolation aufweichen und den Motor zerstören würde.
Das Motorgehäuse enthält Hohlräume zur Führung der Kühlluft. Mehrere große, durch Deckel verschlossene Öffnungen ermöglichen die ständige Überprüfung des Stromwenders

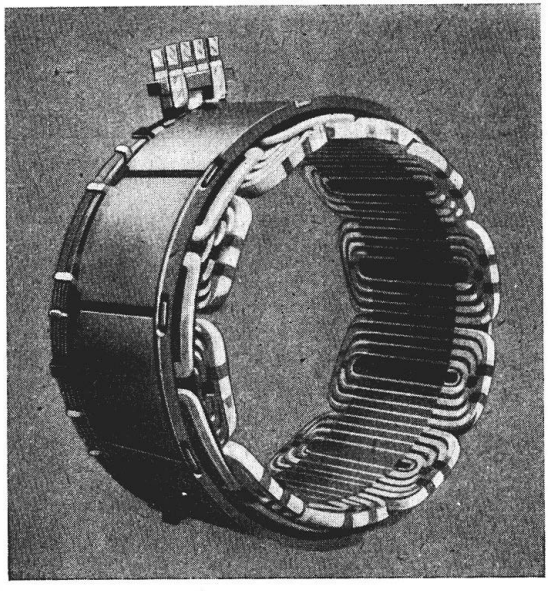


Bild 168 a
Ständer eines Fahrmotors

und der Kohlebürsten. Die Anschlußklemmen werden in einem besonderen Klemmkasten am Gehäuse zusammengefaßt.

In das Gehäuse wird der einteilige Ständer eingepreßt und durch einen Flachkeil gegen Verdrehen gesichert (Bild 168 a). Sein Eisenkörper ist mit Rücksicht auf die Eisenverluste aus einzelnen, etwa 0,5 mm dicken Blechen aufgebaut, die durch Lack oder Papier gegeneinander isoliert sind. Die einzelnen Ringe, die auch aus mehreren Segmenten bestehen können, werden aus Blechtafeln ausgestanzt und durch Preßringe zusammengehalten. Die Wicklungen liegen in halb geschlossenen Nuten, die zum Schutze der Spulen mit Preßspan ausgekleidet sind und durch Holz- oder Fiberkeile verschlossen werden. Die breiten Nuten nehmen die Erreger- und die Wendepolwicklung auf, während die Kompensationswicklung in den kleinen Nuten untergebracht wird. Die Pole (meist 8 bis 16 Stück) sind bei Wechselstrommotoren nicht mehr deutlich zu erkennen, da sie über den Innendurchmesser nicht hervorragen. Die einzelnen Stäbe der Wicklung sind durch Glimmer, Glasseide oder dergleichen isoliert. Die Spulen werden mit Baumwollband umwickelt und anschließend in einer Isoliermasse getränkt. Die Erreger-, Kompensations- und Wendepolwicklungen sind hintereinandergeschaltet. Ihre Lage ist aus Bild 168 b zu erkennen.

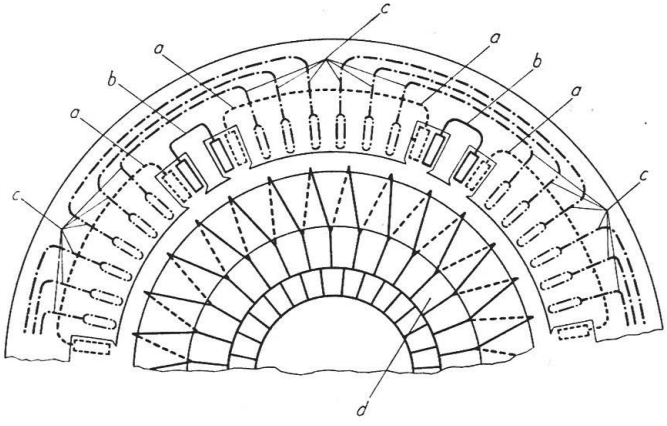


Bild 168 b. Wicklungsanordnung eines Reihenschlußmotors
a Feldwicklung b Wendepolwicklung c Kompensationswicklung d Ankerwicklung mit Kollektor

Die Enden der einzelnen Wicklungsspulen sind an Anschlußringe gelegt, die mit den Zuführungsleitungen verbunden sind. Parallel zu der Wendepolwicklung jedes Motors ist zur Verbesserung der Kommutierung stets noch ein induktionsfreier Widerstand geschaltet.

Der Läufer eines Bahnmotors besitzt eine Welle aus vergütetem Chromnickelstahl, die im Motorgehäuse gelagert ist (Bild 169). Auf die Welle ist ein Tragkörper aufgepreßt und durch Nut und Feder gegen Verdrehen gesichert. Er wird aus Stahlguß oder als Schweißkonstruktion hergestellt und hat die Form eines sehr breiten Rades. Zwischen den Speichen kann die Kühlluft hindurchströmen.

Auf den Tragkörper wird das Läufereisen aufgepreßt, das, wie beim Ständer, aus vielen dünnen Blechen besteht. Diese werden durch kräftige Preßringe zusammengehalten und

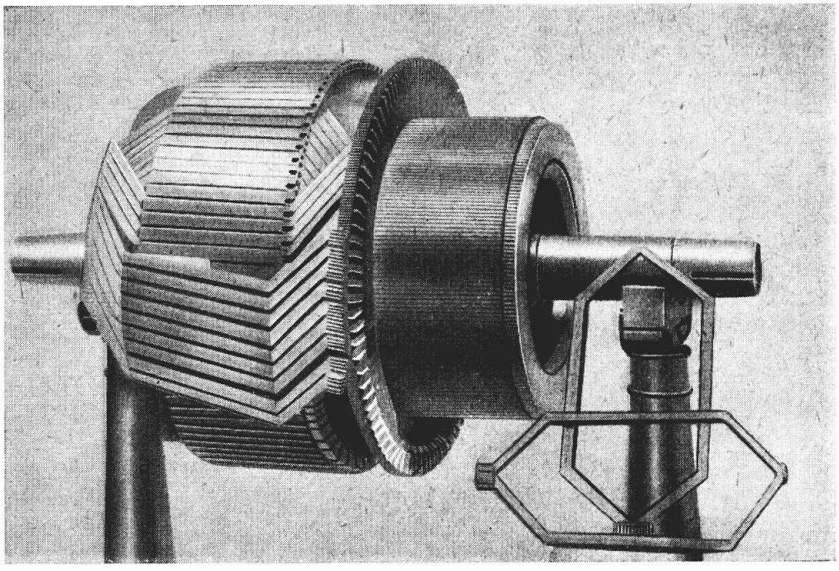


Bild 169. Läufer eines Fahrmotors

durch Nut und Feder gegen Verdrehen gesichert. Die über den ganzen Umfang gleichmäßig verteilten Nuten laufen jedoch nicht wie beim Ständer parallel zur Welle, sondern schräg. Dadurch kommt beim Lauf des Motors die Nut allmählich unter den Pol und man vermeidet elektrische Schwingungen, die sonst die benachbarten Fernmeldeleitungen empfindlich stören würden.

Die Ankerwicklung besteht aus nur einer Windung je Spule und ist im allgemeinen als Schleifenwicklung ausgeführt (Bild 170). Die Wellenwicklung ist bei Bahnmotoren weniger gebräuchlich. In einer Nut werden stets mehrere Spulenstäbe untergebracht, weil die Zahl der Spulen viel kleiner ist als die der Lamellen des Stromwenders. Die Spulenstäbe der in einer Nut zusammentreffenden Spulen werden übereinander angeordnet. In einer Nut können bis zu zehn Spulenstäbe eingebaut werden, von denen die eine Hälfte linke, die

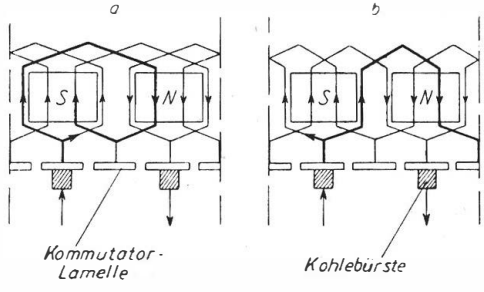


Bild 170
Schleifen- (a) und Wellenwicklung (b)

andere Hälfte rechte Stäbe sind. Die zusammenliegenden linken bzw. rechten Spulenstäbe werden mit Glimmerband umwickelt und dann jeweils als Spulenseiten bezeichnet.
Somit sind in einer Nut stets zwei Spulenseiten untergebracht, wobei z. B. die linken Spulenseiten oben und die rechten unten angeordnet sind (Bild 171).

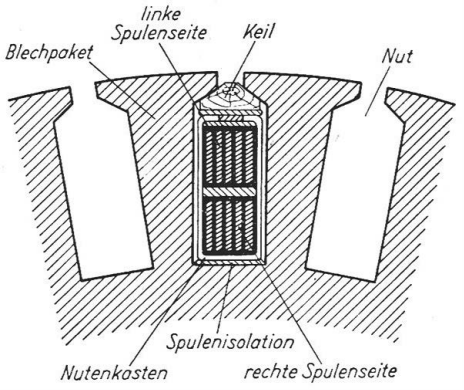


Bild 171
Anordnung der Spulenseiten in einer Nut

Die einzelnen Nuten sind mit Nutenkästen aus Preßspan ausgekleidet, so daß eine gute Isolation zwischen Wicklung und Läufereisen gewährleistet ist. Die Spulenseiten sind durch Wickelköpfe miteinander verbunden, die auf Wickelkopfträgern liegen. Die Wickelköpfe der Läuferwicklung sind durch lackierte Segeltuchkappen bedeckt und werden durch Stahldrahtbandagen und einen eisernen Abschlußring zusammengehalten und so gegen die Fliehkraft geschützt. Die höchstzulässige Ankerumfangsgeschwindigkeit beträgt etwa 60 bis 70 m/s. Um Spannungsunterschiede, die bei verschieden großen Feldstärken der einzelnen Pole auftreten können, auszugleichen, verbindet man die Stellen der Wicklungen miteinander, die stets gleiche Spannungen haben sollen. Diese Ausgleichleiter sollen verhindern, daß Ausgleichströme über die Bürsten fließen und die Stromwendung erschweren.
Es ist zweckmäßig, den Läufer vollständig abzudecken, um das Eindringen von Staub, Öl und Feuchtigkeit zu den spannungführenden Teilen zu verhindern. Die Läufer schnellaufender Motoren werden ausgewuchtet, um Störungen bei der Kommutierung, starke Erschütterungen und Lagerschäden zu vermeiden.
Die Läuferwelle trägt am Ende das Ritzel, das in das große Vorgelegezahnrad eingreift. Dieses ist bei Tatzlagerantrieb auf der Achswelle, bei elastischen Antrieben meist auf einer Hohlwelle gelagert. Bei einer Stundenleistung über 350 kW/Achse ist doppelseitiger Antrieb erforderlich.

3.52 Stromwendung

Der Kommutator (Stromwender), auch Kollektor genannt, wird auf die lang gehaltene Nabe der Läufertrommel aufgepreßt, so daß die Läuferwelle jederzeit ausgewechselt werden kann (Bild 172). Der Kommutator besteht aus einem zylindrischen Stahlgußkörper und vielen kupfernen Lamellen, die untereinander und gegen den Kommutatorkörper durch Glimmerzwischenlagen isoliert sind. Die Lamellen haben einen keilförmigen Querschnitt und Aussparungen, in die die Preßringe eingreifen. Der eine davon ist mit dem Kommutatorkörper aus einem Stück hergestellt, der andere wird durch axiale Schrauben

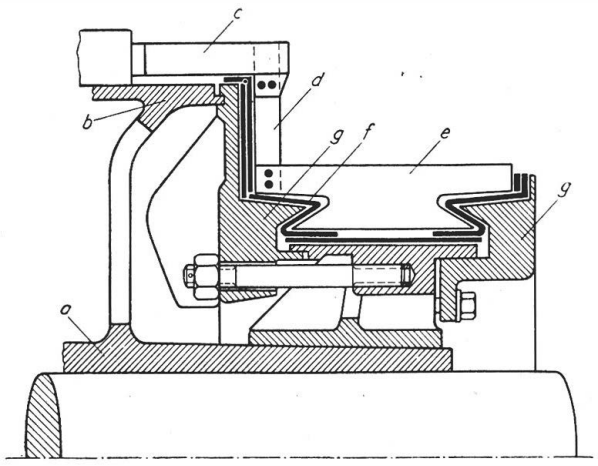


Bild 172
Kommutator im Schnitt

a Läufernabe
b Wickelkopfträger
c Läuferspule
d Fahne
e Lamelle
f Isolation
g Kommutator-Preßring

angepreßt. Dadurch wird ein Zusammenpressen der Lamellen in axialer und radialer Richtung erreicht, was unbedingt erforderlich ist, um eine spätere Formänderung zu vermeiden. Die Lamellen werden mit den Spulenenden der Ankerwicklung durch Kupferbänder, den sogenannten Kommutatorfahnen, verbunden. Diese sind mit den Lamellen aus einem Stück hergestellt oder fest miteinander verlötet. Die Zwischenlagen aus Glimmer müssen etwas unter die Oberfläche des Kommutators zurücktreten, um den glatten Lauf der Bürsten auf den Laufflächen nicht zu stören. Der Durchmesser des Kommutators wird so bemessen, daß die Umfangsgeschwindigkeit maximal 50 m/s beträgt.

Der Strom wird dem Kommutator durch Bürsten zugeführt. Sie bestehen meist aus mehreren nebeneinander liegenden Bürstenkohlen, die in Bürstenhaltern geführt werden. Elektrographitische Kohle ist für diesen Zweck besonders geeignet, weil sie den großen mechanischen und elektrischen Beanspruchungen gewachsen ist und den Kommutator weder beschädigt noch verschmiert. Damit die Kohlen nur etwa 2···3 Lamellen überdecken, sind sie nur 10···16 mm stark. In der Längsrichtung liegen dann allerdings 4···6 Kohlen nebeneinander, um die erforderliche Fläche für den Stromübergang zu erzielen. Durch die Kohlen werden also mehrere benachbarte Lamellen verbunden und dadurch die entsprechenden Läuferwicklungen kurzgeschlossen. Dies ist unerwünscht und verschlechtert die Stromwendung.

Um dem quer durch die Kohle fließenden Strom einen möglichst großen Widerstand zu bieten, werden die Bürsten neuerdings gespalten (Bild 173). Man erreicht dadurch eine gute Stromwendung, eine glatte Oberfläche der Lamellen und einen geringeren Verschleiß der Kohlen. Unter günstiger Voraussetzung beträgt dieser nur etwa 0,2 mm je 1000 km Fahrt, so daß Laufleistungen von 100000 km und mehr mit einer Kohle erreicht werden können. Bei gut arbeitenden Stromwendern bildet sich nämlich nach kurzer Laufzeit auf den Kupferlamellen eine Politur aus Kupferoxyden, die zwar den Übergangswiderstand von Kohle zu Kupfer etwas erhöht, den Reibwert jedoch herabsetzt. Auch die Kohlen bekommen dann an der Auflagestelle eine glänzende Oberfläche.

Die einzelnen Bürsten werden in Bürstenhaltern untergebracht, und zwar sind, je nach

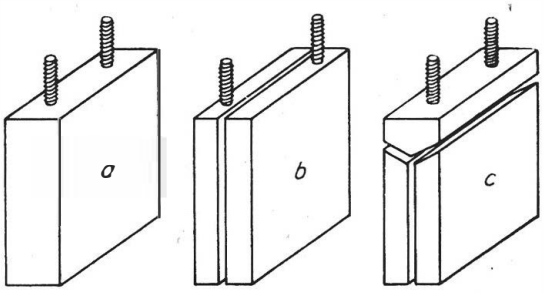


Bild 173
Bürstenkohlen
a normale Kohle
b Schichtkohle
c Spreizkohle

Polzahl des Motors, insgesamt etwa 8···16 Stück vorhanden (Bild 174). In den Taschen werden die Kohlen genau radial und parallel zur Welle geführt und durch Federn und Druckfinger auf die Lauffläche des Kommutators gedrückt. Der Anpreßdruck muß unabhängig von der Abnützung der Kohlen sein und soll etwa 0,25 kp/cm² Schleiffläche betragen. Der Druckfinger kann zurückgeklappt und die Kohle herausgenommen werden.
Nach der Art der Stromzuführung vom Bürstenhalter zu den Bürstenkohlen unterscheidet man bewehrte und unbewehrte Kohlen, je nachdem, ob der Strom über eine besondere Kupferlitze oder durch den Druckfinger selbst der Kohle zugeführt wird. Um ein schnelles

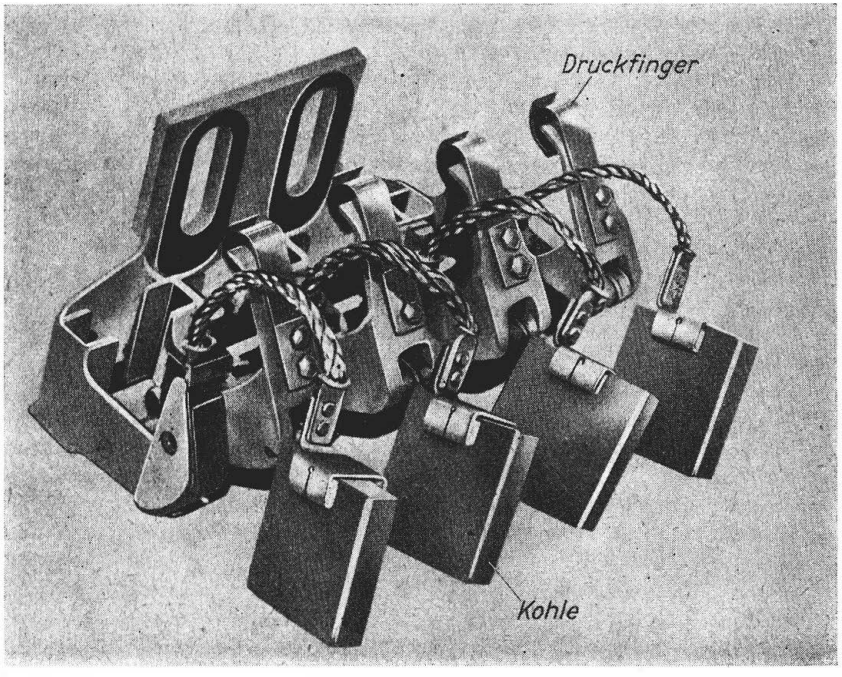


Bild 174. Bürstenhalter mit Kohlen

Auswechseln zu ermöglichen, bevorzugt man im allgemeinen die unbewehrten Kohlen. Der Druckfinger hat dann an der Berührungsstelle mit der Kohle eine Silberauflage, so daß stets ein guter Stromübergang gewährleistet ist.

Die Halter sind stets an einem gemeinsamen Bürstenhalterring befestigt, der im Motorgehäuse gelagert ist und den Kommutator zentrisch umgibt (Bild 175). An diesem Bürstenträgerring sind noch isolierte Schaltringe befestigt, denen der Ankerstrom durch zwei Bürstenkontakte zugeführt wird. Nach Lösen einer gesicherten Verriegelung kann der Bürstenring mittels eines Zahnradgetriebes um 360° gedreht werden. Auf diese Weise ist es möglich, alle Bürsten vom Maschinenraum aus nach Abnahme des Gehäusedeckels nachzusehen und die einzelnen Bürstenkohlen, wenn nötig, auszuwechseln. Im Betriebszustand sind die einzelnen Bürsten so eingestellt, daß jede Bürste genau auf Polmitte steht. Eine falsche Bürstenstellung macht sich durch starkes Feuern am Kommutator bemerkbar.

Das gefürchtete Bürstenfeuer kann auch bei schweren Anfahrten auftreten und ist darauf zurückzuführen, daß das magnetische Wechselfeld des Ständers bei Stillstand des Läufers durch Induktion in der Läuferspule zwischen den einzelnen Lamellen des Kommutators Spannungen bis zu 10 V erzeugt. Da die Kohlen zwei bis drei Lamellen überbrücken, entstehen Kurzschlußströme, die eine ungleichmäßige Stromverteilung und eine Schwächung des Anfahrdrehmomentes bewirken. Da dieses Moment im Takte des Wechelfeldes schwingt, treten bei schweren Anfahrten starke Erschütterungen des Motors und somit auch des Kommutators auf. Dadurch entstehen mehr oder weniger starke Lichtbögen, die durch die hohen Temperaturen von annähernd 3000 °C die Kontaktflächen stark angreifen und

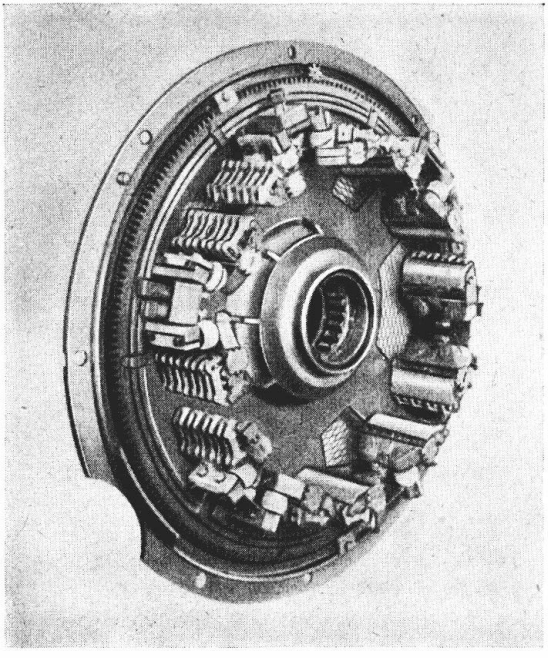


Bild 175
Lagerschild mit Bürstenhalterring

die Festigkeit des Lamellenkupfers herabsetzen. Im weiteren Betrieb werden diese weichen und oft porösen Stellen stark abgenutzt und es bilden sich muldenförmige Vertiefungen aus. Diese geben bei der hohen Umfangsgeschwindigkeit zu einem Springen der Bürsten und somit zu starken Lichtbögen Anlaß. Dadurch werden die glatten Oberflächen der Lamellen und Bürsten rauh, was wiederum zu einem starken Kohleverschleiß und evtl. sogar Kohlebruch führt.
Der Lokomotivführer muß daher bestrebt sein, auch mit hohen Zuglasten möglichst schnell anzufahren. Es ist richtiger, mit dem höchstmöglichen Anfahrstrom das Anlaufen der Motore zu erzwingen, als mit etwas niedrigeren Strömen mehrmalige Anfahrversuche zu unternehmen (siehe Abschnitt 8.3).

3.53 Kühlung

Die Leistungsfähigkeit der Fahrmotoren wird durch die Stromwendung, die Ankerumfangsgeschwindigkeit und vor allem durch die Erwärmung begrenzt. Die Wärme entsteht durch die Ohmschen Verluste in den Wicklungen, den Übergangswiderstand und die Reibung zwischen Bürsten und Kommutator und die durch Wirbelströme erzeugten Eisenverluste in Ständer und Läufer. Diese Verluste nehmen etwa quadratisch mit dem Belastungsstrom und außerdem mit der Drehzahl und damit auch mit der Spannung zu. Die Höhe der zulässigen Erwärmung hängt von der Art des verwendeten Isoliermaterials ab. Die Grenztemperatur für die Erwärmung der Wicklungen des Ankers und des Ständers sowie des Kommutators sind für die verschiedenen Isolierstoffe in den Regeln für elektrische Maschinen und Transformatoren auf Bahn- und anderen Fahrzeugen durch VDE 0535 des Vorschriftenwerkes Deutscher Elektrotechniker im einzelnen genau festgelegt.
Da durch die Drehung des Ankers und die dadurch bedingte Luftwirbelung jeder Motor eine gewisse Wärmemenge an die umgebende Luft abführt, brauchen kleine Motoren keine besondere Kühleinrichtung. Große, leistungsfähige Fahrmotoren müssen jedoch stets künstlich gekühlt werden, und zwar unterscheidet man die Eigenlüftung, bei der der Anker, gegebenenfalls in Verbindung mit einem Lüfterrad, selbst als Lüfter dient und die Luft durch den Motor saugt, und die Fremdlüftung. Bei dieser werden besondere Gebläse verwendet, die von Hilfsmotoren angetrieben werden und die Luft durch den Fahrmotor hindurchdrücken. Die Lüfter stehen dann mit ihren Antriebsmotoren im Maschinenraum und führen den einzelnen Fahrmotoren die Kühlluft durch Blechkanäle zu. Der Luftstrom wird im Motor durch besondere Kühlkanäle so geleitet, daß er den Ständer, den Läufer und vor allem den Kommutator bestreicht (Bild 176). Dabei ist besonders darauf zu achten, daß die Kühlluft an der Kommutatorseite austritt, damit der Kohlenstaub der Bürsten nicht in den Motor hineingeblasen wird.
Die Kühlluft soll trocken und möglichst sauber sein, d. h.. sie darf kein Öl und keinen Bremsstaub enthalten, um die Wicklungen und den Kommutator nicht zu beschädigen. Sie wird daher im allgemeinen dem Maschinenraum entnommen und von außen durch jalousieartige Lüftungsschlitze angesaugt. Diese liegen meist im oberen Teil der Seitenwände und sind mit feinmaschigem Drahtgeflecht abgedeckt, um das Ansaugen von Bremsstaub, Schnee, Laub usw. zu verhindern. Die erforderliche Luftmenge ist recht beachtlich und beträgt pro Fahrmotor im Sommer etwa 3 m^3/s bei einem statischen Gegendruck von etwa 200 mm WS. Bei niedrigeren Außentemperaturen genügt eine geringere Luftmenge, und es ist dann üblich, den Lüftermotor mit Hilfe des Sommer-Winterschalters an eine geringere Spannung zu legen (siehe Abschnitt 3.72).

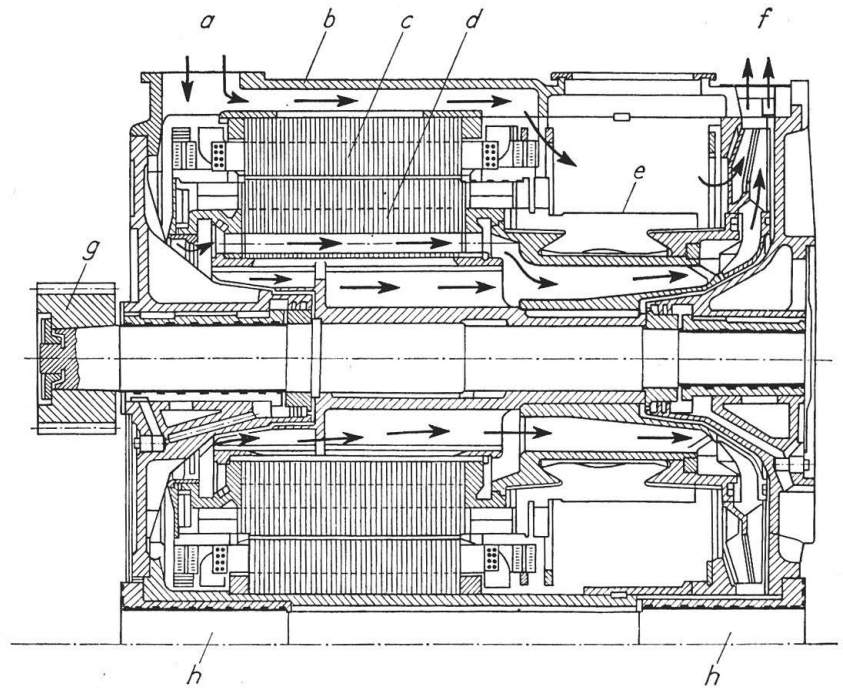


Bild 176. Weg der Kühlluft im Motor
a Lufteintritt b Gehäuse c Ständer d Läufer e Kommutator f Luftaustritt g Ritzel h Tatzlager

3.54 Betriebsverhalten

Aus den vorstehenden Ausführungen geht hervor, daß die Leistung einer elektrischen Lokomotive hauptsächlich von der Erwärmung der Fahrmotoren abhängt. Hierbei ist es jedoch wichtig, ob die Lokomotive nur kurzfristig oder längere Zeit sehr stark belastet wird. Man unterscheidet daher zwischen der Dauerleistung, der Stundenleistung und der Anfahrleistung. Die einzelnen Kennlinien sind aus dem Leistungsschaubild (Bild 177) zu ersehen, in dem für die elektrischen Lokomotiven der Baureihe E 04 die einzelnen Leistungen in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit dargestellt sind.

Der größte Belastungsstrom, mit dem ein Fahrmotor bei einer bestimmten Drehzahl dauernd betrieben werden kann, ohne daß seine Grenztemperaturen überschritten werden, bezeichnet man als den Dauerstrom, die ihm entsprechende Leistung als Dauerleistung (Kurve a). Dabei beträgt die für den Stromwender zulässige Temperatur etwa 95 °C und die Höchsttemperatur der Wicklungen je nach Güte der Isolation ungefähr 125 °C. Da die Verluste bei gleichbleibendem Strom mit der Drehzahl zunehmen, ist auch der Dauerstrom um so geringer, je höher die Drehzahl ist. Die Dauerleistung steigt also nur im unteren Drehzahlbereich annähernd linear an und weicht dann bei etwa 60···70 % der Höchstgeschwindigkeit infolge der anwachsenden Eisenverluste von der Geraden ab. In

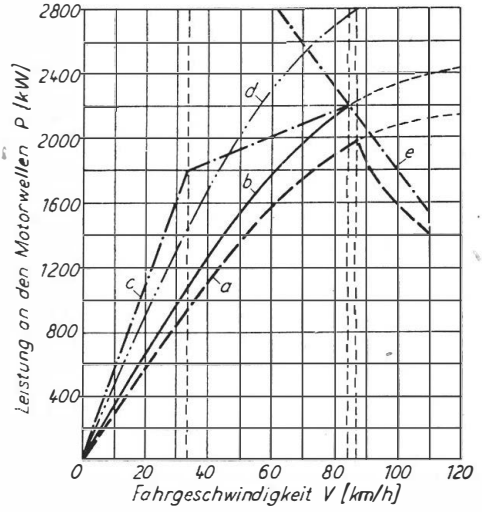


Bild 177
Leistungskennlinien einer elektrischen Lokomotive (Baureihe E 04)

a Dauerleistung
b Stundenleistung
c Anfahrleistung
d Haftwertgrenzleistung
e Kommutierungsgrenze

der höchsten Spannungsstufe fällt die Leistung entsprechend der natürlichen Charakteristik des Reihenschlußmotors hyperbolisch ab. Es gilt:

$$M = P_D \cdot n$$

Dabei ist M = Motordrehmoment in mkp
P_D = Dauerleistung in kW
n = Drehzahl des Motors in V/min

Der Motor erreicht bei ununterbrochenem Betrieb mit seiner Dauerleistung nach etwa 2 Stunden seine zulässige Höchsttemperatur. Die Wärmeerzeugung entspricht in diesem Fall der Wärmeabfuhr.

Ist jedoch beabsichtigt, den Motor nicht länger als eine Stunde gleichmäßig stark zu belasten, kann der zulässige Strom noch etwas größer sein. Erreicht der anfangs kalte Motor nach einer Stunde seine zulässige Grenzerwärmung, so bezeichnet man diese Leistung als Stundenleistung (Kurve b). Sie liegt bei älteren elektrischen Lokomotiven im hohen Geschwindigkeitsbereich etwa 15···20 % über der Dauerleistung.

Um bei schweren Anfahrten noch größere Leistungen aus den Fahrmotoren herausholen zu können, darf für kurze Zeit, d. h. etwa 5 Minuten, mit der sogenannten Anfahrleistung (Kurve c) gefahren werden. Diese liegt bei älteren Lokomotiven im unteren Geschwindigkeitsbereich 80···100 % über der Dauerleistung. Bei neuentwickelten Fahrmotoren gelang es durch konstruktive Verbesserungen, wie z. B. Leichtbau, hochwertiges Isoliermaterial, verbesserte Luftkühlung usw., ohne Erhöhung der Masse und Vergrößerung des Platzbedarfs die Dauerleistung beträchtlich zu steigern. Aus diesem Grunde liegen die Stundenleistung dann nur 5···10 % und die Anfahrleistung etwa 40···60 % über der Dauerleistung.

Es wäre zwecklos, die Leistung einer elektrischen Lokomotive bei niedrigen Geschwindigkeiten, z. B. durch Einbau stärkerer Motoren, noch weiter zu steigern. Die größte Zugkraft

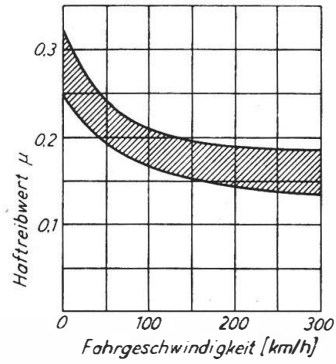


Bild 178
Haftwert zwischen Rad und Schiene

hängt nämlich nicht nur von der installierten Maschinenleistung ab, sondern auch von der Haftreibung zwischen Rad und Schiene. Diese wird bestimmt durch die Reibungslast der elektrischen Lokomotive und den Haftwert μ, der mit Rücksicht auf die gleichförmige Zugkraft am Zughaken bei trockenen Schienen mit etwa 0,3, also höher als bei Dampflokomotiven, angenommen werden darf (Bild 178). Dieser Wert fällt mit zunehmender Geschwindigkeit, aber auch bei öligen, vereisten oder mit feuchtem Laub bedeckten Schienen stark ab und kann Werte von etwa 0,1 erreichen. In diesem Falle ist es dann erforderlich, durch Sandstreuen die Haftreibung zu verbessern. Es kommt dann lediglich auf die Güte der Steuerung an, die Haftwertgrenzleistung (Kurve d) auch tatsächlich auszunutzen.

Bei hohen Strömen und großen Geschwindigkeiten wird jedoch die Kommutierung bei Einphasen-Wechselstromlokomotiven recht schwierig. Es entstehen kräftige Lichtbögen, die einzelnen Lamellen des Kommutators werden stark erwärmt und evtl. beschädigt, und es ist nicht ratsam, diese „Kommutierungsgrenze" zu überschreiten (Kurve e). Ist also in der höchsten Fahrstufe die größte Klemmenspannung erreicht, so läßt sich die Leistung nicht weiter steigern. Ihr weiterer Verlauf entspricht der bekannten Charakteristik eines Reihenschlußmotors.

Für das Betriebsverhalten einer elektrischen Lokomotive ist auch die Größe der Zugkraft am Zughaken in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit von großer Bedeutung. Sie läßt sich nach der bekannten Formel

$$Z = \frac{P \cdot 367}{V}$$

leicht errechnen, wobei die Zugkraft Z in kp, die Leistung P in kW und die Fahrgeschwindigkeit V in km/h eingesetzt werden.

In Bild 179 sind die Zugkraftkennlinien für die gleiche Lokomotivtype (Baureihe E 04) zusammengestellt. Daraus geht hervor, daß im unteren Geschwindigkeitsbereich die größte Zugkraft nicht von der Anfahrleistung abhängt, sondern der Reibungszugkraft Z_R entspricht, die sich aus

$$Z_R = G_R \cdot \mu$$

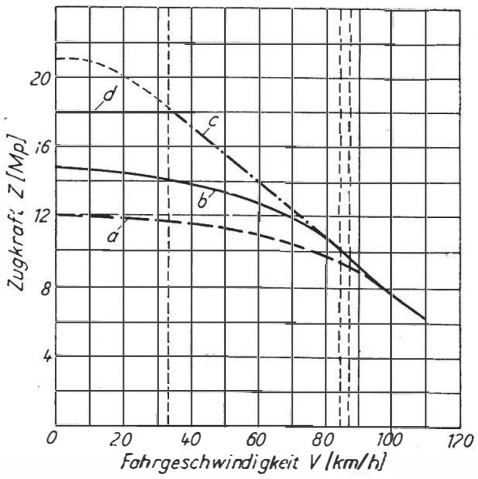


Bild 179
Zugkraftkennlinien einer elektrischen Lokomotive (Baureihe E 04)

a Dauerzugkraft
b Stundenzugkraft
c Anfahrzugkraft
d Haftwertgrenze

errechnen läßt. Dabei werden die Reibungszugkraft Z_R und die Reibungslast G_R in kp eingesetzt.

Da die Fahrmotoren stark überlastbar sind, braucht bei elektrischen Lokomotiven die Dauerzugkraft nicht der Reibungskraft zu entsprechen, zumal man bei Anwendung des Sandstreuers mit der Anfahrzugkraft in der Lage ist, bis zu verhältnismäßig hohen Geschwindigkeiten hinaus an der Reibungsgrenze zu fahren. Im elektrischen Bahnbetrieb gilt die Stundenleistung eines Fahrmotors als seine Nennleistung, und sie wird neben der Anfahrleistung zur Fahrzeitermittlung und Aufstellung der s,V-Diagramme herangezogen. Um eine noch bessere Ausnutzung der elektrischen Lokomotiven zu gewährleisten, sollen neuerdings auch die Kennlinien der 10-min-, 20-min- und 40-min-Leistung ermittelt werden.

3.6 Elektrische Bremsen

Mechanische Bremsen haben einen starken Verschleiß an Bremsklötzen und Radreifen zur Folge. Bei lang anhaltenden Bremsungen können die Radreifen infolge der starken Erwärmung leicht locker werden. Außerdem führt der metallene Bremsstaub bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen leicht zu Überschlägen. Daß es sich auf Strecken mit starkem Verkehr und dichten Haltestellenabständen um ganz erhebliche Mengen Bremsstaub handelt, beweist die Tatsache, daß allein auf dem Gebiet der Berliner S-Bahn pro Jahr 3000 t Bremsstaub entstehen. Aus diesem Grunde ist es zweckmäßig, die auf starken und lang anhaltenden Gefällestrecken verkehrenden elektrischen Lokomotiven zusätzlich mit einer elektrischen Bremse auszurüsten.

3.61 Widerstandsbremse

Die elektrische Bremse ist von der mechanischen Bremse völlig unabhängig. Sie beruht darauf, daß die Fahrmotoren nach einer entsprechenden Umschaltung als Generatoren laufen und, wenn sie durch die Achsen angetrieben und ihre Feldmagnete erregt werden,

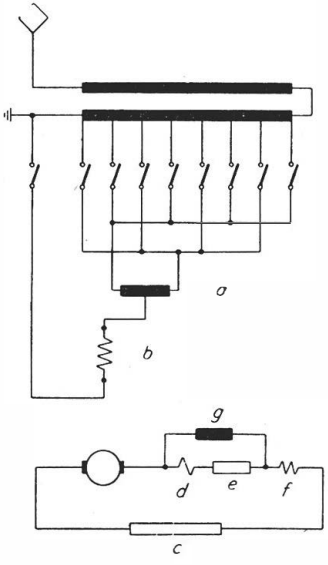


Bild 180
Widerstandsbremsung mit Feldregelung

a Stromteiler
b Erregerwicklung
c Bremswiderstand
d Wendepolwicklung
e Ohmscher Widerstand
f Kompensationswicklung
g Drosselspule

eine elektrische Leistung abgeben. Um mit einfachen Schaltungen auszukommen, wird die erzeugte elektrische Leistung im allgemeinen in Bremswiderständen in Wärme umgesetzt und dadurch vernichtet. Man bezeichnet dies als Widerstands- oder Kurzschlußbremsung. Die Spannung hängt von der Drehzahl und der Stärke des Magnetfeldes ab.

Da jedoch bei Wechselstromlokomotiven der Aufbau des Feldes durch den remanenten Magnetismus völlig unbestimmt ist, läßt sich eine betriebssichere Widerstandsbremsung nur mit Hilfe der Fremderregung verwirklichen. Die einfachste Art der Fremderregung ist dadurch gegeben, daß man die Feldwicklung des Motors durch den Hauptumspanner speist (Bild 180). Wird der Stromkreis des Motors in irgendeiner Weise geschlossen, so fließt durch die Ankerwicklung ein Strom. Dieser wird um so größer, je mehr die vom Anker erzeugte Spannung zunimmt und je kleiner der Widerstand des Stromkreises wird. Die dabei abgegebene elektrische Leistung ist proportional dem Produkt aus Ankerspannung und Ankerstrom. Durch das Zusammenwirken zwischen Ankerstrom und Magnetfeld entsteht ein Drehmoment, das der Drehung des Ankers entgegenwirkt, d. h., die Lokomotive wird gebremst.

Die durch elektrische Bremsung erzeugte Energie ist abhängig von der Zugmasse und der Größe und Länge des Gefälles. Sie beträgt etwa ⅔ von der Leistung, die derselbe Zug bei Bergfahrt auf derselben Strecke verbrauchen würde. Da sich bei elektrischer Bremsung die Fahrmotoren und der Trafo auch bei Talfahrt stark erwärmen, sind zusätzliche Kühleinrichtungen erforderlich. Auch die Bremswiderstände sind verhältnismäßig schwer und erfordern viel Platz, so daß ihre Unterbringung häufig große Schwierigkeiten bereitet. Auch darf nicht übersehen werden, daß durch elektrische Bremsung nur das Triebfahrzeug, aber nicht der Zug abgebremst werden kann, so daß die Bremswirkung letzten Endes durch die Reibungslast der Lokomotive begrenzt wird.

Außerdem ist es nicht zweckmäßig, lange Züge bei Talfahrt nur durch die voranfahrende Lokomotive abzubremsen, weil die Gefahr besteht, daß in starken Krümmungen die Wagen seitlich aus dem Gleis gedrückt werden. Man kommt also auf starken Gefällestrecken mit der elektrischen Bremse allein nicht aus und muß stets zusätzlich die durchgehende und bei Zugtrennungen selbsttätig wirkende Druckluftbremse verwenden. Da die Strecken der Deutschen Reichsbahn nur wenig starke und lang anhaltende Steigungen bzw. Gefälle aufweisen, wurden nur einige elektrische Lokomotiven der Baureihen E 19, E 44, E 45, E 94 und E 95 mit Widerstandsbremse ausgerüstet. Auch die Neubaulokomotiven der Deutschen Bundesbahn Baureihen E 101 und E 50 sind mit entsprechenden Bremseinrichtungen versehen.

3.62 Nutzbremse

Während bei der Widerstandsbremse die erzeugte Energie ungenutzt verlorengeht, gibt es auch Bremsschaltungen, bei denen die Ankerstromkreise der Fahrmotoren einerseits über den Trafo der elektrischen Lokomotive an die Fahrleitung angeschlossen und andererseits geerdet werden. Der erzeugte Strom wird also in das Netz zurückgespeist und kann von anderen Triebfahrzeugen verbraucht werden. Die Nutzbremsung wird jedoch nur dann wirksam, wenn die ins Netz zurückgespeiste Energie einem Verbraucher in ausreichender Nähe der Einspeisungsstelle sofort wieder zugeführt werden kann. Da der Steuerbereich der Nutzbremsung beschränkt ist, wird diese im allgemeinen nur als Gefällebremse zum Abbremsen ganzer Züge verwendet. Im Gegensatz zum Asynchron-Bahnmotor, der ohne weiteres zu Nutzbremsung herangezogen werden kann, ist der Reihenschlußmotor für diesen Zweck nicht recht geeignet, da er unstabil arbeitet und daher stets fremd erregt werden muß. Die komplizierte Schaltung und die zusätzlichen Einrichtungen verteuern die Anschaffung und erschweren die Unterhaltung, so daß man bei den Einphasenwechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn auf Nutzbremsung verzichtete.

3.7 Hilfseinrichtungen

Die bisher beschriebene Ausrüstung der elektrischen Lokomotive diente ausschließlich der Zugkrafterzeugung und ihrer Steuerung. Darüber hinaus sind jedoch noch einige Hilfseinrichtungen erforderlich, um das störungsfreie Arbeiten der vorgenannten Teile zu gewährleisten, die Betriebssicherheit zu erhöhen oder den Lokomotivbetrieb zu erleichtern.

3.71 Stromversorgung der Hilfsbetriebe

Die meisten Hilfseinrichtungen haben elektrischen Antrieb und arbeiten mit Wechselstrom, der einer 200-V-Anzapfung des Trafos entnommen wird. Die Zugheizung wird mit einer wesentlich höheren Spannung von etwa 800···1000 V gespeist. Nur die Beleuchtung und gegebenenfalls ein Teil der Steuerung werden mit Gleichstrom von 24 V betrieben. Dieser wird einer Batterie entnommen, die ebenfalls aus der 200-V-Anzapfung des Trafos über einen Trockengleichrichter gespeist wird. Bei Spannungsschwankungen im Fahrdraht (12,3···18,0 kV) schwankt also auch die Spannung der Hilfsbetriebe, was sich meist ungünstig auswirkt.

Um durch Standardisierung die Herstellung und Unterhaltung elektrischer Triebfahrzeuge zu vereinfachen, wurde auf einer im Jahre 1958 in Warschau durchgeführten Tagung der

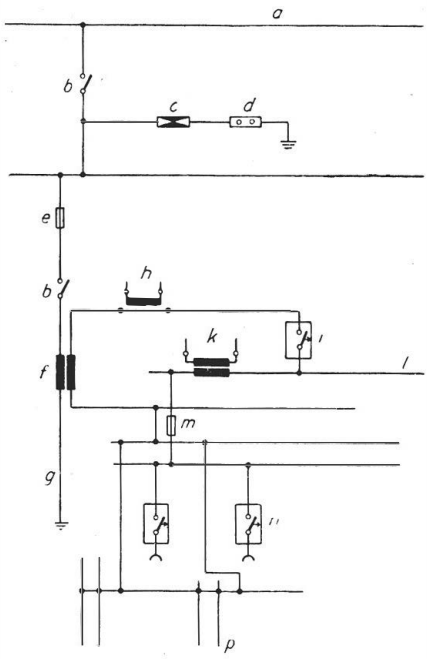


Bild 181
Prinzipschaltbild einer Schuppenprüfanlage

a Fahrleitung 15 kV
b Trennschalter
c Überspannungsableiter
d Funkenstrecke
e Sicherung 10 A
f Trafo
g Erdrückleitung 1 kV isoliert
h Meßstromwandler
i Überstromschalter 7000 A
k Meßspannungswandler
l Sammelschiene 220 V
m Sicherung 600 A träge
n Überstromschalter
o Schuppensteckdose
p Schuppengleise

OSShD für alle elektrischen Neubautriebfahrzeuge eine einheitliche Steuerspannung von 110 V Gleichstrom festgelegt.

Die Hilfseinrichtungen und insbesondere die Steuerung müssen geprüft werden können, auch wenn die Lokomotive im Schuppen steht und dort aus Sicherheitsgründen keine Fahrleitung vorhanden ist. Zu diesem Zweck sind in den Werkstätten Anschlüsse für 200 V Wechselstrom mit einer Frequenz von 16⅔ Hz vorhanden. Bild 181 zeigt das Prinzipschaltbild einer Schuppenprüfanlage. Die elektrischen Lokomotiven sind dann an beiden Längsseiten mit Steckdosen versehen und außerdem mit einem Prüfumschalter ausgerüstet, der vor dem Anschließen der Hilfseinrichtungen an die Schuppensteckdose den Trafo abschaltet. Dieser würde sonst über seine Sekundärwicklung mitgespeist werden und in der Primärwicklung eine hohe Spannung erzeugen, die das Personal gefährdet und eine Erprobung der Steuerung unmöglich macht. Der Prüfumschalter hat zwei Betriebsstellungen und verbindet in der Stellung „Fahrt" (oder „Strecke") die Hilfseinrichtung mit dem Trafo, in der Stellung „Prüfen" (oder „Schuppen") dagegen mit den Steckdosen der Schuppenprüfanlage. In der Mittelstellung des Umschalters sind die Hilfsstromkreise sowohl vom Trafo als auch von den Prüfdosen abgeschaltet. Unmittelbar hinter den Prüfumschaltern verzweigt sich dann die Zuleitung und führt über Steuerstromsicherungen oder Automaten zu den einzelnen Hilfseinrichtungen. Dadurch erreicht man, daß evtl. Störungen auf den schadhaften Stromkreis beschränkt bleiben.

3.72 Lüfter

Zur Kühlung der Fahrmotoren und des Trafos bzw. des Trafoöles wird Kühlluft verwendet, die durch radiale oder neuerdings auch axiale Kreiselrad- oder Schleuderlüfter erzeugt

wird. Diese werden durch einen besonderen Lüftermotor angetrieben und saugen mit Hilfe eines leichten Schaufelrades die Luft aus dem Maschinenraum an und drücken sie durch die Luftkanäle der Fahrmotoren bzw. durch den Ölkühler der Trafos hindurch. Um mit kurzen Zuleitungen auszukommen, werden die Lüfter in unmittelbarer Nähe dieser Teile angeordnet.

Je nach dem Luftbedarf der einzelnen Anlagen werden auch manchmal zwei Fahrmotoren durch nur einen Lüfter mit Kühlluft versorgt oder zwei Lüfter gemeinsam an einen Lüftermotor angeschlossen (Bild 182). Für den Antrieb verwendet man meist Einphasen-Reihenschlußmotoren, die ähnlich wie die Fahrmotoren aufgebaut sind. Da ihre Leistung jedoch nur etwa 5···20 kW beträgt, wird im allgemeinen auf die Wendepolwiderstände verzichtet. Kleinere Lüftermotoren können beim Einschalten unmittelbar an die 200-V-Anzapfungen des Trafos angeschlossen werden. Um bei großen Leistungen starke Stromstöße zu vermeiden, verwendet man beim Einschalten Anlaßwiderstände und Lüfterschütze, die durch einfache Handschalter oder Kontakte an den Fahrschaltern ein- und ausgeschaltet werden (Bild 183). Auf diese Weise ist es auch möglich, während der Rangierarbeiten, bei denen die Erwärmung der Motoren gering ist, die Lüfter abzuschalten, um durch das Geräusch der Lüfter die Aufnahme der akustischen Rangiersignale nicht zu erschweren. Für den Fall, daß der Lokomotivführer das Einschalten vergißt, schalten sämtliche Lüfter bei einer bestimmten Fahrstufe selbsttätig ein, unabhängig davon, ob der Handschalter eingelegt ist oder nicht.

Bei niedrigen Außentemperaturen kann die Luftmenge, die im Sommer je Fahrmotor etwa 3 m^3/s beträgt, wesentlich eingeschränkt werden, um eine Unterkühlung des Maschinenraumes und gegebenenfalls auch das Ansaugen von Schnee zu vermeiden. Man erreicht dies durch die Sommer-Winterschaltung, die darauf beruht, daß man die Lüftermotoren an eine niedrigere Spannung legt (100···125 V) oder mehrere Motoren, die im Sommer

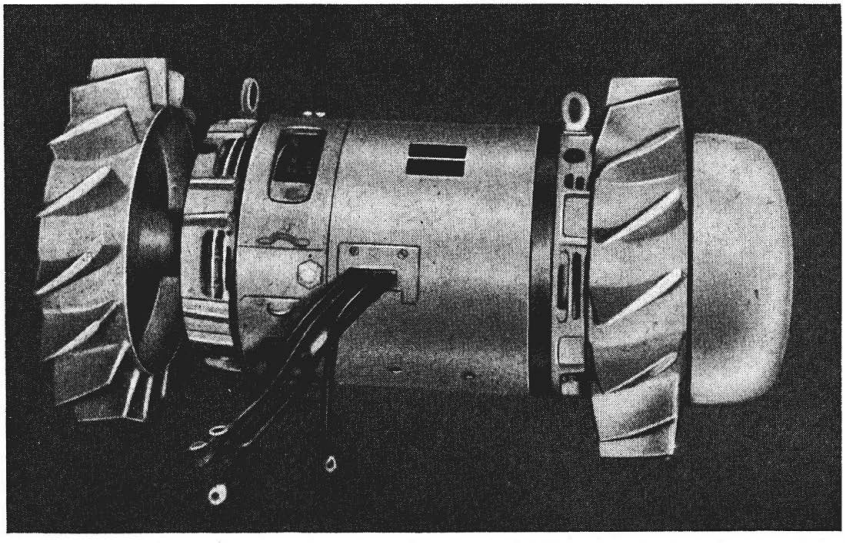


Bild 182. Lüftermotor mit zwei Lüfterrädern

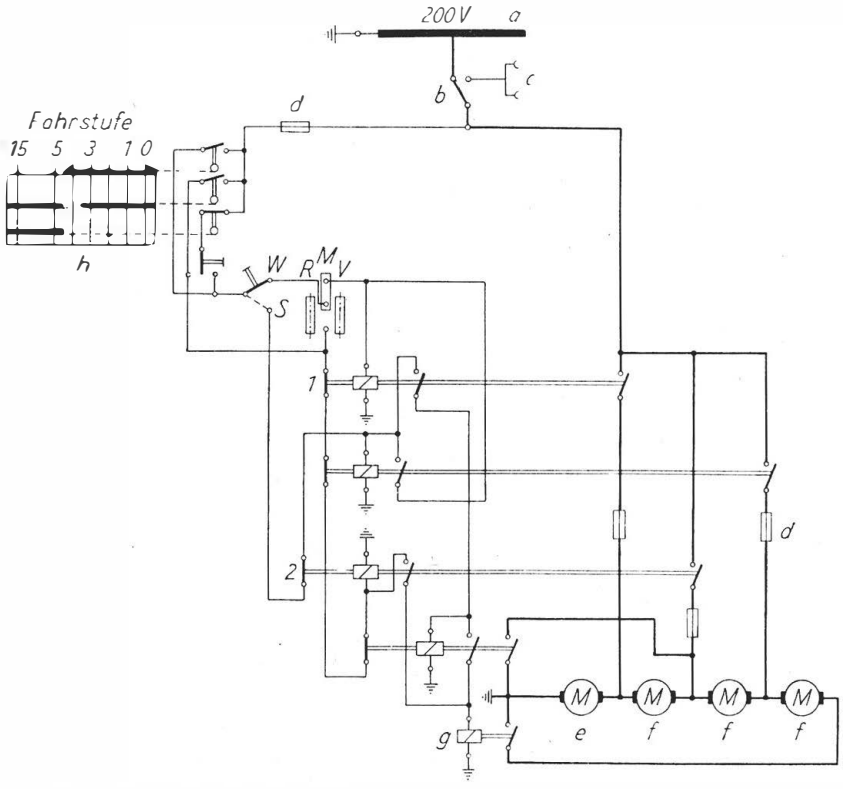


Bild 183. Schaltung eines Lüftermotors

a Umspanner
b Prüfumschalter
c Prüfdose
d Sicherung
e Lüftermotor für Trafo
f Lüftermotor für Fahrmotor
g elektromagnetisch betätigtes Schütz
h Fahrschalter
W Winterschaltung
S Sommerschaltung
R Rückwärtsfahrt
M Mittelstellung
V Vorwärtsfahrt
1 Schütz 1
2 Schütz 2

parallelgeschaltet sind, im Winter hintereinander an die 200-V-Anzapfung anschließt. Will man im Winter den Maschinenraum anwärmen, so kann man durch Umstellen der Lüfterklappen die warme Luft anstatt ins Freie in den Maschinenraum strömen lassen.

3.73 Ölpumpe

Die in einem Trafo entstehende Wärme wird am einfachsten dadurch abgeführt, daß man den Eisenkern und sämtliche Wicklungen ständig mit Öl umspült und das erwärmte Öl in besonderen Kühlrohren wieder auf seine Ausgangstemperatur zurückkühlt (siehe Abschnitt 3.24). Zu diesem ständigen Umwälzen ist eine Ölpumpe erforderlich, die meist als einstufige Kreiselpumpe ausgeführt ist und etwa 500···1000 l Öl/min gegen 6···8 m WS fördert. Die Ölpumpe ist im allgemeinen eine senkrecht stehende, einstufige Kreiselpumpe, die durch ein Eisengestell mit dem Kessel des Umspanners verbunden ist. Sie wird durch einen Reihenschlußmotor angetrieben, der mit etwa 2000 U/min umläuft und etwa 1,5···4,0 kW

leistet. Er ist unter Vorschalten einer Sicherung unmittelbar an die 200-V-Anzapfung des Trafos angeschlossen und läuft deshalb dauernd, solange die elektrische Lokomotive unter Spannung steht. Bei einigen älteren elektrischen Lokomotiven wird er, ähnlich wie der Lüftermotor, durch Handschalter oder ein elektropneumatisches oder elektromagnetisches Schütz nach Bedarf ein- und ausgeschaltet.

Bei neueren elektrischen Lokomotiven wird für den Antrieb der Ölpumpe anstelle eines Reihenschlußmotors ein Einphasen-Asynchronmotor verwendet. Da Kommutator und Bürsten wegfallen, ist sein Aufbau wesentlich einfacher, und auch die Erhaltungsarbeiten im Betrieb werden geringer. Nachteilig ist jedoch, daß die Drehzahl des Asynchronmotors wegen der geringen Periodenzahl des Bahnstromes trotz zweipoliger Ausführung nur knapp 1000 U/min beträgt und sowohl der Motor als auch die Ölpumpe dadurch wesentlich größer und schwerer werden.

3.74 Drucklufterzeugung

Die gesamte von der elektrischen Lokomotive benötigte Druckluft wird durch eine Luftpumpe erzeugt, und zwar bei den Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn einheitlich durch eine Kolbenluftpumpe. Diese ist stets zweistufig und fördert stündlich etwa 100 m^3 Luft gegen 8···10 at. Als Antrieb dient ein Einphasen-Reihenschlußmotor von etwa 15 kW bei 200 V, der mit der Pumpe zu einem Aggregat zusammengebaut ist. Da die Drehzahl des Motors jedoch wesentlich höher liegt als die der Kolbenpumpe, ist es erforderlich, ein Zahnradgetriebe einzuschalten. Die Kolbenverdichter haben vier in einer Reihe stehende Zylinder, von denen die beiden Niederdruckzylinder die Luft auf 1,9 at, die Hochdruckzylinder auf 8 at verdichten. Dabei erhitzt sich die Luft stark, und es ist zweckmäßig, sie beim Übergang von der ersten zur zweiten Stufe durch einen Zwischenkühler zu leiten. Dieser besteht aus Rohrschlangen und wird vom Fahrtwind oder durch einen besonderen Lüfter gekühlt.

Die vom Kompressor verdichtete Luft enthält Wasser und Öl, die zunächst in einem Ölabscheider zurückgehalten werden. Dann wird die Druckluft über ein Rückschlagventil den Haupt- und Sonderluftbehältern zugeleitet. Diese sollen den stark schwankenden Bedarf an Druckluft ausgleichen und haben ein Fassungsvermögen von etwa 500···1000 l.

Mit den Luftbehältern steht ein Pumpenselbstschalter in Verbindung, der meist als Membrandruckregler ausgebildet ist. Ein Kontakt wird geöffnet, sobald der Druck 8 at erreicht und wird selbsttätig wieder geschlossen, sobald der Druck unter 6,5 at gesunken ist. Die Regelung erfolgt also völlig selbsttätig, sobald der Lokomotivführer auf einem Führerstand den Pumpenschalter einlegt (Bild 184). Das Schütz für den Luftpumpenmotor ist meist als Druckluft-Anlaßschütz ausgebildet und besitzt zwei Kontakte, die nacheinander schließen. Das heißt, der Motor wird zunächst über einen Anlaßwiderstand mit der 200-V-Anzapfung verbunden und erhält erst bei einer bestimmten Drehzahl seine volle Spannung.

Die erzeugte Druckluft dient zur Betätigung folgender Einrichtungen:

1. Druckluftbremse,
2. Leistungssteuerung, sofern sie nicht ausschließlich auf elektrischem Wege erfolgt,
3. Stromabnehmer,
4. Hauptschalter,
5. Fahrtwender,
6. Sandstreuer,
7. Luftpfeife,
8. Achslastausgleich und
9. Sicherheitsfahrschaltung.

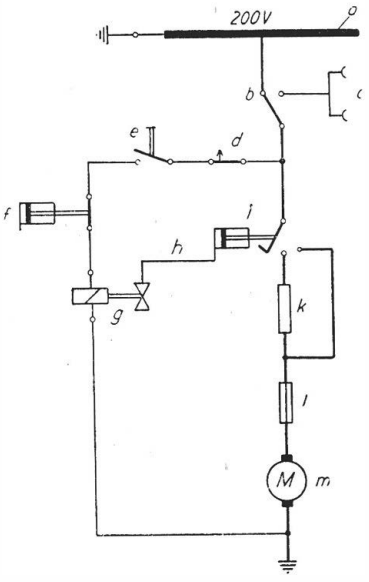


Bild 184. Schaltplan der Luftpumpe

a Umspanner
b Prüfumschalter
c Prüfdose
d Überstromauslöser
e Handschalter
f Druckwächter
g elektromagnetisch betätigtes Ventil
h Luftleitung
i Druckluftschütz
k Widerstand
l Sicherung
m Pumpenmotor

3.75 Beleuchtung

Einige Hilfseinrichtungen der Lokomotiven, wie z. B. die gesamte Beleuchtung, die Sicherheitsfahrschaltung und die damit verbundene Auslösung des Hauptschalters müssen auch dann betriebsbereit sein, wenn die Stromabnehmer gesenkt sind oder die Fahrdrahtspannung aus irgendeinem Grunde wegbleibt. Für diesen Zweck ist jede elektrische Lokomotive mit einer Gleichstromanlage und mit einer Batterie ausgerüstet. Die Gleichspannung beträgt einheitlich 24 V und wurde deshalb so niedrig gewählt, um die gleichen Glühlampen wie für die Wagenbeleuchtung verwenden zu können, die mit ihren verhältnismäßig dicken Glühdrähten gegen die unvermeidlichen Erschütterungen des Fahrzeuges weniger empfindlich sind als Glühlampen für eine höhere Spannung. Außerdem besteht dann auch die Möglichkeit, die Lampen mit Wechselstrom von nur 16⅔ Hz zu speisen, da dickfädige Glühlampen infolge ihrer Wärmeträgheit bei geringer Periodenzahl weniger flimmern.

Zum Aufladen der Batterie wird entweder ein kleiner Lichtgenerator oder ein Trockengleichrichter verwendet. Solange diese Spannung liefern, speisen sie die elektrischen Beleuchtungs- und Hilfseinrichtungen direkt und laden zugleich die Batterie auf. Ist jedoch der Trafo spannungslos, so übernimmt die Batterie die Stromversorgung und wird dabei entladen.

Der Lichtgenerator ist eine kleine Gleichstrom-Nebenschlußmaschine von etwa 1···2 kW Leistung, die, wenn sie nicht mit einem Lüfter gekuppelt ist, von einem kleinen Wechselstrom-Reihenschlußmotor, neuerdings auch von einem Einphasen-Asynchronmotor, angetrieben wird. Dieser ist ohne Anlaßwiderstand an die 200-V-Spannung angeschlossen und wird durch einen einfachen Handschalter auf den Führerständen eingeschaltet. Der

mit ihm gekuppelte Gleichstromgenerator wird mit Hilfe eines selbsttätigen Ladereglers geregelt.

Um die Batterie während des Betriebes, d. h., solange der Trafo unter Spannung steht, zu entlasten, werden die Lampen auch häufig noch mit Wechselstrom von 24 V Spannung gespeist. Für diesen Zweck wird dann im Maschinenraum noch ein Hilfstrafo mit einer Leistung von 0,5···1,0 kVA aufgestellt. Das Umschalten von Batterie auf Trafo geschieht durch einen selbsttätigen Lichtumschalter.

Wesentlich einfacher ist jedoch das Aufladen der Batterie durch Gleichrichter, die viel leichter sind, weniger Platz beanspruchen und mit geringeren Unterhaltungskosten auskommen. Auch in diesem Falle ist wieder ein kleiner, primärseitig mit 200 V Wechselstrom gespeister Einphasen-Trockenumspanner vorhanden (Bild 185). Zur Ladeeinrichtung gehören dann außerdem noch ein oder mehrere Trockengleichrichter, die die negativen Halbwellen des Wechselstromes unterdrücken und nur die positiven Halbwellen der Batterie zufließen lassen.

An die Gleichstromanlage sind die Deckenlampen in den Führerständen und im Maschinenraum, die Instrumentenleuchten und die Leselampe für den Begleiter oder Zugführer angeschlossen. Auch die Signallaternen über den Puffern gehören hierzu, die entweder zwei Glühlampen verschiedener Lichtstärke enthalten oder mittels eines Abblendschalters in jedem Führerstand auf volle oder durch Vorschalten eines Widerstandes auf verminderte Lichtstärke eingestellt werden können. Neue elektrische Lokomotiven haben zusätzlich noch eine obere Signallaterne.

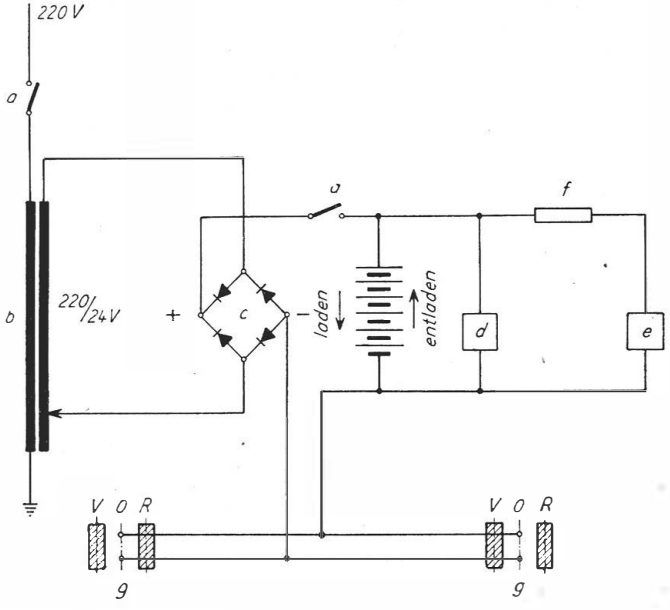


Bild 185. Stromversorgung der Beleuchtung

a Kleinselbstschalter
b Hilfsumspanner
c Gleichrichter
d Lichtschalttafel vorn
e Lichtschalttafel hinten
f Lampen
g Fahrtwendekontakte

Im Maschinenraum und an den Außenseiten der Lokomotiven sind noch mehrere Steckdosen für Handlampen vorgesehen. Außerdem sind noch die Fensterwischer an die Gleichstromanlage angeschlossen, sofern sie nicht durch Druckluft bedient werden, während die Klarsichtscheiben im allgemeinen mit Wechselstrom betrieben werden, um die Gleichrichter und die Batterie zu entlasten. Sämtliche Lampen und Geräte werden durch Kippschalter bedient und sind durch Automaten einzeln gesichert, die auf den Führerständen in besonderen Schalttafeln zusammengefaßt sind.

3.76 Heizung

Um die Führerstände der elektrischen Lokomotiven im Winter zu erwärmen, ist jeder Führerstand mit zwei elektrischen Heizkörpern ausgerüstet, von denen der eine als Wärmeschrank ausgeführt ist und zugleich zum Wärmen von Speisen verwendet werden kann. Die Heizöfen sind über Kippschalter an die 200-V-Anzapfung des Hauptumschalters angeschlossen.

Auch sämtliche Reisezugwagen, die auf elektrisch betriebenen Strecken verkehren, müssen mit elektrischen Heizeinrichtungen ausgerüstet sein, wenn man nicht das unwirtschaftliche Mitführen von Heizkesselwagen in Kauf nehmen will. Die elektrischen Heizkörper in den einzelnen Abteilen haben eine Leistung von 500···1500 W und können durch die Fahrgäste oder auch automatisch geregelt werden. Sämtliche Heizkörper eines Wagens sind über einen gemeinsamen Hauptschalter und eine Hauptsicherung an die durchgehende Zugheizleitung angeschlossen. Da die Heizleistung eines vierachsigen Reisezugwagens im Mittel etwa 20···24 kW beträgt, ergibt sich für einen ausgelasteten Zug ein Leistungsbedarf von etwa 300···400 kW. Um allzu große Querschnitte für die Leitungen und hohe Verluste zu vermeiden, werden hohe Spannungen verwendet. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, den Heizstrom der 800- bzw. 1000-V-Anzapfung des Lokomotivumspanners zu entnehmen. Die Rückleitung des Heizstromes erfolgt über die Drehgestelle der Wagen und die Schienen zur geerdeten Klemme des Trafos. Als Heizschütze werden meist elektromagnetische, seltener elektropneumatische Schütze verwendet, die von den Führerständen aus durch Handschalter oder Schaltwalzen bedient werden. Sind bei verschiedenen Spannungen zwei Schütze vorhanden, so sind diese gegenseitig durch Ruhekontakte elektrisch verriegelt, um zu vermeiden, daß sie gleichzeitig eingeschaltet werden können und dadurch einen Kurzschluß im Trafo hervorrufen (Bild 186). Bei elektromagnetischen Heizschützen sind noch Sperrmagnete vorhanden, die verhindern sollen, daß ein evtl. Kurzschluß im Heizstromkreis vom Heizschütz abgeschaltet wird. In diesem Falle geht nämlich die Spannung im Trafo zurück und dabei sinkt auch proportional die Steuerspannung (200 V). Daher würde das Heizschütz bereits vor dem Hauptschalter den Stromkreis abschalten. Bei elektropneumatischen Schützen sind zusätzliche Sperrmagnete nicht erforderlich, weil eine konstante Batteriespannung vorhanden ist.

Die durchgehende Zugheizleitung ist bei Lokomotiven und Wagen für einen Strom von 400 A bemessen und hat einen Kupferquerschnitt von 185 mm². Sie gabelt sich an den beiden Stirnseiten jedes Fahrzeuges, so daß sich unter dem gewölbten Puffer stets eine Kupplungsdose und unter dem flachen Puffer stets ein etwa 1,5 m langes Kupplungskabel mit dem Heizstecker befindet (Bild 187). Von den beiden Kupplungen wird jedoch stets nur eine benutzt, während die andere als Ersatz dient. Der nicht benutzte Stecker wird in einer Blinddose verwahrt und die nicht benutzte Steckdose bleibt verschlossen, so daß die Kontaktstellen immer gegen Berührung, Nässe und Verschmutzung geschützt sind. Zwischen

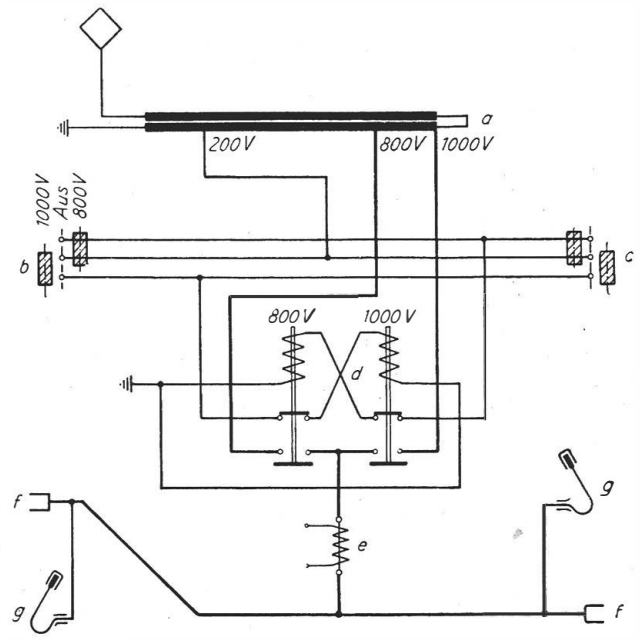


Bild 186. Schaltung der Zugheizung

a Hauptumspanner
b Heizkontroller vorn
c Heizkontroller hinten
d Heizschütz
e Stromwandler für Zugheizung
f Kupplungsdose
g Kupplungskabel mit Heizstecker

der elektrischen Lokomotive und dem ersten Wagen soll das Wagenheizkabel benutzt werden, da beim Abfallen des spannungsführenden Lokomotivheizkabels ein Kurzschluß auftreten würde.

Sämtliche Kupplungen dürfen nur stromlos geschlossen oder getrennt werden, und zwar stets bei gesenktem Stromabnehmer, um Unfälle zu vermeiden. Wird ein Zug von einer stationären Vorheizanlage aus vorgeheizt, so ist darauf zu achten, daß während des Kuppelns der Heizschalter ausgeschaltet bleibt und nicht zugleich von der Lokomotive und der Vorheizanlage aus geheizt wird.

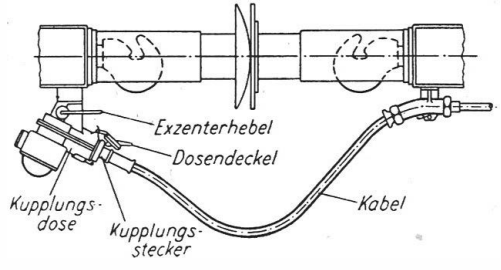


Bild 187. Elektrische Heizkupplung

3.77 Sicherheitsfahrschaltung

Während eine Dampflokomotive wegen der Bedienung des Kessels stets mit zwei Mann besetzt sein muß, ist der Führer einer elektrischen Lokomotive in den meisten Fällen selbst in der Lage, die gesamte Strecke zu übersehen und alle Einrichtungen zu bedienen. Es besteht also in technischer Hinsicht die Möglichkeit, den zweiten Mann einzusparen und somit die Personalkosten wesentlich zu senken. Bei elektrischen Triebfahrzeugen ist daher eine Ein-Mann-Bedienung bis zu einer Höchstgeschwindigkeit von 90 km je Stunde zulässig, jedoch aus Gründen der Betriebssicherheit nur dann, wenn eine Sicherheitsfahrschaltung (Sifa) eingebaut ist. Diese überwacht ständig die Dienstfähigkeil des Lokomotivführers, der in diesem Falle gezwungen ist, während der Fahrt stets einen Kontaktknopf (Totmannknopf) niederzudrücken. Wird jedoch bei Dienstuntauglichkeil des Lokomotivführers der Stromkreis unterbrochen, so sorgt die Sifa dafür, daß die Fahrmoloren abgeschaltet werden und der Zug auf kürzestem Wege zum Halten kommt.

Es gibt zeitabhängige Schutzeinrichtungen, die nach kurzer Zeit, z. B. 6···8 s, in Tätigkeit treten und auch wegabhängige Fahrschaltungen, wie sie z. B. bei der Deutschen Reichsbahn gebräuchlich sind. Ihr prinzipieller Aufbau ist aus Bild 188 zu erkennen. Sie bestehen aus einem Schaltwerk, das über ein Kegelradgetriebe angetrieben wird, einer Auslösevorrichtung und einem Notbremsventil.

Die einzelnen Teile arbeiten folgendermaßen zusammen: Im Gehäuse der Sifa ist ein Schneckenrad gelagert, das während der Fahrt von der benachbarten Achse aus über Kegelräder und eine kurze Verbindungswelle angetrieben wird. Unmittelbar über dieser Schnecke liegt, an einem Hebel drehbar gelagert, ein Zahnrad, dem auf einem kleinen Teil des Umfanges die Zähne fehlen. Im Betriebszustand wird dieser Hebel durch einen Hubmagneten so hoch gehalten, daß das Zahnrad nicht in die Schnecke eingreift. Wird jedoch der Erregerstrom des Hubmagneten, der über einen der obengenannten Druckknöpfe fließt, unterbrochen, so fällt der Hebel nach unten, und das Zahnrad greift in die Schnecke ein. Sobald sich das Rad um nahezu 90° gedreht hat, das entspricht einem Fahrweg von etwa 75 m, wird durch eine Trommel am Zahnrad ein Kontakt geschlossen, und es ertönt auf dem Führerstand ein Summer.

Drückt der Lokomotivführer auf diese Ermahnung hin einen der vier Knöpfe, so zieht der Hubmagnet wieder an, das Zahnrad kommt außer Eingriff und wird durch eine Rückstellfeder wieder in seine Ruhelage gebracht. Wird jedoch nach Ertönen des Summers infolge Dienstunfähigkeit des Lokomotivführers kein Kontaktknopf gedrückt, so bleiben Schnecke und Zahnrad in Eingriff, und das Rad dreht sich so lange weiter, bis die Schnecke an die Aussparung des Rades kommt.

In diesem Augenblick hat sich das Rad insgesamt um annähernd 180° gedreht, was einem Fahrweg von 150 m seit Loslassen des Kontaktknopfes entspricht. Da in der Aussparung die Zähne fehlen, fällt das Rad noch tiefer herab und der Hebel, in dem es gelagert ist, betätigt ein Umschaltventil in der Druckluftleitung. In der Ruhelage läßt dieses Ventil Druckluft aus der Hauptluftleitung hinter den Kolben eines Druckluftschalters treten und hält ihn gegen die Kraft einer Feder geschlossen. Wird nun das Umschaltventil betätigt, so wird der Steuerstromkreis unterbrochen und die Motortrennschütze schalten die gesamte Antriebsleistung ab. Gleichzeitig wird durch das Umschaltventil das Notbremsventil geöffnet, die Bremsluft strömt durch große Querschnitte ins Freie und leitet eine Schnellbremsung des ganzen Zuges ein.

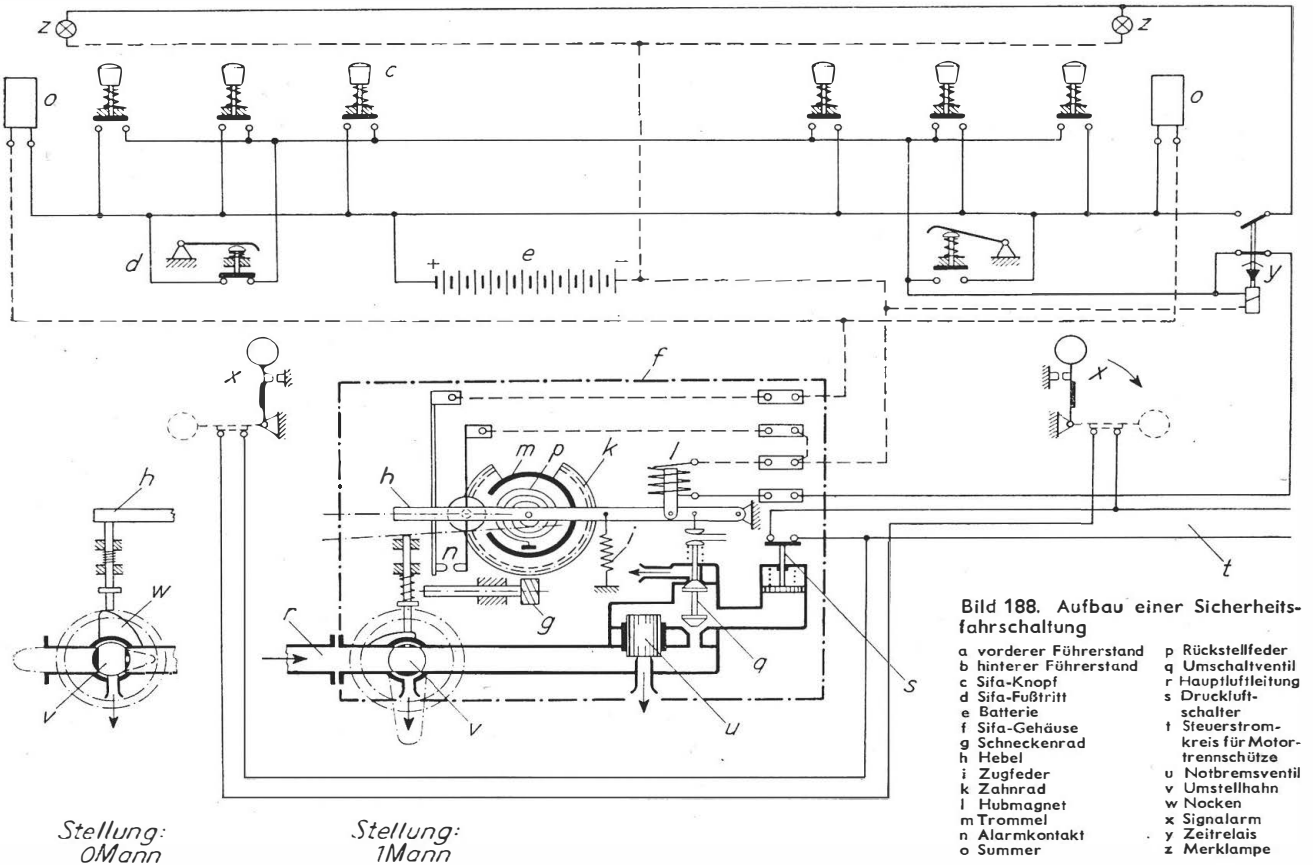


Bild 188. Aufbau einer Sicherheitsfahrschaltung

a vorderer Führerstand
b hinterer Führerstand
c Sifa-Knopf
d Sifa-Fußtritt
e Batterie
f Sifa-Gehäuse
g Schneckenrad
h Hebel
i Zugfeder
k Zahnrad
l Hubmagnet
m Trommel
n Alarmkontakt
o Summer
p Rückstellfeder
q Umschaltventil
r Hauptluftleitung
s Druckluftschalter
t Steuerstromkreis für Motortrennschütze
u Notbremsventil
v Umstellhahn
w Nocken
x Signalarm
y Zeitrelais
z Merklampe

Die Antriebsleistung wird auch dann sofort unterbrochen, sobald aus einem anderen Grunde, z. B. Ziehen der Notbremse, oder bei Zugtrennung, der Luftdruck in der Bremsleitung plötzlich stark abfällt. Dadurch ist es möglich, den Bremsweg zu verkürzen und eine Überlastung der Fahrmotoren, die bei Fahrt mit angezogenen Bremsen eintreten würde, zu verhindern.

Wird nach Inkrafttreten der Sifa einer der Kontaktknöpfe gedrückt, so zieht der Hubmagnet den Hebel mit dem Zahnrad an und das Umschaltventil geht wieder in seine ursprüngliche Lage zurück. Die Lokomotive ist somit wieder voll betriebsfähig. Um eine unbemannte elektrische Lokomotive abschleppen zu können, ist am Sifa-Gehäuse ein Umstellhahn mit den beiden Stellungen „0 Mann" und „1 Mann" angebracht. Bei der letztgenannten Stellung ist die Sifa betriebsbereit, im anderen Falle jedoch außer Tätigkeit gesetzt. Will man eine elektrische Lokomotive mit gestörter Sifa in Betrieb nehmen, so muß man den Umstellhebel ebenfalls auf die Stellung „0 Mann" umlegen, und auf beiden Führerständen durch Kurzschließer die Steuerstromleitung zu den Motortrennschützen oder Steuerrelais überbrücken. Dadurch schwenkt ein Signalarm vor das linke Führerstandsfenster, und man kann von außen sofort erkennen, daß die Sifa außer Betrieb ist.

Eine Sifa ist an fast allen elektrischen Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn zu finden und hat sich bestens bewährt. Die vorgenannte Bauart hat jedoch den Nachteil, daß sie durch Festklemmen oder Anbinden eines Kontaktknopfes leicht unwirksam gemacht werden kann. Bei einer Neukonstruktion wird daher der Strom für den Hubmagneten nicht nur über die Druckknöpfe, sondern zugleich über den Kontakt eines Zeitrelais geführt. Hubmagnet und Zeitrealais liegen parallel, bekommen also beide über einen Druckkontakt Strom. Der Hubmagnet zieht sofort an, während das Zeitrealis erst nach einer bestimmten einstellbaren Zeit (etwa 1 Minute) anspricht und dadurch den Hubmagneten ausschaltet. Der Lokomotivführer muß dann den Druckknopf kurz loslassen, damit auch das Zeitrelais abfallen kann. Unterläßt der Lokomotivführer diese periodische Unterbrechung, dann warnt ihn zuerst eine Lampe, etwas später der Summer. Bei Nichtbeachtung der beiden Zeichen wird in der bekannten Form die Antriebsleistung unterbrochen, und die Schnellbremsung eingeleitet.

3.78 Meß- und Schutzeinrichtungen

Auf jedem Führerstand befinden sich mehrere Meßgeräte, die dem Lokomotivführer die Steuerung der Fahrmotoren und die Bedienung der Hilfseinrichtungen erleichtern. Hierzu gehören:

1. Spannungsmesser für die Fahrleitungsspannung, die am Oberspannungswandler angeschlossen sind und die Fahrdrahtspannung auch bei ausgeschaltetem Hauptschalter anzeigen. Bei fehlendem Oberspannungswandler wird die Spannung der 200-V-Trafoanzapfung am Prüfumschalter entnommen und entsprechend geeichten Meßinstrumenten auf dem Führerstand zugeführt.
2. Strommesser für den insgesamt der Fahrleitung entnommenen Strom. Der Meßstrom wird dem Oberstromwandler entnommen, der zwischen Ober- und Unterspannungswicklung des Hauptumspanners geschaltet ist.
3. Strommesser, die den von jedem Fahrmotor aufgenommenen Strom anzeigen. Sie sind meist an Motorstromwandler angeschlossen und mit dem Motorüberstromauslöser in Reihe geschaltet. Da es schwierig ist, die am Umfang jedes Treibrades auftretende Zug-

kraft zu messen, mißt man den Motorstrom, der dieser Zugkraft zugeordnet ist und bringt am Strommesser eine zweite Skala an, auf der die Zugkräfte in Mp aufgetragen sind.

4. Spannungs- und Strommesser für die Zugheizung, die an entsprechende Wandler angeschlossen sind.
5. Geschwindigkeitsmesser, die außer der Fahrgeschwindigkeit in km/h auf einer zweiten innenliegenden Skala auch die bei jeder Geschwindigkeit zulässige höchste Zugkraft für einen Motor anzeigen (Bild 189). Durch einen Vergleich mit den auf den Strommessern angezeigten wirksamen Zugkräften kann also jederzeit mit Hilfe der Zugkrafttafel (Bild 190) festgestellt werden, ob eine Zugkraftsteigerung durch Weiterschalten auf die nächste Fahrstufe zulässig ist.
6. Bremsstrommesser, vorausgesetzt, daß eine elektrische Bremse vorhanden ist.

Diese Meßinstrumente sind bei allen elektrischen Lokomotiven einheitlich im direkten Blickfeld des Lokomotivführers nebeneinander auf dem Führerpult in einem gemeinsamen Meßgerätekasten untergebracht. Es werden meist Weicheisengeräte in Profilform verwendet, die für Spannungen bis 150 V und für Ströme bis zu etwa 5 A bemessen sind. Da die auf der elektrischen Lokomotive auftretenden Werte wesentlich höher liegen, ist es notwendig, die im Abschnitt 3.3 erwähnten Meßwandler vorzuschalten.

Außer den Meßgeräten auf den Führerpulten ist im Maschinenraum in der Nähe der Gleichstromanlage noch ein Spannungsmesser für den Sammler vorhanden, der jedoch nur zeitweise abgelesen wird. Um feststellen zu können, ob der Haupttrafo unter Spannung steht, d. h., ob der Hauptschalter ein- oder ausgeschaltet ist, wird in jedem Führerstand meist noch ein Schauzeichen angebracht, das bei spannungslosem Umspanner ein weißes und sonst ein schwarzes Feld anzeigt. Ebenso kann durch einfache Schauzeichen, Meldelampen, Summer oder Fallklappen der Lokomotivführer über den Zustand einzelner Geräte oder Einrichtungen unterrichtet werden.

Diese Meldeeinrichtungen sind an die Steuerspannung von 200V oder an das 24-V-Gleichstromnetz angeschlossen und zeigen dem Lokomotivführer z. B. an, ob die Ölpumpe oder der Lüfter ausgefallen ist, ob ein Motorrelais angesprochen hat oder der Zug geheizt wird. Bei vielen Steuerungen ist es auch üblich, durch einen einfachen Zeiger die jeweils eingeschaltete Fahrstufe anzugeben.

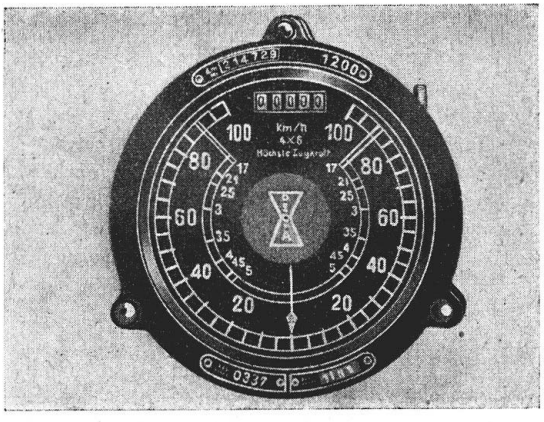
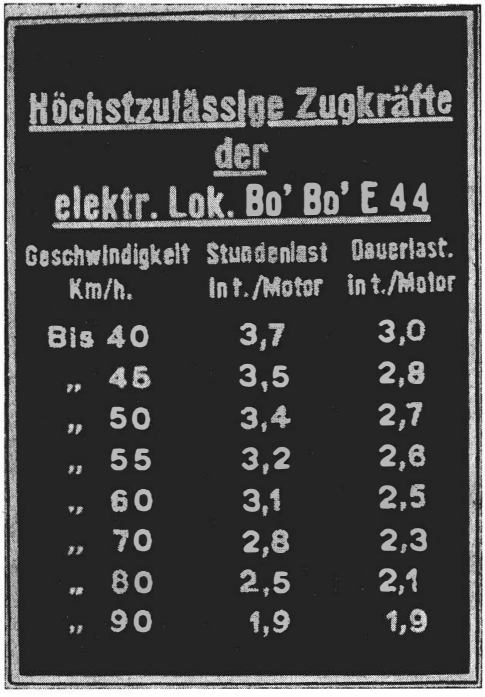


Bild 189
Geschwindigkeitsmesser mit Angabe der maximalen Anfahrzugkraft



Höchstzulässige Zugkräfte der elektr. Lok. Bo' Bo' E 44

Geschwindigkeit Km/h.	Stundenlast in t./Motor	Dauerlast. in t./Motor
Bis 40	3,7	3,0
„ 45	3,5	2,8
„ 50	3,4	2,7
„ 55	3,2	2,6
„ 60	3,1	2,5
„ 70	2,8	2,3
„ 80	2,5	2,1
„ 90	1,9	1,9

Bild 190. Zugkrafttafel

Auch sind in jedem Führerstand noch Meßinstrumente für die Drucklufteinrichtung untergebracht, und zwar je ein Luftdruckmesser für den Hauptluftbehälter, für die Hauptluftleitung und für die Bremszylinder.

Außerdem sind auf elektrischen Lokomotiven noch zahlreiche Schutzeinrichtungen vorhanden, die eine allzu starke Erwärmung oder Beschädigung einzelner Teile durch fehlerhafte Behandlung oder Überlastung verhindern sollen. Als Schutz gegen Kurz- und Erdschlußströme verwendet man für kleine Ströme Sicherungen oder Kleinselbstschalter, sogenannte Automaten. Die großen Anlagen, wie z. B. der Trafo, die Fahrmotoren oder die Zugheizung, werden durch Relais geschützt, die mit den zum betriebsmäßigen Ein- und Ausschalten benötigten Schützen zusammenarbeiten. Spricht z. B. ein Motorrelais an, so wird das entsprechende Motortrennschütz ausgeschaltet. Der Trafo ist durch ein Primärrelais gesichert, das evtl. den Hauptschalter ausschaltet. Aus Abschnitt 3.145 ist bereits bekannt, daß dieser bei Unterschreiten einer bestimmten Fahrdrahtspannung auch durch ein Spannungsrückgangs-Relais (Nullspannungsrelais) abgeschaltet wird, das allerdings mit Zeitverzögerung arbeitet, damit es nicht schon beim Springen des Stromabnehmers anspricht. Neuere elektrische Lokomotiven haben noch ein Erdstromrelais, das mit einem Erdstromwandler zusammenarbeitet und die gefürchteten Erdschlüsse sofort unschädlich macht.

Als weitere Schutzeinrichtung sei das Schleuderrelais genannt. Dieses hat eine ähnliche Aufgabe wie die pneumatisch wirkende Schleuderschutzbremse (siehe Abschnitt 2.132). Es

soll beim Anfahren schwerer Züge auf elektrischem Wege das Schleudern einzelner Treibachsen vermeiden und das Schaltwerk auf eine niedrigere Fahrstufe zurückschalten.

3.79 Zubehör

Außer den obengenannten Hilfseinrichtungen ist jede elektrische Lokomotive noch mit einigen Zubehörteilen ausgerüstet, die entweder der Leistungssteigerung der Lokomotive dienen oder durch die BO vorgeschrieben sind.

Hierzu gehören z. B. die Luftpfeifen, die über jedem Führerstand auf dem Dach der Lokomotive angebracht sind. Sie ähneln den Dampfpfeifen, haben meist einen eigenen kleinen Luftbehälter und werden durch einen Handhebel vom Führerstand aus bedient.

Auch eine Sandstreuvorrichtung ist vorhanden, um bei schweren Anfahrten oder bei starkem Bremsen die Haftreibung zwischen Rad und Schiene zu erhöhen. Die Sandstreuer arbeiten meist mit Druckluft; Düsen blasen den Streusand durch die Sandrohre dicht vor die Räder. Diese Anlage wird durch einen Sandstreuhahn betätigt, der in jedem Führerstand untergebracht ist und folgende drei Stellungen aufweist: „Abschluß", „Sanden der vorderen Treibachse in Fahrtrichtung" und „Sanden aller Treibachsen in Fahrtrichtung". Die Sandkästen sind meist in der Nähe der Treibachse untergebracht, oben durch einen Deckel abgeschlossen und mit Holz ausgekleidet. An den Enden der Sandrohre sind ovale Streuschuhe angeschweißt.

Die übrigen ebenfalls meist mit Druckluft betätigten Einrichtungen, wie z. B. Stromabnehmer, Hauptschalter und Achslastausgleichvorrichtung wurden bereits früher erwähnt.

Der Vollständigkeit halber sei noch darauf hingewiesen, daß elektrische Lokomotiven häufig noch mit Scheibenwischern und Klarsichtscheiben ausgerüstet sind, um dem Lokomotivführer bei jedem Wetter eine gute Sicht zu ermöglichen. Die Klarsichtscheibe wird häufig mit 24 V Wechselstrom beheizt. Die Heizspannung wird dem gleichen Hilfstrafo entnommen, an dem die 24-V-Ladegleichrichter für die Batterie angeschlossen sind.

Die Fensterwischer werden von Hand, mit Druckluft oder elektrisch betrieben. Im allgemeinen wird ein 24-V-Gleichstrommotor verwendet, der, genau wie die Klarsichtscheibe, durch Kleinselbstschalter ein- und ausgeschaltet wird. Einige neuere elektrische Lokomotiven haben noch einen kleinen Hilfsluftpresser, der ebenfalls vom 24-V-Gleichstromnetz gespeist wird. Dieser erzeugt nur so viel Druckluft, wie zum Aufrichten eines Stromabnehmers oder Einschalten eines Hauptschalters erforderlich ist, wenn die Lokomotive längere Zeit abgestellt war und der Druck im Hauptluftbehälter nicht ausreicht.

Abschließend sei noch erwähnt, daß sämtliche elektrische Lokomotiven mit Feuerlöschern und mit einem Werkzeugschrank ausgerüstet sind.

4 Elektrische Ausrüstung einer Gleichstromlokomotive

Mit Rücksicht auf die Tatsache, daß sämtliche elektrische Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn mit Einphasenwechselstrom betrieben werden, traten bei den bisherigen Betrachtungen die Gleichstromlokomotiven in den Hintergrund. Aus Abschnitt 1.1 „Geschichtliche Entwicklung des elektrischen Zugbetriebes" und Abschnitt 1.2 „Gegenüberstellung der verschiedenen Stromsysteme" ist bekannt, daß Gleichstrom für den Nahverkehr gewisse Vorteile bietet, und so ist es verständlich, daß sämtliche Straßenbahnen und Überland-

bahnen Gleichstrom verwenden. Auch die Berliner S-Bahn und die Berliner U-Bahn werden mit Gleichstrom von 800 V bzw. 750 V betrieben.
Der große Lokomotivpark des Mitteldeutschen Braunkohlengebietes arbeitet, wie die übrigen Industriebahnen, ebenfalls mit Gleichstrom und verwendet eine Spannung von 1200 V. Berücksichtigt man noch, daß etwa ⅔ aller elektrischen Vollbahnen der Welt mit Gleichstrom betrieben werden und daß die Deutsche Demokratische Republik bereits eine große Anzahl Gleichstromlokomotiven in das befreundete Ausland exportiert hat, so erscheinen doch einige Hinweise auf Gleichstromlokomotiven angebracht.

4.1 Allgemeines

Die Gleichstromlokomotive ist die älteste der elektrischen Lokomotiven überhaupt und hat jetzt eine Entwicklung von mehr als 80 Jahren hinter sich. Etwa 80 % aller bisher gebauten elektrischen Lokomotiven sind Gleichstromlokomotiven. Dies ist darauf zurückzuführen, daß man bei Gleichstrom ebenso wie bei Einphasenwechselstrom mit nur *einer* Fahrleitung auskommt und daß der Gleichstrommotor wegen seines Betriebsverhaltens als Bahnmotor besonders geeignet ist.
Der mechanische Teil einer Gleichstromlokomotive entspricht in jeder Hinsicht dem einer Wechselstromlokomotive, so daß sich die Betrachtungen dieses Abschnittes auf die elektrische Ausrüstung einer Gleichstromlokomotive beschränken können.
Auch bei Gleichstrombahnen wurde von Anfang an der Reihenschlußmotor verwendet, der auf Grund seiner Charakteristik den Anforderungen des elektrischen Zugbetriebes am besten entspricht (siehe Abschnitt 1.21). Durch entsprechende Bemessung der Wicklungen, des magnetischen Flusses und vor allem des Luftspaltes ist es möglich, seine Kennlinien in weiten Grenzen zu beeinflussen. Während der Einphasen-Motor im allgemeinen so bemessen wird, daß seine Stundendrehzahl bei 70 % der höchsten Betriebsdrehzahl liegt, kann man die Drehzahl des Gleichstrommotors auf das zwei- bis dreifache der Stundendrehzahl erhöhen. Auch in bezug auf Überlastbarkeit ist der Gleichstrommotor dem Wechselstrommotor überlegen, da er ohne Bedenken mit dem dreifachen Stundendrehmoment beansprucht werden darf.

4.2 Steuerung

Reihenschlußmotoren werden stets durch Ändern der ihnen aufgedrückten Spannung gesteuert. Während dies bei Wechselstromlokomotiven am einfachsten mit Hilfe eines Stufenumspanners erreicht wird, müssen bei Gleichstrommotoren stromfressende Vorschaltwiderstände verwendet werden. Diese werden bei der Anfahrt stufenweise kurzgeschlossen. Um jedoch mehr als eine wirtschaftliche Dauerfahrstufe zu erreichen, bei der alle Widerstände abgeschaltet sind, ist es zweckmäßig, stets zwei Fahrmotoren zu einer Motorengruppe zusammenzufassen. Die beiden Motoren werden dann zunächst unter allmählichem Kurzschließen der Vorschaltwiderstände in Reihe gelegt. Dann werden sie mit Hilfe einer Übergangsstufe parallel geschaltet, wobei die Widerstände zunächst wieder eingeschaltet und dann stufenweise kurzgeschlossen werden. Diese Reihen-Parallelschaltung bietet den Vorteil, daß im Vergleich zur reinen Parallelschaltung die Verluste in den Vorschaltwiderständen auf die Hälfte zurückgehen. Zugleich verringern sich die Masse und der Platzbedarf der Widerstände.

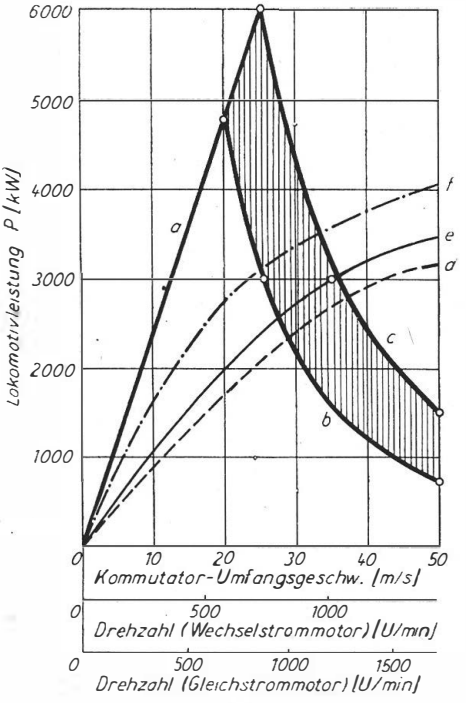


Bild 191
Leistungskennlinien einer Gleich- und Wechselstromlokomotive

a Anfahrkennlinie einer Gleichstromlokomotive
b Leistungskennlinie einer Gleichstromlokomotive bei voller Felderregung
c Leistungskennlinie einer Gleichstromlokomotive bei halber Felderregung
d Dauerleistung einer Wechselstromlokomotive
e Stundenleistung einer Wechselstromlokomotive
f Anfahrleistung einer Wechselstromlokomotive

Um die Steuerbarkeit einer Gleichstromlokomotive zu erweitern, wird nach dem vollständigen Kurzschließen der Anlaßwiderstände auch noch das Hauptfeld durch Parallelwiderstände stufenweise geschwächt. Bei kompensierten Motoren kann die Erregung bis auf 25 % des vollen Wertes herabgemindert werden. In Bild 191 sind die Leistungskennlinien einer Gleichstromlokomotive denen einer Wechselstromlokomotive gegenübergestellt (siehe Bild 177). In beiden Fällen wird eine maximale Stundenleistung von 3000 kW zugrunde gelegt. Dabei besteht das Leistungsdiagramm der Gleichstromlokomotive aus der durch die Reibungslast bestimmten schwach gekrümmten Anfahrkennlinie a und den beiden stark abfallenden hyperbelartigen Kurven b bei voller bzw. c bei auf die Hälfte verringerter Felderregung. Die senkrecht schraffierte Fläche stellt das Gebiet der verlustlosen Steuerung einer Gleichstromlokomotive dar.

Trägt man in dieses Diagramm als Abszisse zusätzlich noch die Kommutator-Umfangsgeschwindigkeit in m/s auf, so erkennt man, daß die Gleichstromlokomotive bei voller Erregung der Fahrmotoren die Stundenleistung von 3000 kW bereits bei einer Kommutatorumfangsgeschwindigkeit von 25 m/s erreicht, während die Wechselstromlokomotive 35 m/s benötigt. Die Kennlinien zeigen auch deutlich, daß die Leistung einer Gleichstromlokomotive mit zunehmender Geschwindigkeit stark abfällt, während die Leistung einer Einphasenlokomotive mit steigender Geschwindigkeit zunimmt.

Die Gleichstromlokomotive kann also bei Stundenleistung ihre Fahrmotoren nur zu etwa 50···75 % ihrer Höchstdrehzahl ausnutzen. Da sie nur bei geringer Geschwindigkeit in der

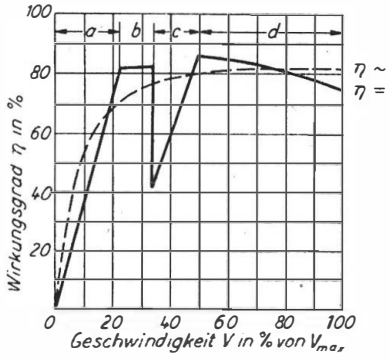


Bild 192

Wirkungsgrad einer Gleichstromlokomotive

a 2 Fahrmotore in Reihe geschaltet mit Vorwiderstand
b 2 Fahrmotore in Reihe geschaltet ohne Vorwiderstand
c 2 Fahrmotore parallel geschaltet mit Vorwiderstand
d 2 Fahrmotore parallel geschaltet ohne Vorwiderstand

Lage ist, eine höhere Leistung abzugeben, wird ihr Belastungsbereich stark eingeschränkt. In Bild 192 ist der Wirkungsgrad einer Gleichstromlokomotive in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgezeichnet und dem einer Wechselstromlokomotive gegenübergestellt. Beim Übergang von der Reihen- zur Parallelschaltung bleiben entweder beide Motoren, mindestens aber ein Motor, dauernd unter Strom, so daß beim Anfahren keine Zugkraftunterbrechung auftritt.

Bei elektrischen Lokomotiven geringer Leistung und bei Triebwagen verwendet man die Abrißschaltung, die mit nur einem Widerstandssatz und wenig Schaltern auskommt. Dabei muß jedoch in Kauf genommen werden, daß die Anfahrzugkraft vorübergehend auf die Hälfte zurückgeht.

Für leistungsfähige Streckenlokomotiven bevorzugt man die Brückenschaltung, die bei richtiger Schaltweise diesen Zugkraftsprung vermeidet, jedoch unbedingt zwei Wider-

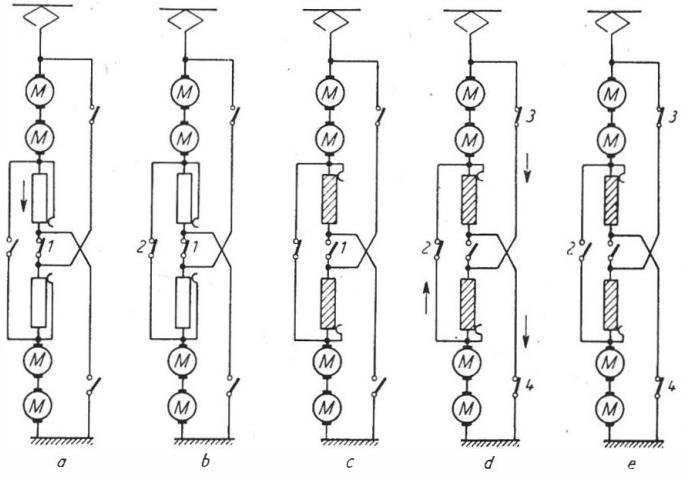


Bild 193. Brückenschaltung

standssätze und daher auch wesentlich mehr Schalter benötigt. Nähere Einzelheiten sind aus Bild 193 zu erkennen. Während der Anfahrt liegen die Motorgruppen in Reihe, der Schalter 1 ist geschlossen. Die Vorschaltwiderstände werden stufenweise kurzgeschlossen (Bild 193a). In der Übergangsstellung (Bild 193b) wird der Brückenschalter 2 geschlossen. Sofort anschließend wird der Schalter 1 wieder geöffnet und ein entsprechender Widerstand eingeschaltet (Bild 193c). Werden dann in der nächsten Schaltung (Bild 193d) die beiden Schalter 3 und 4 gleichzeitig geschlossen, dann liegen die beiden Motorgruppen bereits in Parallelschaltung. Beim nächsten Schaltvorgang (Bild 193e) wird nur noch der Brückenschalter 2 geöffnet. Bild 194 zeigt den vereinfachten Schaltplan einer viermotorigen Gleichstromlokomotive.

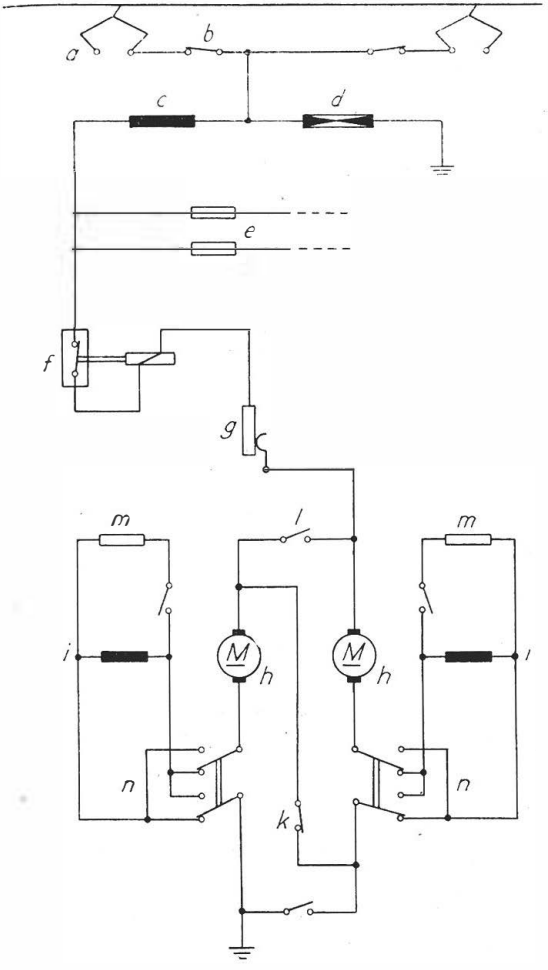


Bild 194

Vereinfachtes Schaltbild einer Gleichstromlokomotive

a Stromabnehmer
b Trennschalter
c Drosselspule
d Überspannungsableiter
e Hilfsstromkreise
f Hauptschalter
g Anfahrwiderstände
h Fahrmotor
i Erregerwicklung
k Gruppierungsschalter für Serienschaltung
l Gruppierungsschalter für Parallelschaltung
m Feldschwächungswiderstand
n Fahrtwendeschalter

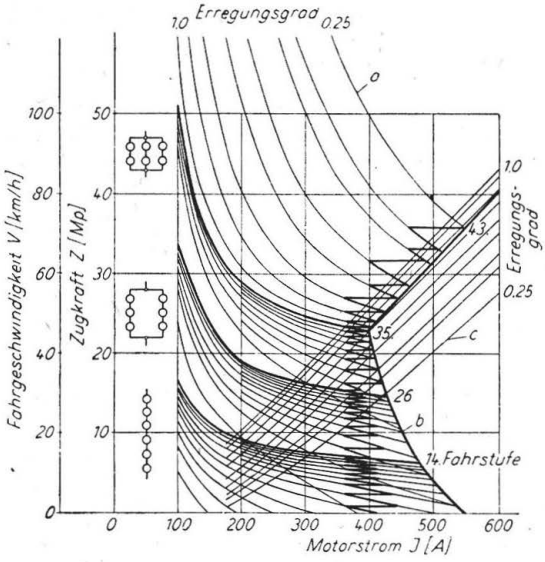


Bild 195

Anfahrkennlinien einer Co'Co'-Güterzuglokomotive (Gleichstrom)

a Geschwindigkeitskennlinie
b Haftreibungsgrenze
c Zugkraftkennlinie

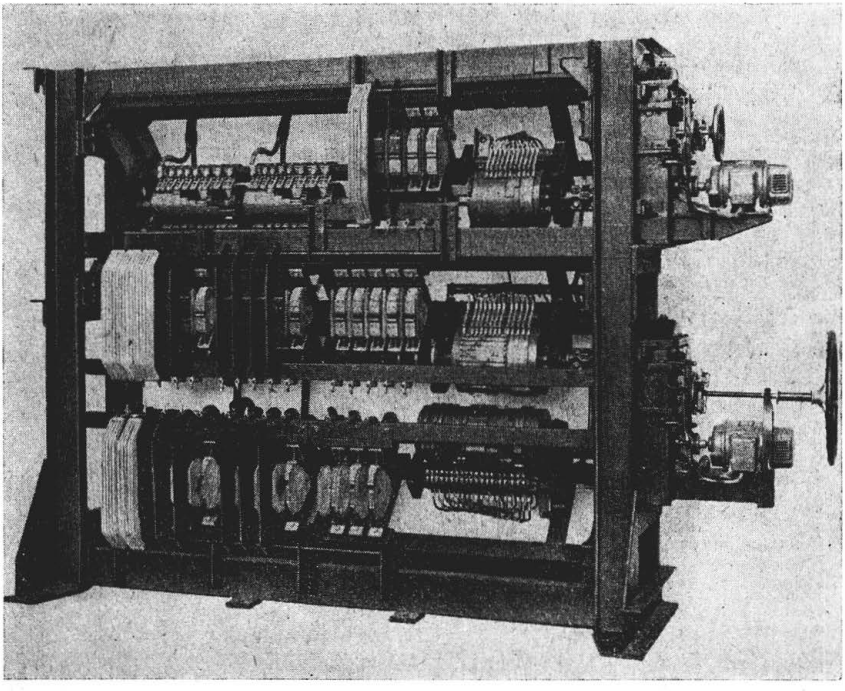


Bild 196. Automatisches Nockenschaltwerk

Durch die Reihen-Parallelschaltung und die Feldschwächung ist es möglich, die Motorkennlinien stark zu beeinflussen. Die Anfahrkennlinien einer Co'Co'-Gleichstromlokomotive zeigt Bild 195. Dabei sind die Geschwindigkeitskennlinien für die einzelnen Stufen in Abhängigkeit vom Motorstrom aufgetragen. Da man stets bemüht ist, möglichst in der Nähe der Haftreibungsgrenze anzufahren, wird ähnlich wie bei der Wechselstromlokomotive von Kennlinie zu Kennlinie hochgeschaltet (siehe Abschnitt 3.41). Dabei bleiben Zugkraft und Motorstrom zwar nicht konstant, jedoch stets in der Nähe des zulässigen Höchststromes. Um mit der Lokomotive allein oder mit kleinen Anhängelasten schnell anfahren zu können, werden noch einige Vorstufen eingebaut. Streckenlokomotiven mit feinstufiger Steuerung haben bis zu 45 Anfahrstufen. Davon sind etwa 35 Widerstandsstufen (einschließlich 4···5 Vorstufen) und etwa 8···10 Feldschwächungsstufen. Dabei werden die verschiedenen Widerstandssätze durch entsprechende Kombination einzelner Widerstände gebildet, um mit möglichst wenig Schaltern auszukommen und das vorhandene Widerstandsmaterial möglichst gut auszunutzen. Auch bei Gleichstromlokomotiven ist es ratsam, ein Fortschaltrelais einzubauen, das ein Weiterschalten auf die nächsthöhere Fahrstufe erst dann gestattet, wenn der Motorstrom auf ein bestimmtes Maß abgesunken ist.

Die bei Gleichstromlokomotiven verwendeten Steuerelemente und Übertragungssteuerungen entsprechen denen der Wechselstromlokomotive, so daß es sich erübrigt, an dieser Stelle näher darauf einzugehen. Bild 196 zeigt ein automatisches Nockenschaltwerk und Bild 197 einen Fahrschalter, wie er z. B. bei schweren Industrielokomotiven Verwendung findet.

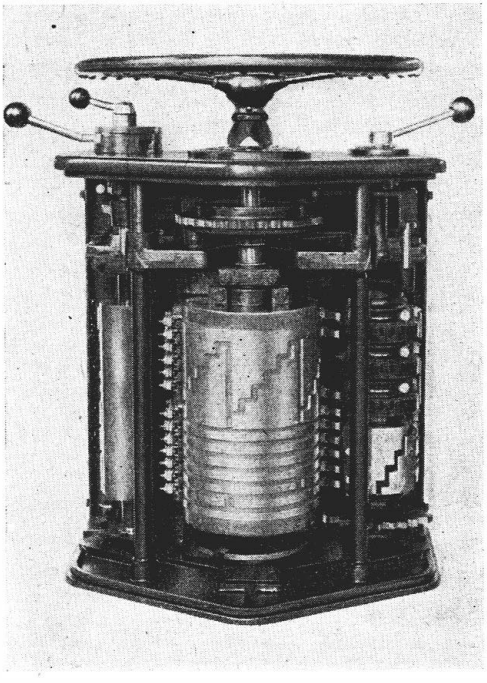


Bild 197
Fahrschalter

4.3 Fahrmotor

Der konstruktive Aufbau eines Gleichstrom-Bahnmotors erinnert an den des Einphasenmotors, der im Abschnitt 3.5 behandelt wurde. Die äußeren Abmessungen werden auch in diesem Falle durch die Spurweite, den Treibraddurchmesser und, wenn es sich um einen Tatzlagermotor handelt, durch die Bodenfreiheit bestimmt (Bild 198). Dadurch ergibt sich für den Motor einer normalspurigen Vollbahn-Lokomotive bei einer Fahrdrahtspannung von 3000 V ein Grenzwert von etwa 530 kW Stundenleistung.

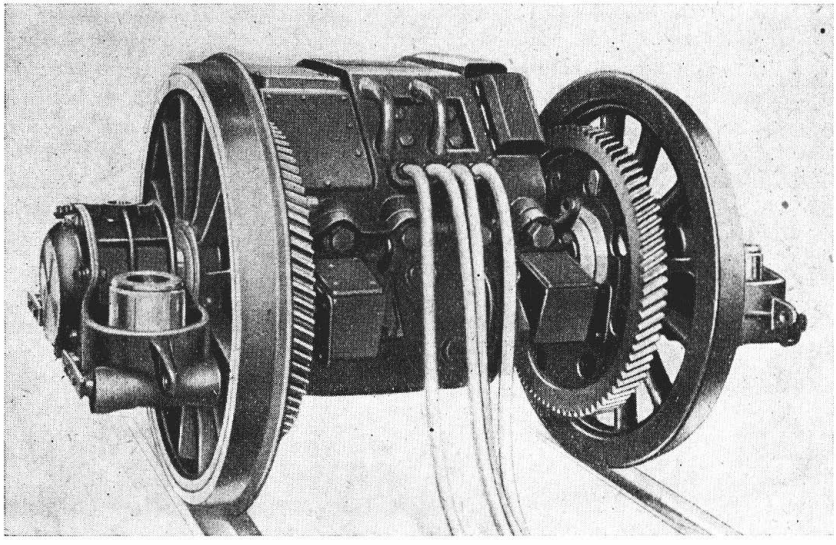


Bild 198. Treibradsatz mit Gleichstrom-Tatzmotor

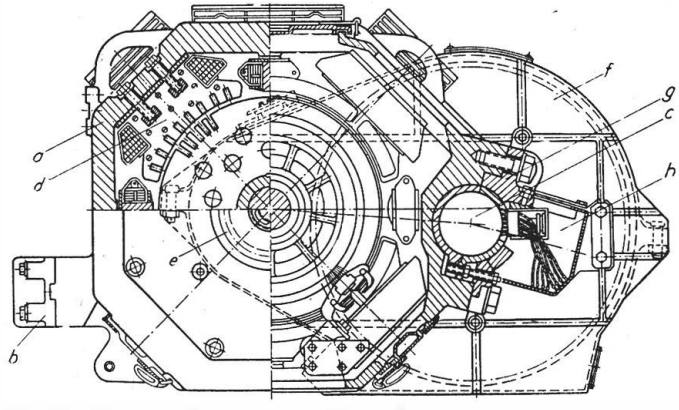


Bild 199. Querschnitt durch einen Gleichstrom-Bahnmotor

a Motorgehäuse
b Konsole für Lagerung im Rahmen
c Tatzlager
d Hauptpol
e Ritzel
f Getriebeschutzkasten
g Tatzlagerdeckel
h Ölschmierung

Der Motor besteht aus dem einteiligen Magnetgehäuse mit vier Haupt- und vier Wendepolen einschließlich Feldwicklungen und aus dem Läufer. Bild 199 zeigt einen Querschnitt durch den Gleichstrommotor Type GBM 530, der im Jahre 1954 vom VEB LEW „Hans Beimler", Hennigsdorf, für einen Exportauftrag entwickelt wurde. Das Motorgehäuse hat mit Rücksicht auf die Anordnung der Pole einen achteckigen Querschnitt (Bild 200). Die Hauptpole bestehen aus dünnen Blechen je 1 mm Dicke, die stirnseitig durch 8 mm dicke Endplatten zusammengehalten werden. Die Wendepole bestehen aus massivem Flußeisen. Mit Rücksicht auf die Lage der Bürsten sind die Hauptpole in den Ecken unter 45° geneigt

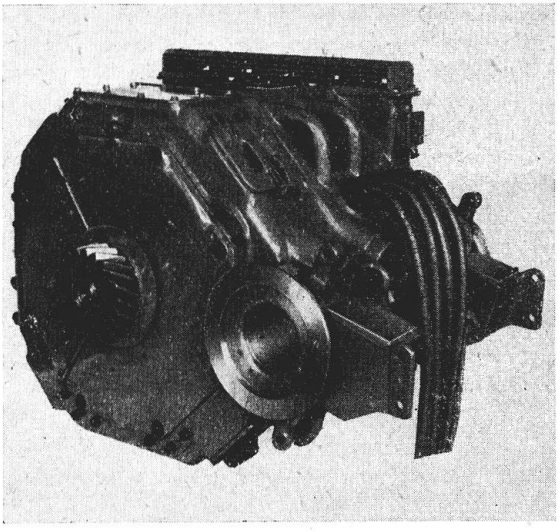


Bild 200
Gleichstrom-Bahnmotor mit Tatzlagern

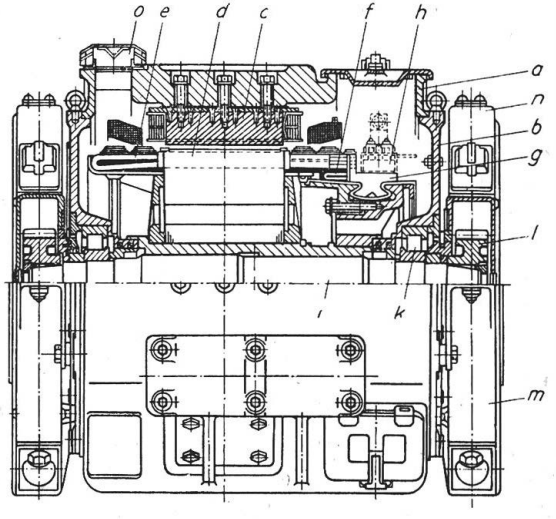


Bild 201
Längsschnitt durch einen Gleichstrom-Bahnmotor

a Motorgehäuse
b Lagerschild
c Wendepol
d Läufer
e Läuferwicklung
f Ausgleichwicklung
g Kommutator
h Kohlebürsten
i Läuferwelle
k Wälzlager
l Ritzel
m Getriebeschutzkasten
n Schmierdeckel
o Luftaustritt

und dazwischen die Wendepole angeordnet. Alle Haupt- und Wendespulen sind aus blankem Kupferband gewickelt und gegen Eisen sorgfältig isoliert. Die Kompensationswicklungen sind in gestanzten Nuten der Hauptpole untergebracht und gewährleisten eine gute Kommutierung. Zur Drosselung bzw. zur Dämpfung von Überspannungen ist diese Wicklung besonders gut gegen Eisen isoliert.

Das Motorgehäuse hat mehrere große Öffnungen, die durch abnehmbare Deckel verschlossen sind (Bild 201). Dadurch sind die vier Bürstenhalter mit je vier Bürsten gutzugänglich. Das Blechpaket des Läufers ist aus 0,5 mm dicken, einseitig lackierten Blechen geschichtet und hat bei diesem Motor einen Außendurchmesser von 720 mm. Die Läuferumfangsgeschwindigkeit erreicht maximal einen Wert von 92 m/s. Die Lauffläche des Kommutators hat bei diesem Motor einen Durchmesser von 600 mm, so daß sich bei der maximalen Drehzahl von 1820 U/mfn, die einer Höchstgeschwindigkeit der Lokomotive von 120 km/h entspricht, eine Umfangsgeschwindigkeit von 79 m/s ergibt.

Die Läuferwicklung dieses Motors liegt in 66 Nuten des Läuferkernes, und zwar sind in jeder Nut sieben Leiter nebeneinander angeordnet. Die Wickelköpfe sind gegen Eisen sorgfältig isoliert und nach außen gegen Feuchtigkeit, Staub und mechanische Beschädigung geschützt.

Der Motor hat Fremdbelüftung und benötigt etwa 150 m^3 Luft je Minute. Die Kühlluft tritt in diesem Falle auf der Kommutatorseite ein und strömt dann durch besondere Kühlluftkanäle des Ständers und Läufers. Dadurch ist es möglich, eine allzu starke Erwärmung dieses Hochleistungsmotors zu vermeiden. Gleichzeitig wird durch diese Lüftungsweise erreicht, daß die bei Überlastung des Motors eventuell am Kommutator auftretenden Lichtbögen nicht nach geerdeten Teilen des Motors überspringen.

4.4 Elektrische Bremse

Auch bei Gleichstrombahnen ist es ohne weiteres möglich, eine elektrische Bremsung anzuwenden. Sie entspricht im Prinzip der elektrischen Bremse der Wechselstromlokomotive, die im Abschnitt 3.6 behandelt wurde.

Am gebräuchlichsten ist die selbsterregte Widerstandsbremse, die sich wegen ihrer Einfachheit, ihrer Betriebssicherheit und ihrer bequemen Bedienungsweise durchgesetzt hat. Die Fahrmotoren arbeiten nach entsprechender Umschaltung als Hauptstromgeneratoren auf die Anfahrwiderstände. Besonders vorteilhaft ist dabei die völlige Unabhängigkeit vom Fahrdraht, die eigentlich im Interesse der Betriebssicherheit von allen Bremsschaltungen gefordert werden müßte. Um Schalter einzusparen, läßt man dann mehrere Fahrmotoren auf einen gemeinsamen Bremswiderstand arbeiten. Da jedoch die als Generatoren arbeitenden Fahrmotoren unterschiedliche Leerlaufkennlinien aufweisen und auch ihre Selbsterregung zu verschiedenen Zeiten einsetzt, muß man die sogenannte „Kreuzschaltung" anwenden. Bei einer elektrischen Lokomotive mit vier Halbspannungsmotoren wird die Schaltung nach Bild 202 gewählt, während für eine elektrische Lokomotive mit sechs Fahrmotoren eine Schaltung nach Bild 203 in Frage kommt.

Die aus dem Netz fremderregte Widerstandsbremse wird dort angewendet, wo eine sofortige Bremsbereitschaft bei gleichzeitiger feinstufiger Steuerbarkeit verlangt wird. Sie hat den Vorteil, daß eine Bremsung bis zum Stillstand der Lokomotive möglich ist, doch geht die Unabhängigkeit vom Fahrdraht wieder verloren.

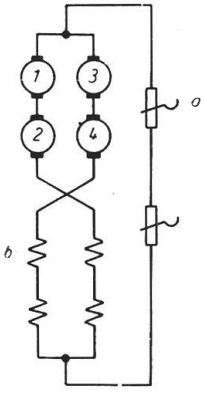


Bild 202
Bremsschaltung für elektrische Lokomotive mit vier Fahrmotoren
a verstellbarer Bremswiderstand
b Erregerwicklung

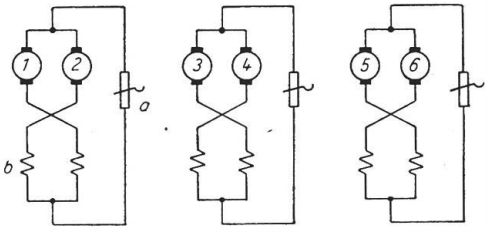


Bild 203
Bremsschaltung für elektrische Lokomotive mit sechs Fahrmotoren
a verstellbarer Bremswiderstand
b Erregerwicklung

Auch für Nutzbremsung sind Gleichstrom-Reihenschlußmotoren gut geeignet. Die Feldwicklung wird dann durch eine besondere Stromquelle gespeist oder über Widerstände an Netzspannung gelegt. Der Ankerstromkreis wird unmittelbar an das Netz angeschlossen, in das zurückgespeist wird. Von der bei Bergfahrt aufgewendeten Energie können etwa 15···30 % durch Nutzbremsung zurückgewonnen werden. Da die zusätzlich erforderlichen Einrichtungen jedoch die Anschaffung und Unterhaltung dieser Lokomotiven verteuern, wird auch bei Gleichstrombahnen von der Nutzbremsung nur dann Gebrauch gemacht, wenn lange und steile Gefällestrecken vorliegen.

4.5 Sonstige Besonderheiten der Gleichstromlokomotiven

Da auch die Hilfseinrichtungen einer Gleichstromlokomotive weitgehend denen einer Wechselstromlokomotive entsprechen, soll an dieser Stelle nur kurz auf die Teile eingegangen werden, die von der früher behandelten Regelausführung abweichen. So ist es z. B. bei Gleichstromlokomotiven üblich, die Wippe des Stromabnehmers mit zwei Schleifstücken auszurüsten und anstelle der Kontaktkohle verhältnismäßig breite Kupferleisten mit Schmiernuten zu verwenden (siehe Bild 98).

5 Aufbau der Wechselstromlokomotiven für 50 Hz

Aus dem Abschnitt 1.2 „Gegenüberstellung der verschiedenen Stromsysteme" und dem Abschnitt 1.3 „Stromversorgung" ist bereits bekannt, daß in den ersten Jahren des elektrischen Zugbetriebes zwischen den drei Stromsystemen Gleichstrom, Drehstrom und Wechselstrom ein heftiger Wettstreit entbrannte. Dieser ist heute zugunsten des Einphasenwechselstromes entschieden.
Da die ständige Weiterentwicklung der Technik gerade in den letzten Jahren günstige Voraussetzungen schuf, um den Drehstrom aus dem öffentlichen Netz auch für Bahnzwecke

wirtschaftlich zu verwenden, soll auch der Aufbau verschiedener Einphasen-Wechselstromlokomotiven für 50 Hz noch kurz behandelt werden. Daß es dabei sehr unterschiedliche konstruktive Lösungen gibt, ist aus den vorgenannten Abschnitten bereits bekannt.
Grundsätzlich unterscheidet man zwischen den Lokomotiven, die den Einphasenwechselstrom 50 Hz, den sie dem Fahrdraht entnehmen, in ihren Fahrmotoren verarbeiten (Direktmotor-Lokomotiven) und solchen Lokomotiven, die den Landesstrom in eine Stromart „umarten", für die sich leistungsfähigere Fahrmotoren bauen lassen. Nach dem Verfahren der Umartung unterteilt man diese Umarter-Lokomotiven in „Umformer-Lokomotiven" und „Gleichrichter-Lokomotiven".

5.1 Direktmotor-Lokomotiven

Direktmotor-Lokomotiven entsprechen in ihrem Aufbau den Einphasenwechselstrom-Lokomotiven für 16⅔ Hz. Nur der Aufbau der Fahrmotoren ist komplizierter, da aus den im Abschnitt 1.2 genannten Gründen bei großen Leistungen die Stromwendung schwieriger ist. Um das Kommutatorfeuer einzuschränken, muß der magnetische Kraftfluß auf ein Drittel des sonst üblichen Wertes herabgesetzt werden. Das bedeutet, daß bei 50-Hz-Motoren die Polzahl erhöht und die Betriebsspannung gegenüber 16⅔-Hz-Motoren verringert werden muß. Wegen der geringeren Spannung werden aber wiederum die Ströme größer, und es macht sich eine Verlängerung der Kommutatoren erforderlich.
Im Laufe der langjährigen Entwicklung wurden verschiedene Typen von 50-Hz-Direktmotoren entwickelt. Alle Konstruktionen zeigen gewisse Schwierigkeiten bei der Stromwendung, die in starkem Kommutatorfeuer und großem Verschleiß an Kohlen und Lamellen zum Ausdruck kommen. Auch sind die 50-Hz-Motoren wesentlich größer und schwerer und somit teurer als 16⅔-Hz-Motoren gleicher Leistung. Legt man jedoch etwa die gleiche Masse und den gleichen Platzbedarf zugrunde, so bleibt die Leistung der 50-Hz-Motoren wesentlich zurück. Das spiegelt sich am deutlichsten in dem spezifischen Wert Masse je Leistungseinheit wider, der bei einem 50-Hz-Motor etwa 6 ··· 8 kg/kW beträgt, während neuzeitliche 16⅔-Hz-Motoren Werte von etwa 4 ··· 5 kg/kW erreichen.
Um trotz der geringeren Leistung der einzelnen Motoren eine ausreichende Gesamtleistung zu erzielen, kann man jede Treibachse durch zwei Motoren antreiben, von denen der eine vor, der andere hinter der Achse angeordnet wird. Diese Bauart wurde bei der E 244 21 angewendet, die im Jahre 1935 von der Firma SSW für die Höllentalbahn gebaut wurde. Die im Vergleich zu 16⅔-Hz-Lokomotiven wesentlich größere Masse der Fahrmotoren wird dadurch ausgeglichen, daß der Hauptumspanner nur knapp die Hälfte der sonst üblichen Ausführung wiegt. Diese Lokomotive ist mit Nockenschaltwerk und Feinreglersteuerung ausgerüstet.
Die später von der Firma AEG gebaute E 244 22 ist mit Tandem-Motoren ausgestattet (Bild 204). Bei dieser Bauart sitzen zwei Läufer und zwei Kommutatoren in einem gemeinsamen Gehäuse auf einer gemeinsamen Welle. Die Betriebsergebnisse sind gut, doch ist ein solcher Motor groß, schwer, kompliziert und teuer.
An dem weiteren Ausbau des 50-Hz-Systems haben auch die Französischen Staatsbahnen (SNCF) einen wesentlichen Anteil, indem sie in den Jahren 1950 bis 1954 für ihr weit verzweigtes 50-Hz-Netz vier neue 50-Hz-Lokomotiven entwickelten. Eine davon, die Type BB 13000, ist eine Direktmotor-Lokomotive mit vier 18poligen, unkompensierten Einphasen-Reihenschlußmotoren. Obgleich sich diese Fahrzeuge im Betrieb gut bewährt haben,

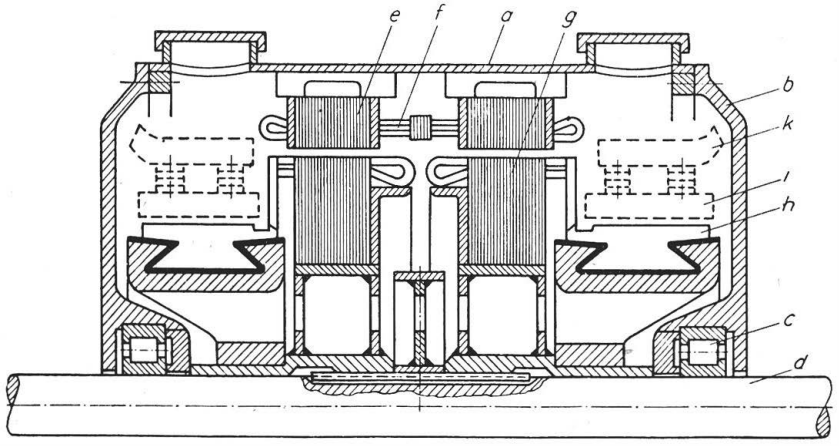


Bild 204. Längsschnitt durch einen Tandem-Motor

a Motorgehäuse
b Lagerschild
c Wälzlager
d Ankerwelle
e Ständereisenpaket
f Ständerwicklung
g Ankereisenpaket
h Kommutator
k Bürstenhalter
Kohlebürsten

ist mit einer weiteren Entwicklung derartiger Direktmotor-Lokomotiven nicht zu rechnen, da die Umarter-Lokomotiven wesentlich günstigere Möglichkeiten bieten.

5.2 Umformer-Lokomotiven

Bei den Umformer-Lokomotiven wird der Einphasen-Wechselstrom 50 Hz, der dem Fahrdraht entnommen wird, durch rotierende Maschinen in Drehstrom oder in Gleichstrom umgeformt. Diese Stromarten gestatten den Bau wesentlich einfacherer und leistungsfähigerer Fahrmotoren, als das bei Einphasen-Wechselstrom möglich ist.

5.21 Umformer-Lokomotiven mit Drehstromfahrmotoren

So bietet z. B. der leichte, einfache und robuste, kommutatorlose Drehstrom-Asynchronmotor mancherlei Vorteile, und zwar in der einfachsten Form mit Kurzschlußläufer oder mit Schleifringläufer. Die mangelhafte Steuerbarkeit und die starre Drehzahlcharakteristik (Nebenschlußkennlinie) müssen dann allerdings in Kauf genommen werden.

Will man jedoch die Schwierigkeiten vermeiden, die bei der Zuführung von Drehstrom infolge der komplizierten Fahrleitung entstehen, so muß man den Einphasen-Wechselstrom 50 Hz auf der Lokomotive in Drehstrom umformen. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Der im Jahre 1917 erstmalig in Nordamerika verwendete Phasenumformer (Bild 205) wurde im Jahre 1924 von dem Ungarn Kando weiterentwickelt (Bild 206). Dadurch wurde es möglich, die einphasige Spannung von 15000 V in einen dreiphasigen Wechselstrom von rund 1000 V umzuformen und damit einen großen Drehstrom-Asynchronmotor anzutreiben. Dieser überträgt dann durch Stangen und einen sogenannten Kando-Gelenk-

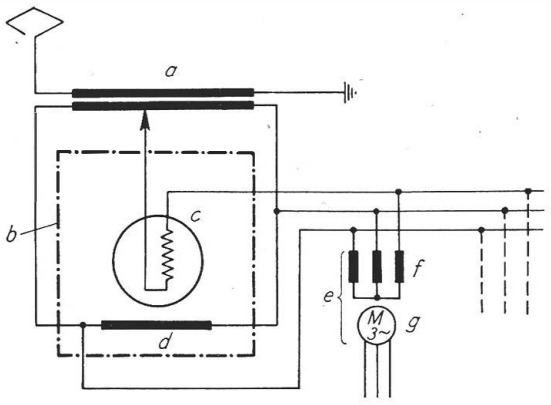


Bild 205
Schaltbild einer Asynchron-Phasenumformer-Lokomotive

a Umspanner
b Asynchron-Phasenumformer
c Läuferwicklung
d Ständerwicklung
e Fahrmotor
f Ständerwicklung des Fahrmotors
g Schleifringläufer des Fahrmotors

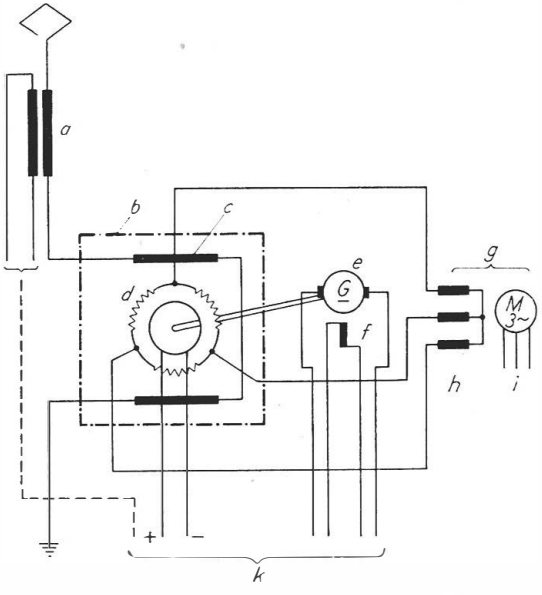


Bild 206
Schaltbild der Kando-Umformerlokomotive

a Umspanner
b Phasenumformer
c Einphasenwicklung im Ständer
d Mehrphasenwicklung im Ständer
e Erregergenerator
f Erregerwicklung
g Fahrmotor
h Ständerwicklung des Fahrmotors
i Schleifringläufer des Fahrmotors
k automatische Anlaß- und Stabilisierungseinrichtung

rahmen die Antriebsleistung auf die vier Treibradsätze. Durch Polumschaltung werden vier Frequenzen erreicht, die wiederum die vier Geschwindigkeitsstufen von 100, 75, 50 und 37,5 km/h bestimmen. Das Überschalten geschieht über besondere Wasserwiderstände. Es ist ein ungewohntes Bild, wenn bei starker Erwärmung des Wassers leichte Dampfwolken aus den beiden schornsteinähnlichen Aufsätzen entweichen, oder diese elektrischen Lokomotiven zum Wassernehmen unter einem Wasserkran hält. Um Raum und Masse zu sparen, baute Kando seine Umformer für die volle Fahrdrahtspannung, vermied also den sonst üblichen Trafo. Der äußerst komplizierte Aufbau des mechanischen Teiles und der elek-

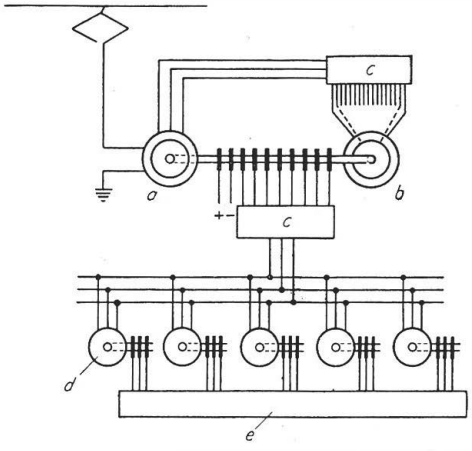


Bild 207

Schaltbild einer elektrischen Lokomotive mit Phasen- und Frequenzumformung nach Kando-Ratkovszky

a Phasenumformer
b Frequenzumformer
c Schaltwerk
d Fahrmotor
e Wasserwiderstand

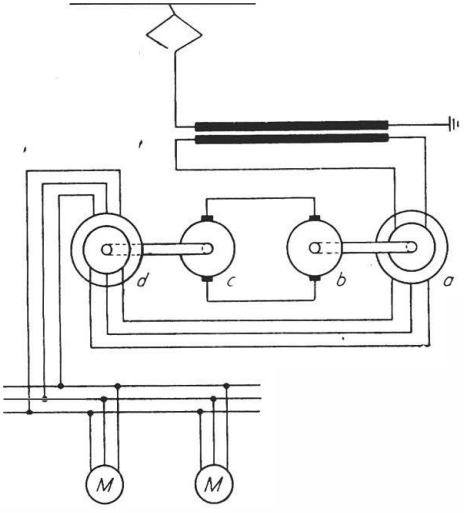


Bild 208

Prinzipschaltbild der Umformer-Lokomotive CC 14 000 (SNCF)

a Phasenumformer
b Gleichstromgenerator
c Gleichstrommotor
d Frequenzumformer

trischen Ausrüstung erforderte jedoch hohe Anschaffungs- und Unterhaltungskosten, so daß sich diese Bauart nicht durchsetzen konnte.

Um Geschwindigkeiten über 100 km/h und Einzelachsantrieb zu ermöglichen, verbesserte Ratkovszky, der Chefkonstrukteur der Ganz-Werke in Budapest, das Kandosystem durch zusätzlichen Einbau eines Periodenumformers (Bild 207). Dieser erlaubt eine stetige Veränderung der Frequenz von 0···125 Hz und somit eine gute Steuerbarkeit. Um mehrere Anfahr- und Zwischenstufen zu erreichen, arbeiten die Motoren auf einen gemeinsamen Wasserwiderstand. Diese Bauart hat sich seit dem Jahre 1950 in Ungarn bei Schnellzuglokomotiven mit der ungewohnten Achsfolge Bo'Co' gut bewährt (siehe Bild 278).

Nach einem ähnlichen Prinzip arbeiten die bei den Französischen Staatsbahnen (SNCF) entwickelten Güterzuglokomotiven vom Typ CC 14000 (Bild 208). Die stetige Frequenz-

steuerung erreicht man durch einen zwischengeschalteten Leonardsatz. Der Phasenumformer ist wegen der hohen Fahrdrahtspannung (25 kV) an einen Trafo angeschlossen. Der Phasenumformer treibt den Gleichstromgenerator an, während der zum Leonardsatz gehörende Gleichstrommotor mit dem Frequenzumformer gekuppelt ist. Der Dreiphasenstrom veränderlicher Frequenz wird dann den Fahrmotoren zugeführt, die als Kurzschlußläufer ausgeführt sind.

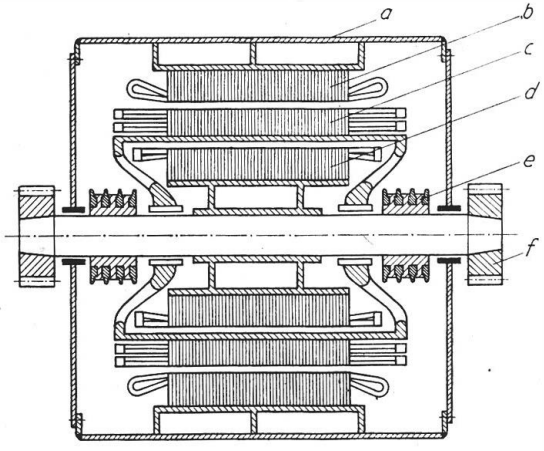


Bild 209
Längsschnitt durch den Krupp-Motor

a Gehäuse
b Ständer
c Zwischenläufer
d Läufer
e Schleifringe
f Ritzel

Eine andere interessante Lösung ist die Krupp-Umformerlokomotive E 244 31, die im Jahre 1935 nach Entwürfen von Prof. Punga und Dr. Schön für die Höllentalbahn entwickelt wurde. Bei dieser elektrischen Lokomotive mit Einzelachsantrieb sind Phasenumformer und Fahrmotor praktisch in einem Bauteil vereinigt. Der Motor besteht aus dem Ständer, dem Läufer und einem sogenannten Zwischenläufer, der als Hohltrommel mit Hilfe besonderer Stützlager sich frei um die Ankerwelle drehen kann (Bild 209). Dieser Zwischenläufer bildet mit dem Ständer zusammen den Phasenumformer, jedoch mit dem Läufer zusammen den Drehstrommotor. Das Drehmoment wird vom Ständer über den Zwischenläufer, der das Drehfeld liefert und den eigentlichen Läufer auf den Treibradsatz übertragen. Dieser Motor zeigt das Verhalten eines Asynchron-Drehstrommotors.
Um eine bessere Geschwindigkeitssteuerung zu erreichen, wird jede Achse noch durch einen zusätzlichen Drehstrommotor angetrieben, der aus der mehrphasigen Ständerwicklung des Krupp-Motors gespeist wird. Bei entsprechender Schaltung, nämlich

1. Krupp-Motor und Drehstrommotor in Kaskadenschaltung,
2. Krupp-Motor allein oder
3. Drehstrommotor allein (Krupp-Motor arbeitet nur als Phasenumformer)

kann man drei Geschwindigkeitsstufen (34, 59 und 85 km/h) erreichen. Zum Anfahren und für den Übergang von einer Fahrstufe zur anderen dienen Wasserwiderstände. Der Leistungsfaktor wird selbsttätig auf $\cos \varphi = 1$ gehalten; mit geringem Aufwand ist Nutzbremsung möglich.

Die komplizierte Ausrüstung erfordert jedoch hohe Anschaffungs- und Unterhaltungskosten, so daß auch diese Bauart nicht weiterentwickelt wurde.

5.22 Umformer-Lokomotiven mit Gleichstromfahrmotoren

Trotz seines einfachen und robusten Aufbaues ist der Drehstrommotor wegen der schlechten Steuerbarkeit als Bahnmotor nicht recht geeignet. Wesentlich günstiger ist das Betriebsverhalten des Gleichstrommotors.

Von der Möglichkeit, den Einphasenwechselstrom mit Hilfe rotierender Umformer in Gleichstrom zu verwandeln, machte man in den 20er Jahren in den USA erstmalig Gebrauch, ging dabei jedoch von 25 Hz und 11 kV Fahrdrahtspannung aus. Im Jahre 1952 entwickelten dann die Französischen Staatsbahnen (SNCF) für ihre 50-Hz-Strecken derartige Umformer-Lokomotiven, (Typ CC 14 100), die im schweren Güterzugdienst eingesetzt wurden. Nach dem Schaltplan (lt. Bild 210) treibt dann ein Synchronmotor, der über einen Trafo mit festem Übersetzungsverhältnis aus der Fahrleitung gespeist wird, zwei Gleichstrom-Generatoren und den Erregergenerator an. Diese arbeiten dann in Leonardschaltung auf die Fahrmotoren, die ein völlig gleichmäßiges Drehmoment erzeugen. Auf diese Weise kann die Reibungszugkraft restlos ausgenutzt werden, was z. B. daraus hervorgeht, daß diese vierachsige Lokomotive mit 84 Mp Reibungslast und einer Dauerleistung von 1840 kW schwere Güterzüge von 1800 t auf Steigungen bis zu $11^0/_{00}$ befördert. Durch den vierfachen Einbau der Lokomotivleistung ergeben sich jedoch eine große Masse je Leistungseinheit und ein schlechter Wirkungsgrad. Derartige Lokomotiven wurden auch im schweren Grubenbetrieb mit Erfolg eingesetzt.

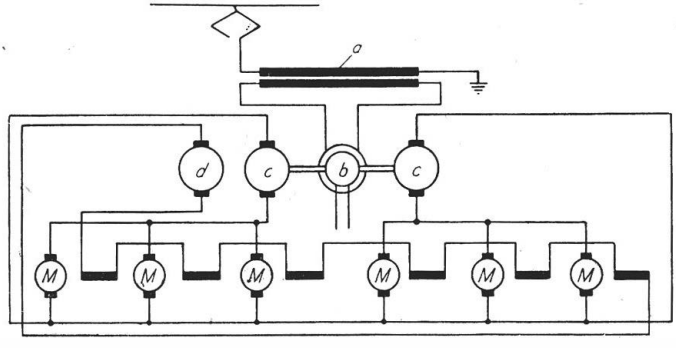


Bild 210. Schaltplan der Motorgenerator-Lokomotive CC 14 100 (SNCF)
a Hauptumspanner b Synchronmotor c Gleichstromgenerator d Erregergenerator

5.3 Gleichrichter-Lokomotiven

Ruhende Umartergeräte sind wesentlich leichter als Motorgeneratoren und benötigen keine ständige Wartung. Sie besitzen einen hohen Wirkungsgrad und haben daher in ortsfesten Unterwerken die Maschinenumformer fast völlig verdrängt. Bei Gleichrichter-Lokomotiven liegen jedoch etwas andere Verhältnisse vor, da durch die Fahrleitung nicht Dreiphasen-,

sondern nur Einphasenstrom zugeführt wird. Auch soll die Sekundärspannung nicht konstant bleiben, sondern sich von Null bis zum höchsten Wert möglichst stufenlos verändern lassen. Ein durch mehranodige Gefäße gleichgerichteter Drehstrom ist ein Gleichstrom, der nur noch einige Oberwellen hoher Ordnungszahl aufweist. Dagegen besteht gleichgerichteter Einphasenstrom aus gleichgerichteten, nicht überlappten Halbwellen mit hohem Oberwellengehalt und kann durch zusätzliche Drosseln nur teilweise geglättet werden. Die Fahrmotoren sind dann als Wellenstrommotoren auszulegen. Je nach der Art der verwendeten Gleichrichter ist der Aufbau dieser Lokomotiven zum Teil recht unterschiedlich.

5.31 Gleichrichter-Lokomotiven mit mehranodigen Gleichrichtern

Die erste Lokomotive dieser Art wurde im Jahre 1936 für die Höllentalbahn entwickelt. Um einen möglichst guten Wirkungsgrad der Gleichrichter zu erreichen, wurden die Motoren für große Spannungen zwischen 1200 und 1500 V ausgelegt, was allerdings auch eine hohe Motormasse zur Folge hatte. Die von der Firma AEG gebaute E 244 01 ist mit einer beschränkten Gittersteuerung ausgerüstet (Bild 211). Die Fahrdrahtspannung wird

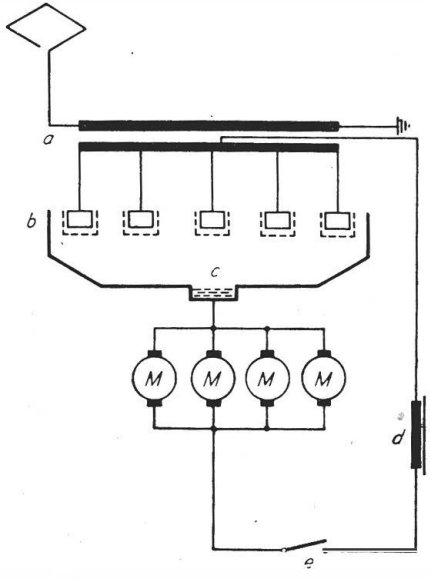


Bild 211. Schaltbild der Gleichrichter-Lokomotive E 244 01 (AEG)

a Hauptumspanner
b Anode mit Gitter
c Kathode
d Glättungsdrossel
e Schnellschalter

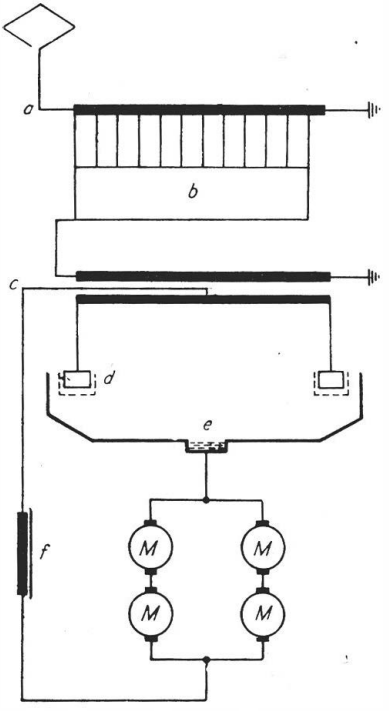


Bild 212. Schaltbild der Gleichrichter-Lokomotive E 244 11 (BBC)

a Steuerumspanner
b Schaltwerk
c Gleichrichterumspanner
d Anode mit Gitter
e Kathode
f Glättungsdrossel

zunächst einem Gleichrichtertrafo zugeführt, an dem ein Großgleichrichter angeschlossen ist. Der gleichgerichtete Strom wird dann den Fahrmotoren zugeführt. Die Motorspannung wird durch den mit zwei Spannungsstufen versehenen Umspanner und durch Verändern der Motorschaltung (Reihenparallel- bzw. Parallelschaltung) grobstufig gesteuert. Auch von der Feldschwächung wird Gebrauch gemacht. Die Gittersteuerung dient dann zur Feineinstellung.

Eine zweite Gleichrichterlokomotive E 244 11 wurde von der Firma BBC gebaut. Einem ungesteuerten Gleichrichter wird über eine Hochspannungssteuerung eine ständig veränderliche Spannung zugeführt (Bild 212). Von den Enden der Niederspannungsseite des Gleichrichtertrafos wird der Strom gleichzeitig auf die zehn Hauptanoden des Gleichrichters verteilt (nur zwei eingezeichnet). Er fließt dann von der Kathode über die zwei parallel geschalteten Motorengruppen und über eine Glättungsdrossel zur Mitte der Niederspannungswicklung. Die Gitter des Gleichrichters dienen, wie bei der AEG-Lokomotive, zum schnellen Abschalten des Motorstromes.

Beide Gleichrichterlokomotiven haben einen etwas komplizierteren Aufbau als Direktmotor-Lokomotiven und weisen daher auch stets etwas höhere Unterhaltungskosten auf. Sie sind jetzt mehr als 25 Jahre im Betrieb und haben sich gut bewährt.

5.32 Gleichrichter-Lokomotiven mit einanodigen Gleichrichtern

Gleichrichter-Lokomotiven mit einanodigen Gleichrichtern können mit Ignitrons oder mit Excitrons ausgerüstet werden. Das Ignitron ist ein pumpenloser, einanodiger Gleichrichter, bei dem die Zündeinrichtung jedes einzelnen Gefäßes bei jeder zweiten Halbwelle in Tätigkeit tritt (Bild 213 a). Es ist kein ständiger Erregerlichtbogen vorhanden. Dieses neue Umrichterelement wurde im Jahre 1949 in den USA erstmalig im Bahnbetrieb erprobt. Igni-

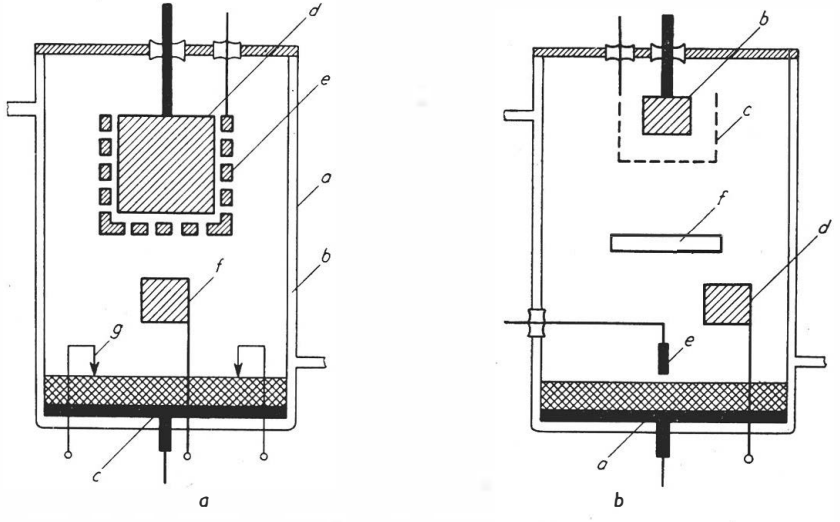


Bild 213. Aufbau eines Ignitrons (a) und eines Excitrons (b)

a Vakuumgefäß
b Wassermantel
c Quecksilber-Kathode
d Anode
e Gitter
f Hilfsanode
g Zünder

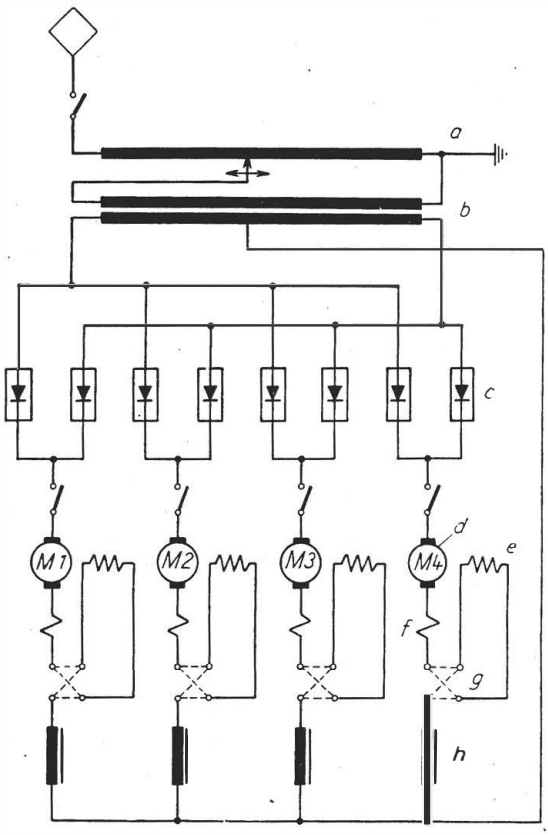


Bild 214
Schaltplan der Ignitronlokomotive BB 12 000 (SNCF)

a Steuerumspanner
b Gleichrichterumspanner
c Ignitron
d Wellenstrommotor
e Erregerwicklung
f Kompensations- und Wendefeldwicklung
g Fahrtrichtungswender
h Glättungsdrossel

trons sind im Vergleich zu mehranodigen Gleichrichtern wesentlich leichter und kleiner, auch ist die Gefahr der Rückzündung geringer. Die Geräte sind jedoch temperaturempfindlich und müssen im Betrieb durch Wasser oder Luft ständig gekühlt werden.

An der Weiterentwicklung der Ignitron-Lokomotiven haben die Sowjetunion und auch Frankreich große Verdienste. Bild 214 zeigt den Schaltplan der Ignitron-Lokomotive BB 12000, die von der SNCF für die nordfranzösischen Strecken entwickelt wurde. Auch bei dieser elektrischen Lokomotive findet eine Hochspannungssteuerung Anwendung. Vom Gleichrichtertrafo werden die Ignitrons in Gleichrichter-Zweiwegeschaltung gespeist. In den Stromkreis eingeschaltete Drosseln sorgen für ausreichende Glättung des durch die Gleichrichtung welligen Stromes.

Der Wirkungsgrad dieser Ignitron-Lokomotiven beträgt bei $0{,}7\,V_{max}$ 82···84 %, der Leistungsfaktor bei der gleichen Geschwindigkeit 0,91···0,93. Diese Werte sind also günstiger als bei Lokomotiven mit Direktmotoren.

Ähnlich aufgebaut sind die mit Excitrons ausgerüsteten Gleichrichterlokomotiven. Das Excitron ist ebenfalls ein einanodiges, quecksilberdampfgefülltes Stromrichtergefäß mit Dauerzündung, bei dem der Zündlichbogen während des Betriebes durch eine Hilfsanode

ständig aufrechterhalten wird. Der Aufbau eines Excitrons ist aus Bild 213 b zu erkennen. Excitron-Lokomotiven wurden erstmalig im Jahre 1954 auf normalspurigen Strecken des Rheinischen Braunkohlenbergbaues in Dienst gestellt. Sie sind für Einphasenwechselstrom 50 Hz und eine Fahrdrahtspannung von 6 kV gebaut und haben sich gut bewährt.

5.33 Gleichrichter-Lokomotiven mit Trockengleichrichtern

Die neuen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Halbleiter-Gleichrichter haben für das 50-Hz-System größte Bedeutung. Die neuen Halbleiter-Elemente aus Germanium und neuerdings auch aus Silizium weisen gegenüber den bisher verwendeten Gleichrichtern mancherlei Vorteile auf. Sie sind gekennzeichnet durch einen großen Leistungs- und Spannungsbereich, hohe Betriebssicherheit und Stoßfestigkeit, einfachen Aufbau bei kleiner Masse und geringem Platzbedarf, hohe Verschleißfestigkeit, lange Lebensdauer, Wartungsfreiheit und geringen Aufwand für zusätzliche elektrische Einrichtungen. Bei einer Silizium-Gleichrichterzelle mit Kühlblock beträgt der Wert Masse je Leistungseinheit nur etwa 0,1 kg/kW. Vorteilhaft ist auch, daß selbst bei großen Leistungen Luftkühlung ausreicht. Die Silizium-Gleichrichter werden meist in die Luftschächte der Fahrmotoren eingebaut. Sie erfordern dann keinen zusätzlichen Raum und auch keine besonderen Belüftungseinrichtungen.

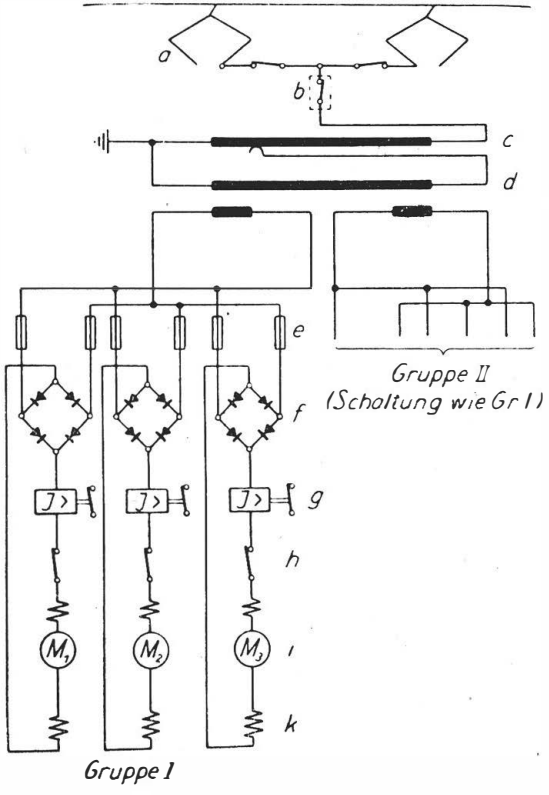


Bild 215
Starkstromkreis der 50-Hz-Gleichrichter-Lokomotive

a Stromabnehmer
b Hauptschalter
c Steuerumspanner
d Gleichrichterumspanner
e Schnellsicherung
f Gleichrichter
g Motor-Überstromrelais
h Motortrennschütz
i Fahrmotor
k Glättungsdrossel

Nachteilig ist nur, daß es zur Zeit noch recht schwierig ist, die geforderte Reinheit der Halbleiter mit einfachen Mitteln zu erreichen. Auch muß man im allgemeinen auf Nutzbremsung verzichten, sobald derartige Halbleiter-Gleichrichter im Unterwerk oder auf den elektrischen Lokomotiven Verwendung finden. Ein großer Nachteil der Halbleiter-Gleichrichter liegt noch in ihrer großen Empfindlichkeit gegenüber raschem Spannungsanstieg und gegenüber Überspannungen und Überströmen. Hier können zur Zeit nur umfangreiche Schutzeinrichtungen helfen.

Der Wirkungsgrad eines Silizium-Gleichrichters beträgt 99,5% und ist somit außerordentlich günstig im Vergleich zu Ignitron-Gleichrichtern mit einem Wirkungsgrad von etwa 95%. Es ist damit zu rechnen, daß die hervorragenden Eigenschaften der Halbleiter-Gleichrichter die gesamte Entwicklung des 50-Hz-Systems entscheidend beeinflussen werden.

Gleichstromlokomotiven mit Halbleiter-Gleichrichtern wurden in letzter Zeit bei der Deutschen Bundesbahn und auch im Ausland mit bestem Erfolg erprobt. Auch für die Deutsche Reichsbahn sind zur Zeit Gleichrichter-Lokomotiven im Bau (siehe Anhang 5). Während für die Gleichrichtung des Motorstromes ursprünglich einanodige Gefäßgleichrichter Verwendung finden sollten, entschloß man sich später infolge der schnellen Entwicklung der Halbleiter-Gleichrichter für den Einbau von Siliziumgleichrichtern. Diese wurden im Maschinenraum so angeordnet, daß später gegebenenfalls auch die Möglichkeit besteht, in diesen Lokomotiven ohne allzu große Änderungen Gefäßgleichrichter zu erproben.

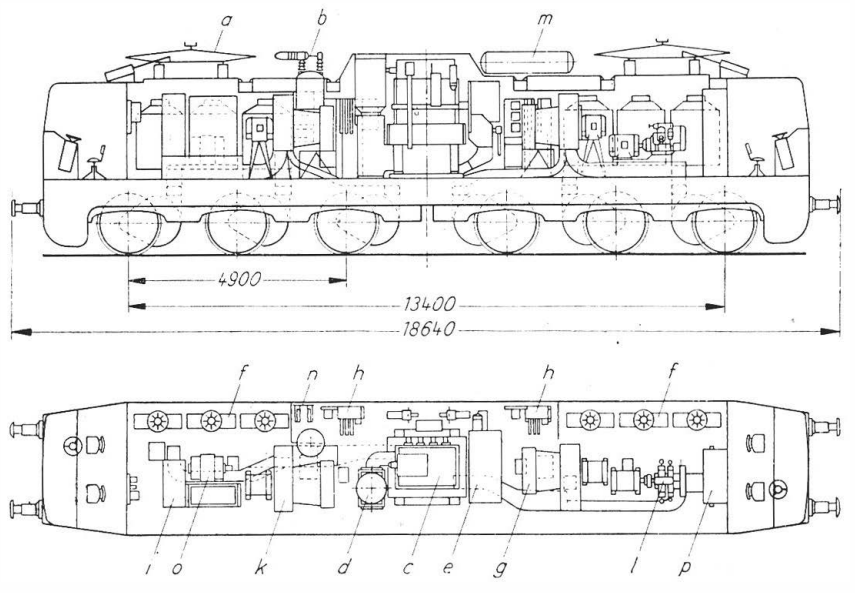


Bild 215a. Anordnung der elektrischen Ausrüstung der 50-Hz-Gleichrichter-Lokomotive

a Stromabnehmer
b Druckgasschnellschalter
c Hauptumspanner
d Ölkühler mit Lüfter
e Schaltwerk
f Silizium-Gleichrichter
g Glättungsdrossel
h Hochspannungs-Gerätegerüst
i Ladegerät
k Fahrmotor-Lüftersatz
l Luftpresser
m Hauptluftbehälter
n Shuntwiderstände für Fahrmotore
o Arno-Umformer
p Gerüst für Druckluftgeräte

Die Leistungssteuerung erfolgt hochspannungsseitig über ein Schaltwerk mit 26 Fahrstufen. Bild 215 zeigt den vereinfachten Schaltplan der Starkstromkreise. Der als Mantelumspanner ausgebildete Hauptumspanner besteht aus dem Steuerumspanner und dem Gleichrichterumspanner. Letzterer hat eine geteilte Sekundärwicklung, so daß jeweils drei Fahrmotoren über die entsprechenden Gleichrichter an einen Wicklungsteil angeschlossen sind. Die Anordnung der elektrischen Geräte ist aus Bild 215 a zu ersehen.
Der mechanische Teil dieser Lokomotiven entspricht etwa dem der für die Polnischen Staatsbahnen entwickelten Gleichstromlokomotiven. Auf diese Weise konnte kostspielige und zeitraubende Entwicklungsarbeit eingespart werden.

6 Elektrische Lokomotiven für verschiedene Stromsysteme

Aus der geschichtlichen Entwicklung des elektrischen Zugbetriebes (Abschnitt 1.1) ist bekannt, daß die einzelnen Länder bei der Wahl der Stromart zum Teil recht unterschiedliche Wege gegangen sind. Auch zeigte die Gegenüberstellung der verschiedenen Stromsysteme (Abschnitt 1.2), daß die Wahl der Stromart nicht nur von der günstigsten Stromversorgung abhängt, sondern auch weitgehend von der Eignung des Antriebsmotors als Bahnmotor beeinflußt wird. So ist es zu erklären, daß in Europa zur Zeit fünf verschiedene Stromsysteme Verwendung finden, und zwar:

1. Gleichstrom 1,5 kV
2. Gleichstrom 3,0 kV
3. Drehstom 16⅔ Hz, 3,6 kV
4. Einphasenwechselstrom 16⅔ Hz, 15,0 kV
5. Einphasenwechselstrom 50 Hz, 25,0 kV

Vergleicht man die elektrische Ausrüstung einer Wechselstromlokomotive für 16⅔ Hz mit der einer 50-Hz-Lokomotive oder sogar mit der einer Gleichstromlokomotive, so stellt man sofort große Abweichungen fest. Es ist also nicht ohne weiteres möglich, eine für ein bestimmtes Stromsystem entwickelte elektrische Lokomotive auch auf Strecken mit einer anderen Stromart oder Frequenz einzusetzen. Dadurch ergeben sich an den Übergängen große betriebliche Schwierigkeiten.

Man unterscheidet folgende Stoßstellen:

a) Gleichstrom 3 kV + Gleichstrom 1,5 kV,
   z. B. am Grenzübergang Belgien/Frankreich

b) Einphasenwechselstrom 16⅔ Hz, 15 kV + Einphasenwechselstrom 50 Hz, 25 kV,
   z. B. am Grenzübergang Westdeutschland/Frankreich oder Schweiz/Frankreich

c) Einphasenwechselstrom 50 Hz, 25 kV + Gleichstrom 1,5 kV,
   z. B. bei den beiden Stromsystemen innerhalb Frankreichs

d) Einphasenwechselstrom 50 Hz, 25 kV + Gleichstrom 3 kV,
   z. B. am Grenzübergang Frankreich/Belgien

e) Einphasenwechselstrom 16$^2/_3$ Hz, 15 kV + Drehstrom 16⅔ Hz, 3,6 kV,
   z. B. am Grenzübergang Österreich/Italien

f) Drehstrom 16⅔ Hz, 3,6 kV + Gleichstrom 3 kV,
   z. B. innerhalb Italiens.

Auch wenn man für die Überbrückung einer solchen Stoßstelle die einfachste Lösung wählt, nämlich das Auswechseln der Lokomotive, so muß man doch gewisse zusätzliche Anlagen schaffen. Von der gleichen Stelle, auf der die elektrische Lokomotive des Systems A zum Halten kam, muß nämlich die elektrische Lokomotive des Systems B weiterfahren können. Es ist dann am einfachsten, wenn man die beiden unterschiedlichen Fahrleitungen durch eine kurze stromlose Schutzstrecke miteinander verbindet. Überfährt dann der einfahrende Zug mit einer elektrischen Lokomotive des Stromsystems A die Schutzstrecke mit gesenkten Stromabnehmern, so braucht nur diese Lokomotive mit einem nichtfahrdrahtgebundenen Schleppfahrzeug, z. B. Dampf- oder Diesellokomotive umgesetzt zu werden und die neue elektrische Lokomotive des Stromsystems B kann dann an den Zug heranfahren.

Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, einen bestimmten Streckenabschnitt auf beide Stromsysteme umzuschalten. Doch auch in diesem Falle ist es erforderlich, die umschaltbare Fahrleitung durch isolierte Schutzstrecken von den Fahrleitungen mit festem Stromsystem zu trennen. Die Stromversorgung eines solchen Systemwechselbahnhofes ist also verhältnismäßig kompliziert und gibt zu vielerlei betrieblichen Schwierigkeiten und Störungen Anlaß.

Wesentlich zweckmäßiger ist es, auf solchen Strecken Triebfahrzeuge einzusetzen, die für beide Stromsysteme eingerichtet sind. Man unterscheidet dann zwischen elektrischen Lokomotiven

für mehrere Spannungen,
für verschiedene Frequenzen und
für mehrere Stromarten.

Es sei jedoch besonders betont, daß es vom wirtschaftlichen Standpunkt aus nicht vertretbar ist, derartige Fahrzeuge in großer Stückzahl zu bauen. Sie sind wesentlich komplizierter als die sonst üblichen Bauarten und viel teurer und störanfälliger. Daher ist in jedem Falle genau zu untersuchen, ob die Beschaffung und der Einsatz derartiger Spezialfahrzeuge überhaupt wirtschaftlich sind.

6.1 Mehrspannungs-Lokomotiven

Bei den mit Gleichstrom betriebenen Vollbahnen kommen nur die beiden Spannungen 3 kV und 1,5 kV in Frage. Da man heute Gleichstrom-Motoren nur bis zu einer Spannung von 1,5 kV baut, sind bei 3-kV-Lokomotiven stets zwei Motoren zu einer Gruppe zusammengefaßt und in Reihe geschaltet. Beim Übergang auf ein Streckennetz mit 1,5 kV Fahrdrahtspannung ist es dann lediglich erforderlich, von der Serienschaltung auf Parallelschaltung überzugehen. Auch die Hilfsbetriebe und die Zugheizung müssen für eine zweite Spannung ausgelegt werden.

6.2 Mehrfrequenz-Lokomotiven

Hier kommen Einphasenwechselstrom-Lokomotiven in Frage, die auf Strecken mit gleicher Fahrdrahtspannung, aber verschiedener Frequenz, z. B. 16⅔ und 50 Hz, eingesetzt werden können. Man erreicht dies entweder durch den Einbau von Wechselstrommotoren, die mit zwei verschiedenen Frequenzen betrieben werden können oder durch Verwendung von Gleichstrommotoren, die über einen auf der Lokomotive angeordneten Umarter betrieben

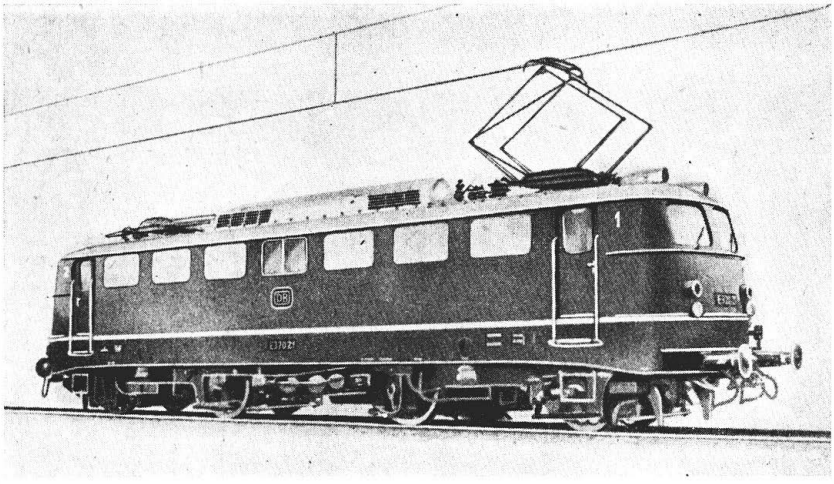


Bild 216. Zweifrequenz-Lokomotive der Deutschen Bundesbahn (E 320 21)

werden. Im ersten Falle müssen der Motor für 50 Hz und der Trafo für 16⅔ Hz ausgelegt werden, beide Teile also nach der ungünstigsten Seite hin.

Bei Gleichrichter-Lokomotiven (siehe Abschnitt 5.3) arbeiten die Antriebsmotoren mit Gleichstrom. Die Hilfsmotoren können vom Haupttrafo aus mit Einphasenwechselstrom 16⅔ Hz oder 50 Hz gespeist werden. Sie können über einen Umformer Drehstrom erhalten oder über Trockengleichrichter mit Gleichstrom betrieben werden. Derartige Lokomotiven gewinnen infolge der ständigen Ausweitung des 50-Hz-Systems ständig an Bedeutung und wurden in verschiedenen Ausführungen bereits in Österreich, in der Schweiz und in Frankreich gebaut. Die von den Firmen Siemens und Krauß-Maffei für die Deutsche Bundesbahn entwickelte Zweifrequenz-Lokomotive E 320 21 wurde Ende 1959 in Betrieb genommen (Bild 216). Sie ist für die Spannungen 15 kV, 20 kV und 25 kV ausgelegt und kann mit

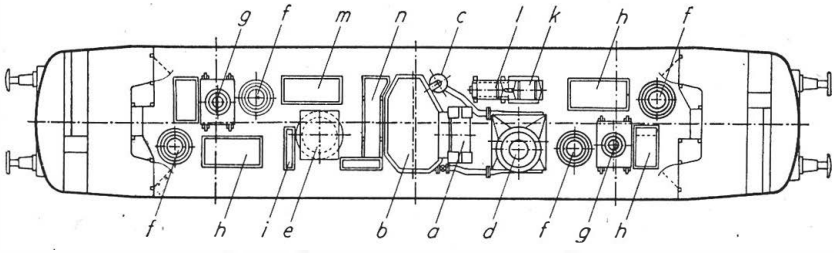


Bild 217. Anordnung der elektrischen Ausrüstung der E 320 21

a Hochspannungsschaltwerk
b Umspanner
c Ölpumpe für Umspanner
d Lüfter für Umspanner
e Bremswiderstand mit Lüfter
f Fahrmotorlüfter mit Siliziumgleichrichter
g Glättungsdrossel mit Lüfter
h Gerüst für Hauptstromgeräte
i Gerüst für Schutzgeräte
k Umformer
l Luftpresser
m Gerüst für Hilfsbetriebe
n Gerüst für Heizung und Druckluftgeräte

16⅔ Hz- und 50 Hz-Bahnstrom betrieben werden. Sie ist mit Silizium-Gleichrichtern und einer elektrischen Bremse ausgerüstet. Die Anordnung der elektrischen Ausrüstung zeigt Bild 217. Sie erreicht mit der Achsfolge Bo'Bo' eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h, wiegt 83 t und leistet bei jeder Frequenz 2500 kW. Beim Übergang von dem einen auf das andere Stromsystem ist nur eine geringfügige Umstellung im Wendekreis der Fahrmotoren erforderlich, die durch ein Relais völlig selbsttätig erfolgt.
Weitere Zweifrequenz-Lokomotiven wurden von den Firmen AEG und BBC für die Deutsche Bundesbahn entwickelt und befinden sich zur Zeit in Erprobung.

6.3 Mehrstrom-Lokomotiven

Bei der Kombination von Einphasenwechselstrom und Gleichstrom wird stets ein Umarter verwendet, der entweder nur für den Wechselstrom- oder nur für den Gleichstrombetrieb ausgelegt wird, je nachdem, mit welchen Antriebsmotoren die elektrische Lokomotive ausgerüstet ist. Während für die Umartung früher meist Umformer verwendet wurden, werden neuerdings Stromrichter bevorzugt.
In Italien ist es noch erforderlich, Triebfahrzeuge zu entwickeln, die sowohl mit Drehstrom 6,3 kV als auch mit Gleichstrom 3 kV betrieben werden können. Man erreicht dies durch Einbau von Excitron-Gleichrichtern, die den aus der Fahrleitung entnommenen Drehstrom in Gleichstrom umformen.

6.4 Allstrom-Lokomotiven

Unter Umständen ist es sogar erforderlich, Triebfahrzeuge auf Strecken mit mehr als zwei verschiedenen Stromsystemen einzusetzen. Das Ideal ist das Allstrom-Fahrzeug, das so aufgebaut ist, daß es sowohl Gleichstrom verschiedener Spannungen als auch Einphasenwechselstrom verschiedener Frequenzen verarbeiten kann. In diesem Falle müssen die in den Abschnitten 6.1 bis 6.3 genannten Möglichkeiten kombiniert werden. Die Allstrom-Lokomotive ist also am zweckmäßigsten eine Umarterlokomotive, die mit vier Gleichstrommotoren ausgerüstet ist (Bild 218).
Wird dem Fahrdraht Gleichstrom mit einer Spannung von 1,5 kV entnommen, so werden

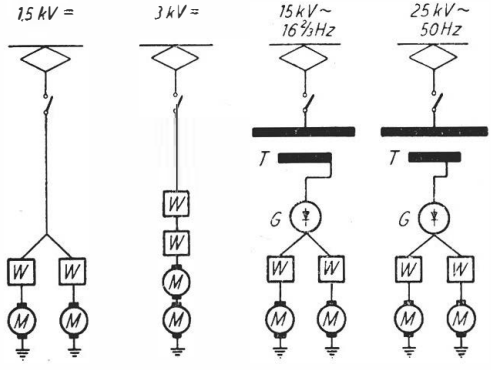


Bild 218
Schaltplan einer Allstrom-Lokomotive
T Transformator
G Gleichrichter mit Glättungsdrossel
W Widerstand
M Gleichstrommotor

zwei Gleichstrommotoren je 1,5 kV parallel, bei 3 kV Fahrdrahtspannung in Reihe geschaltet. Aus diesem Grunde sind auch die Vorwiderstände geteilt. Wird jedoch über die Fahrleitung Einphasenwechselstrom zugeführt, so wird dieser zunächst mit Hilfe eines Gleichrichters in Gleichstrom umgewandelt und geglättet. Durch eine entsprechende Anzapfung am Trafo, die den Spannungsabfall der Gleichrichter und der Drossel berücksichtigt, wird eine Motorspannung von 1,5 kV erzeugt. Auch in diesem Falle haben sich die Halbleiter-Gleichrichter bestens bewährt, da die elektrische Ausrüstung einer solchen Allstrom-Lokomotive verhältnismäßig kompliziert ist und sonst viel Platz und Masse beanspruchen würde.

6.5 Sonstige Bauarten

Als Abschluß dieses Kapitels sei noch auf Systemwechselstellen hingewiesen, bei denen die Art der Stromzuführung verändert wird. Während man bei Fernbahnen im allgemeinen eine Oberleitung verwendet, kommt am Stadtrand von Großstädten mit Stadtbahnen ein Übergang auf Strecken mit Stromschiene in Frage (z. B. bei Bahnen im Umkreis von New York). In diesem Falle müssen die elektrischen Lokomotiven neben den sonst üblichen Scherenstromabnehmern noch zusätzlich mit tiefliegenden Seitenstromabnehmern ausgerüstet sein.
Elektrische Lokomotiven, die im internationalen Verkehr eingesetzt werden und dabei Strecken mit unterschiedlichem Lichtraumprofil befahren, besitzen zwei verschiedene Stromabnehmer. Von denen wird immer nur derjenige aufgerichtet, der dem jeweiligen Profil entspricht. Ein derartiger Stromabnehmerwechsel macht sich z. B. bei elektrischen Lokomotiven erforderlich, die von Strecken der Deutschen Bundesbahn auf Strecken der Schweizerischen Bundesbahnen übergehen.

7 Bewährte elektrische Lokomotiven des In- und Auslandes

Während die bisherigen Ausführungen meist allgemein gehalten waren und nicht auf besondere Lokomotivtypen Bezug nahmen, sollen in diesem Kapitel noch einige bewährte Lokomotiven des In- und Auslandes näher betrachtet werden. Da es meist neuere Konstruktionen sind, lassen sie die Entwicklung während der letzten Jahre deutlich erkennen.
Der Stangenantrieb, der besonders bei hohen Geschwindigkeiten zu betrieblichen Schwierigkeiten führte, ist fast überall durch den Einzelachsantrieb verdrängt worden. Auch ist die Meinung, daß schnellfahrende elektrische Lokomotiven an den äußeren Enden führende Lenk- oder Drehgestelle haben müssen, längst überholt, und zahlreiche Lokomotiven mit zwei Triebdrehgestellen haben inzwischen bewiesen, daß man auch ohne Laufachsen eine gute Kurvenläufigkeit und einen ruhigen Lauf auch bei hohen Geschwindigkeiten erreichen kann. Ein weiterer, sehr wichtiger Grundsatz bei der Neuentwicklung von elektrischen Triebfahrzeugen ist das Streben nach einer Universallokomotive, die im schnellen Reisezugverkehr genauso zweckmäßig und wirtschaftlich eingesetzt werden kann wie im schweren Güterzugdienst. Die Beschränkung auf möglichst wenige Typen ermöglicht auch eine Standardisierung, die eine Entlastung der Industrie, eine Senkung der Herstellungskosten und vor allem auch wesentliche Vorteile bei der Unterhaltung der Fahrzeuge zur Folge hat.

7.1 Wechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn für 16⅔ Hz

Diese Erkenntnisse sind auch bei den deutschen Wechselstromlokomotiven zu finden, die im Anhang 1 zusammengestellt sind. Die an erster Stelle genannten elektrischen Lokomotiven der Baureihe E 04 haben sich im Reisezugdienst sehr gut bewährt und sind auch heute wieder auf den mitteldeutschen Strecken eingesetzt (Bild 219). Sie besitzen nur drei Treibachsen und haben an jedem Ende noch eine Laufachse, die mit der benachbarten Treibachse zu einem Krauß-Helmholtz-Gestell zusammengefaßt ist. Die unsymmetrische Anordnung des Fahrwerkes wird durch die Lagerung des Trafos bedingt und ist aus der Maßskizze (Bild 220) gut zu erkennen. Diese elektrischen Lokomotiven sind infolge des Federtopfantriebes für höhere Geschwindigkeiten gut geeignet und erreichten bereits im Jahre 1933 mit einer Zugmasse von 309 t eine Höchstgeschwindigkeit von über 150 km/h.

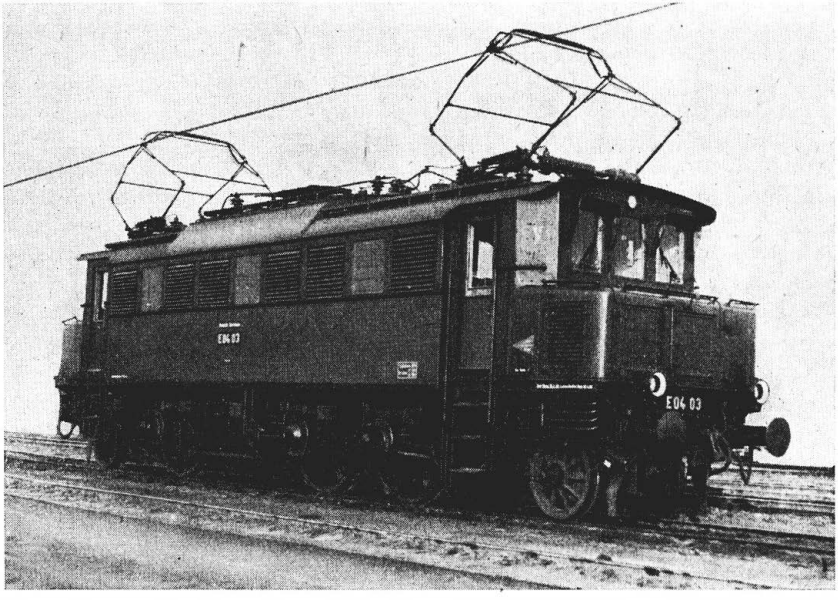


Bild 219. 1'Co1'-Lokomotive der Deutschen Reichsbahn Baureihe E 04

In letzter Zeit kam auch wieder eine Lokomotive der Baureihe E 05 zum Einsatz. Diese Bauart hat ebenfalls die Achsfolge 1'Co1', sie unterscheidet sich jedoch von der Baureihe E 04 dadurch, daß sie fast symmetrisch aufgebaut ist (Bild 221). Dies ist möglich, weil bei dieser Type keine Gestellmotoren, sondern Tatzlagermotoren Verwendung finden, so daß der Raum über der mittleren Treibachse zur Aufstellung des Trafos zur Verfügung steht. Von der Baureihe E 05 sind im ganzen nur 3 Stück gebaut worden. Während die ersten beiden besondere Laufachsgestelle nach der Art der Bissel-Achsen erhielten, wurde die dritte Lokomotive mit Krauß-Helmholtz-Gestellen ausgerüstet, so daß es möglich war, die Höchstgeschwindigkeit auf 130 km/h heraufzusetzen.

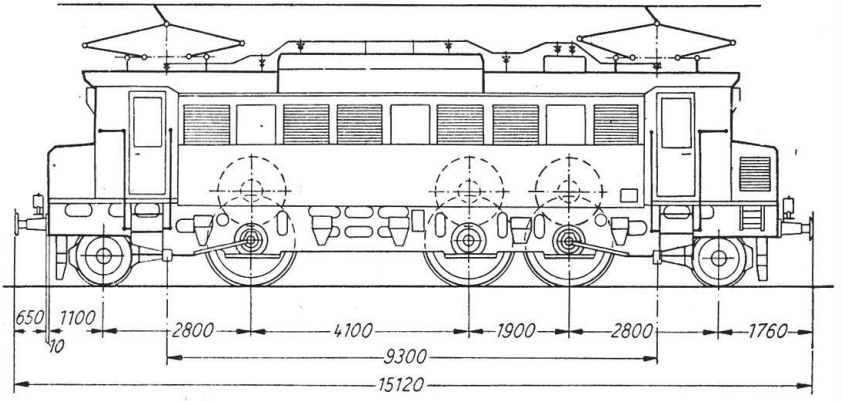


Bild 220. Maßskizze der Baureihe E 04

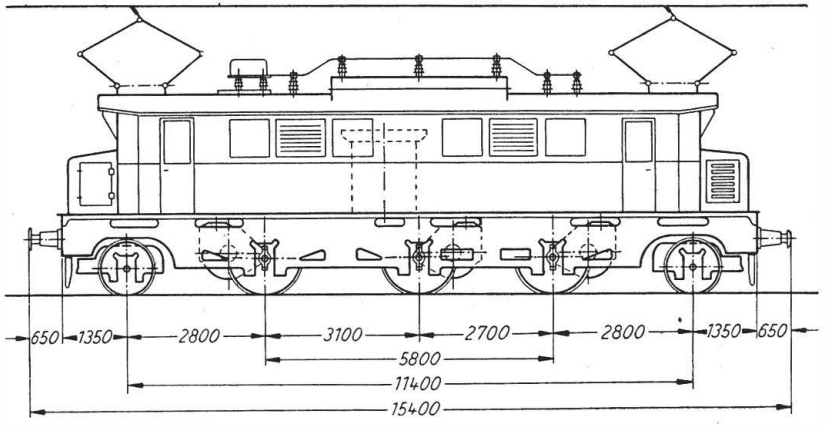


Bild 221. Maßskizze der Baureihe E 05

Die Lokomotiven der Baureihen E 17 erinnern an die vorgenannten Typen, sind jedoch mit insgesamt vier Treibachsen ausgerüstet, so daß sich ihre maximale Anfahrzugkraft auf 24,0 Mp erhöht (Bild 222). Diese Lokomotiven haben vier Doppelmotoren, die über Federtöpfe die Achsen antreiben. Mit Rücksicht auf die bessere Zugänglichkeit des Triebwerkes wurde ein Gitterrahmen gewählt, der 400 mm in den Maschinenraum hineinragt (Bild 223). Infolge der beiden Krauß-Helmholtz-Drehgestelle haben diese Lokomotiven eine gute Bogenläufigkeit und auch einen ruhigen Lauf bei hohen Geschwindigkeiten.

Die Lokomotiven der Baureihe E 18 stellen eine Weiterentwicklung der vorgenannten Bauart dar. An die Stelle der Vorbauten und der eckigen Führerhäuser trat ein stromlinienförmiger Lokomotivkasten, der sich bei der auf 150 km/h gesteigerten Höchstgeschwindig-

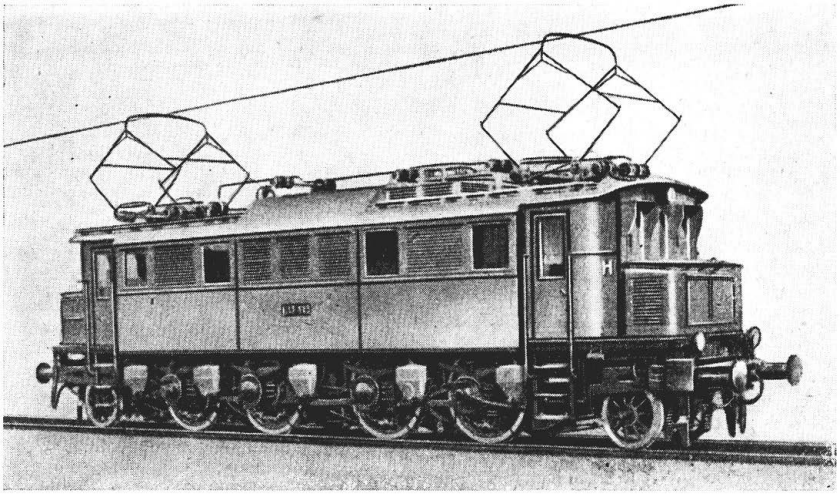


Bild 222. 1'Do1'-Lokomotive der Baureihe E 17

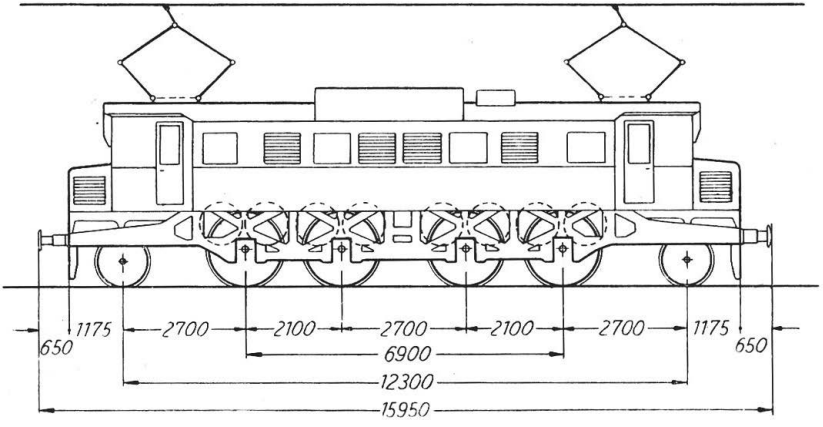


Bild 223. Maßskizze der Baureihe E 17

keit günstig auswirkte (Bild 224). Der Rahmen ist vollständig geschweißt. Die Doppelmotoren wurden durch vier stärkere Einzelmotoren ersetzt, die eine Stundenleistung von mehr als 3000 kW erzeugen. Die Abmessungen der Lokomotiven sind aus Bild 225 zu ersehen. Durch zweckmäßige Kühlung der Fahrmotoren konnte auch die Anfahrleistung beträchtlich gesteigert werden, und so ist es möglich, die über 100 t schwere Lokomotive innerhalb 100 s auf eine Geschwindigkeit von 100 km/h zu beschleunigen. Diese Lokomotiven sind

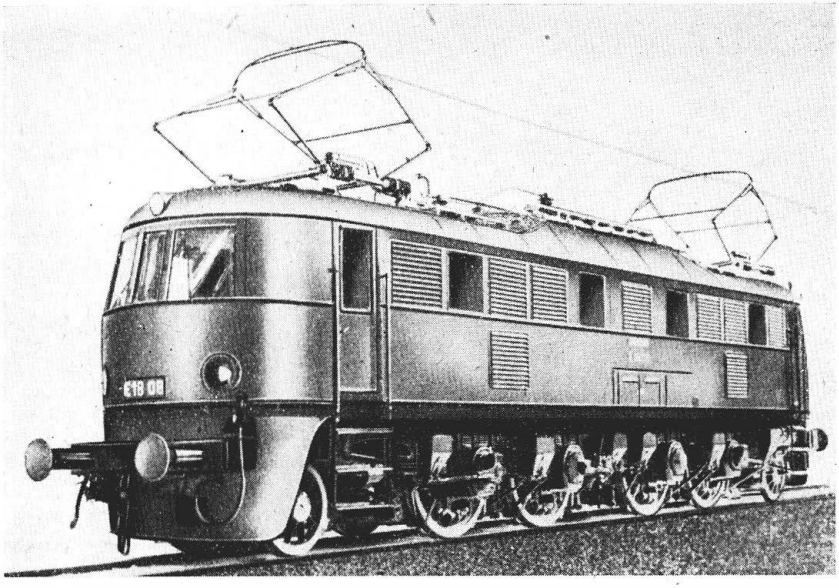


Bild 224. 1'Do1'-Lokomotive der Baureihe E 18

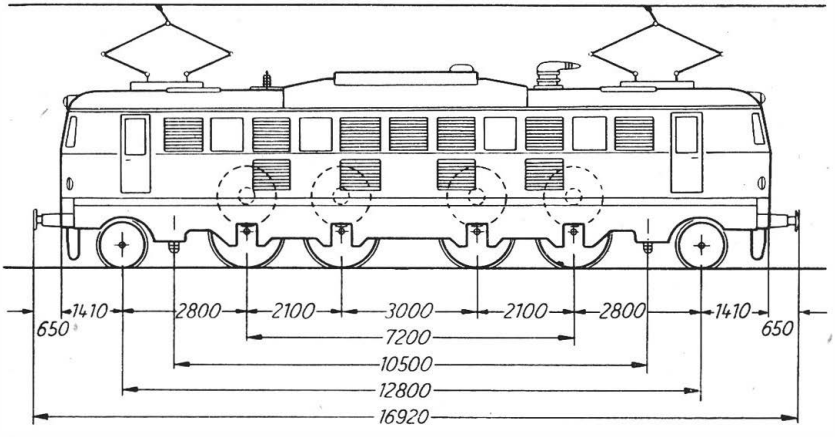


Bild 225. Maßskizze der Baureihe E 18

für die Beförderung schwerer Schnellzüge gut geeignet und erreichen mit einer Zugmasse von 400 t eine mittlere Reisegeschwindigkeit von über 100 km/h.

Aus der Baureihe E 18 entwickelte man im Jahre 1939 die Baureihe E 19, von der insgesamt nur vier Stück gebaut wurden (Bild 226). Diese elektrischen Lokomotiven sind bei

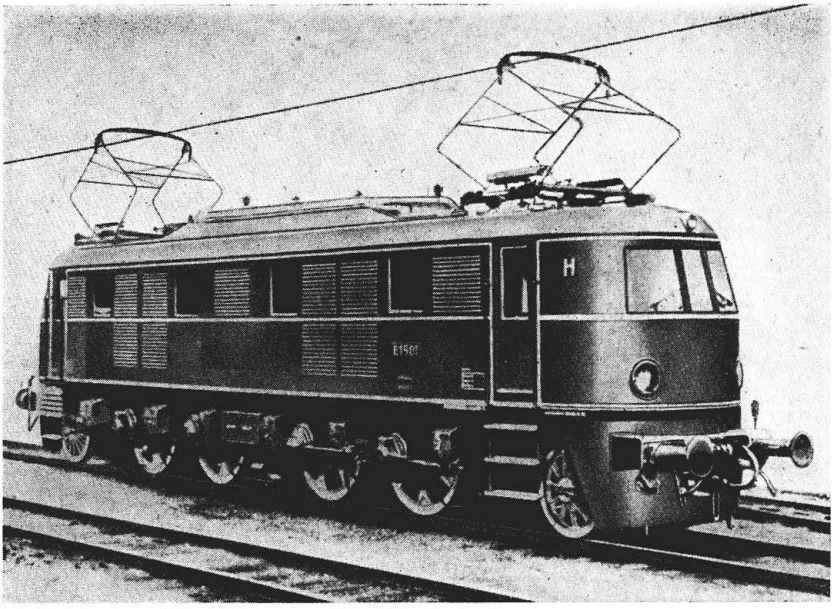


Bild 226. 1'Do1'-Lokomotive der Baureihe E 19

einer planmäßigen Höchstgeschwindigkeit von 180 km/h für die Beförderung schwerer Fernschnellzüge bestimmt und leisten kurzfristig bis 6000 kW. Sie entsprechen in ihrem Aufbau den Lokomotiven der Baureihe E 18. Die Abmessungen sind die gleichen, lediglich der Laufraddurchmesser wurde von 1000 mm auf 1100 mm vergrößert. Diese Lokomotiven waren viele Jahre lang die modernsten und leistungsfähigsten elektrischen Lokomotiven der Welt. Auf den außerordentlich günstigen Wert Masse je Leistungseinheit von nur 28,3 kg/kW sei besonders hingewiesen. Bei Schnellfahrversuchen im Jahre 1939 erreichte eine dieser Lokomotiven mit einem D-Zug von 400 t eine Geschwindigkeit von 200 km/h bereits nach 4 min und 48 s und benötigte für eine Strecke von 30 km nur 11 min und 20 s, was einer Reisegeschwindigkeit von 160 km/h entspricht. Weitere Schnellfahrten konnten infolge des Krieges nicht durchgeführt werden.

Die Baureihe E 44 wurde im Jahre 1932 entwickelt und weist gegenüber älteren Konstruktionen mancherlei Verbesserungen auf (Bild 227). Sie hat einen völlig geschweißten Rahmen, einen ölgekühlten Umspanner und ein Nockenschaltwerk mit Feinregler. Die wichtigsten Maße sind aus Bild 228 zu erkennen. Diese Lokomotiven sind für den Reisezugdient geeignet, können jedoch auch für die Beförderung von Güterzügen bis 1400 t bei 5‰ Steigung eingesetzt werden. Sie wurden 15 Jahre lang mit nur geringfügiger Änderung in großer Stückzahl gebaut und sind auch heute wieder auf den Strecken des mitteldeutschen Netzes zu finden.

Die Lokomotiven der Baureihe E 94 stellen eine Verbesserung der Baureihe E 93 dar, die für den schweren Güterzugdienst auf den Riesengebirgsstrecken entwickelt worden war.

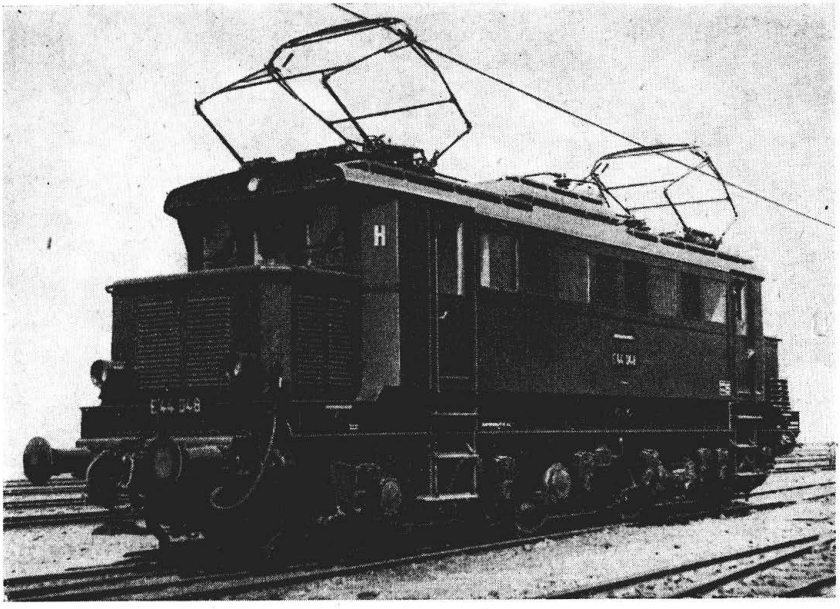


Bild 227. Bo'Bo'-Lokomotive der Baureihe E 44

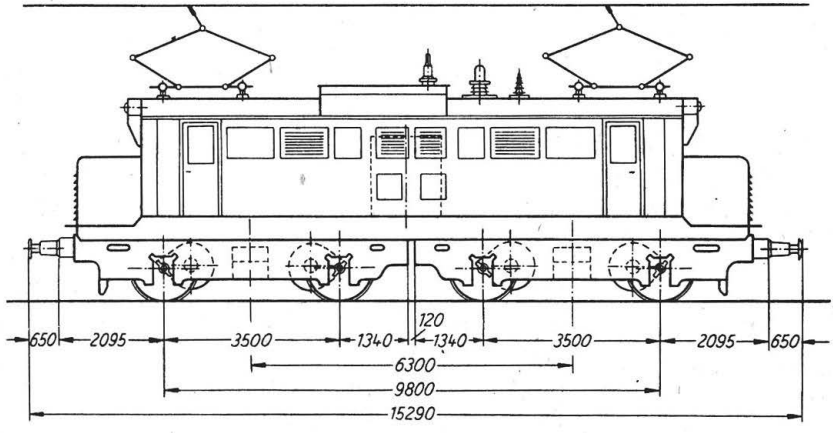


Bild 228. Maßskizze der Baureihe E 44

Sie unterscheiden sich von dieser durch stärkere Antriebsmotoren und durch den vollständig geschweißten Brückenrahmen, dessen Hauptträger in der Mitte wesentlich verstärkt sind (Bild 229). Bei der Konstruktion des Fahrgestells wurden die mit den Loko-

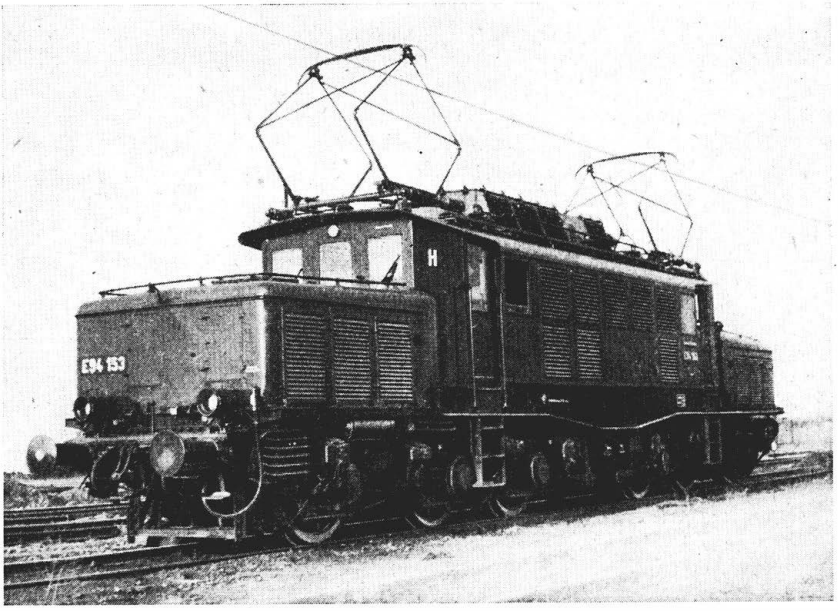


Bild 229. Co'Co'-Lokomotive der Baureihe E 94

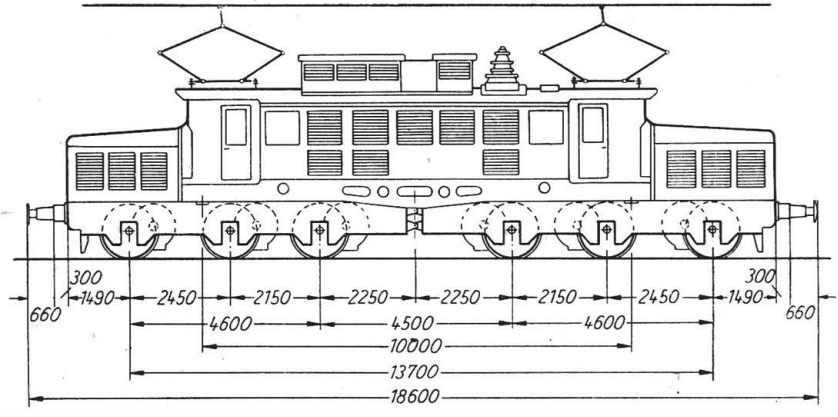


Bild 230. Maßskizze der Baureihe E 94

motiven der Baureihe E 44 gesammelten Erfahrungen angewendet. Auch die Tatzlagermotoren wurden von dieser Type übernommen.
Die äußere Form der Lokomotiven der Baureihe E 94 ist durch die langen Vorbauten an jedem Ende gekennzeichnet, die aus der Maßskizze (Bild 230) gut zu erkennen sind. Die

Antriebsmotoren leisten kurzfristig 3900 kW, so daß diese Lokomotive in der Lage ist, auf Steigungen von 10‰ eine Zugmasse von 1600 t mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h und auf einer Steigung von 25‰ eine Masse von 600 t mit 50 km/h zu befördern. Ein großer Teil dieser Lokomotiven ist mit einer fremderregten Widerstandsbremse ausgerüstet.

Auch die Baureihe E 94 ist zur Zeit wieder im mitteldeutschen Raum eingesetzt. Da sie auf Flachlandstrecken jedoch nicht voll ausgenutzt werden kann, ist sie für den späteren Einsatz auf den bergigen Strecken im Raum Zwickau, Karl-Marx-Stadt und Dresden vorgesehen. Sie hat sich auf den gebirgigen Strecken Süddeutschlands so gut bewährt, daß die Deutsche Bundesbahn noch nach dem Jahre 1945 eine größere Stückzahl dieser Baureihe in verstärkter Ausführung bauen ließ. Die Stundenleistung wurde dabei auf 4680 kW bei einer Geschwindigkeit von 68 km/h und die maximale Anfahrzugkraft auf 41 Mp erhöht.

Bei der im Anhang 1 an letzter Stelle genannten Baureihe E 11 handelt es sich um eine Neukonstruktion. Diese Type wurde vom VEB Lokomotivbau Elektrotechnische Werke „Hans Beimler" in Hennigsdorf in enger Zusammenarbeit mit der Deutschen Reichsbahn und der volkseigenen Zuliefererindustrie nach neuesten Erkenntnissen entwickelt. Sie entspricht folgendem Leistungsprogramm:

Schnellzüge	600 t	auf Steigung	0‰	mit V = 140 km/h
	600 t	„	10‰	„ V = 85 „
Personenzüge	400 t	„	25‰	„ V = 60 „

Bei der Konstruktion des mechanischen und elektrischen Teiles wurde besonderer Wert darauf gelegt, möglichst viel standardisierte Baugruppen und Bauelemente zu verwenden. So wurde z. B. die Hochspannungsausrüstung dieser neuen Lokomotive, d. h. Stromabnehmer, Stützisolator, Trennschalter und Hauptschalter, bereits für eine Fahrleitungsspannung von 25 kV bemessen und damit gleichzeitig für die spätere Verwendung in 50-Hz-Fahrzeugen standardisiert. Auch wählte man für diese beiden Neubaulokomotiven die gleiche Steuerspannung (Gleichstrom 110 V), die auch für die neuen S-Bahn-Züge, Oberleitungstriebwagen, Dieseltriebwagen und die neuen 50-Hz-Lokomotiven vorgesehen wurde. Dadurch war es möglich, eine große Anzahl von Schaltgeräten zu standardisieren und somit die Kosten für die Herstellung und Unterhaltung dieser Teile zu senken. Außerdem konnten für die obengenannten Fahrzeuge einheitliche Umformer für die Hilfsbetriebe, Sicherheitsfahrschaltungen, Heizeinrichtungen, Klarsichtscheiben, Scheibenwischer, Signallaternen usw. verwendet werden. Bei der Konstruktion wurde auch durch reichliche Bemessung einzelner Teile und durch Verwendung hochwertigen Materials auf einen möglichst geringen Verschleiß besonderer Wert gelegt, um später mit geringen Unterhaltungskosten auszukommen. Das Äußere der Lokomotiven der Baureihe E 11 zeigen das Titelbild und Bild 231, während die wichtigsten Abmessungen aus der Maßskizze (Bild 232) zu erkennen sind.

Diese Lokomotiven haben eine moderne Kastenform ohne Vorbauten, einen geschweißten Rahmen und ein laufachsloses Fahrgestell. Die doppelte Abfederung durch Schraubenfedern und zusätzliche Blattfedern an den Wiegen ermöglichen einen ruhigen Lauf auch bei der Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Demzufolge ist auch die Bremse als automatische Druckluftbremse mit Zusatzbremse der Bauart Kssbr m. Z. mit Einfachsteuerventil und Druckübersetzer ausgelegt. Die Bremskräfte werden der Geschwindigkeit entsprechend

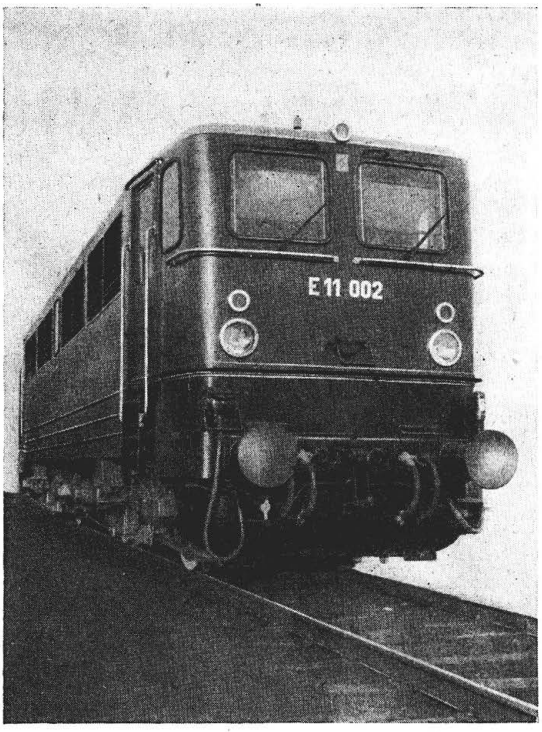


Bild 231
Neubaulokomotive der Baureihe E 11, Achsfolge Bo'Bo'

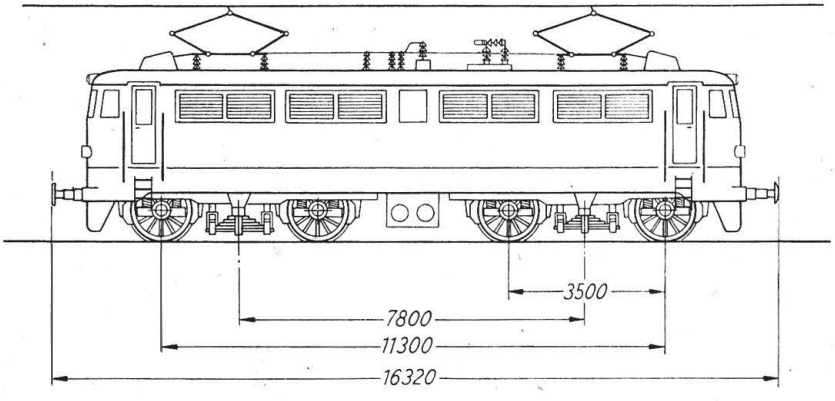


Bild 232. Maßskizze der Baureihe E 11

durch einen Bremsdruckregler abgestuft. Durch Achslastausgleicher, eine Schleuderschutzbremse und Sandstreuer ist es möglich, beim Anfahren schwerer Züge die Haftwertgrenzleistung voll auszunützen.

Für die Drehmomentübertragung vom Motor zur Achse ist ein elastischer Tatzantrieb mit Hohlwelle vorgesehen. Lediglich die Probelokomotiven erhielten zunächst einen einfachen Tatzantrieb, so daß ihre Höchstgeschwindigkeit vorübergehend auf 110 km/h beschränkt werden mußte. Auch die Probelokomotiven sollen später einen elastischen Antrieb erhalten.

Die elektrische Ausrüstung der E 11 entspricht ebenfalls dem neuesten Stand. Der als Mantelumspanner ausgeführte Hauptumspanner mit Ölkühlung hat eine Leistung von 2500 kVA. Durch einen Steuerumspanner und ein zusätzliches Feinstufenschaltwerk sind günstige Anfahreigenschaften und eine genaue Steuerung von Zugkraft und Geschwindigkeit gewährleistet. Die Übertragungssteuerung ist eine servomotorische Nachlaufsteuerung, zugleich für Wendezugbetrieb und Doppelbespannung geeignet.

Die Fahrmotoren wurden vom VEB Sachsenwerk in Dresden/Niedersedlitz nach den neuesten Erkenntnissen im Bahnmotorenbau entwickelt. Sie haben eine Stundenleistung von je 700 kW, ihr Wirkungsgrad beträgt 90,5 %. Da das Gehäuse aus einer leichten Schweißkonstruktion besteht und auf hochwertige Isolation der Wicklungen und eine zweckmäßige Führung des Kühlluftstromes besonderer Wert gelegt wurde, konnte für das Verhältnis Masse zu Leistungseinheit der recht günstige Wert von 5,43 kg/kW erreicht werden.

Für die Lokomotiven der Baureihe E 11 wurden auch die meisten Meß-, Schutz- und Hilfseinrichtungen neu entwickelt und entsprechen somit dem neuesten Stand der Technik.

Für Reisezüge, deren Höchstgeschwindigkeit unter 100 km/h liegt, und vor allem auch für den Güterzugdienst ist eine weitere Neubaulokomotive vorgesehen. Diese Baureihe hat den gleichen mechanischen Aufbau und die gleiche elektrische Ausrüstung wie die Baureihe E 11, sie unterscheidet sich von dieser lediglich durch eine andere Übersetzung. Dadurch wird erreicht, daß sie auch im unteren Geschwindigkeitsbereich wirtschaftlich eingesetzt werden kann und auch eine bessere Steuerbarkeit zuläßt.

7.2 Wechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Bundesbahn für 16⅔ Hz

Die im Anhang 2 zusammengestellten elektrischen Lokomotiven sind Neukonstruktionen der Deutschen Bundesbahn. Bei den ersten vier Typen handelt es sich um Probelokomotiven der Baureihe E 10, die das Bundesbahn-Zentralamt München im Jahre 1952 in enger Zusammenarbeit mit den Lieferwerken entwickelte. Es wurde folgendes Leistungsprogramm aufgestellt:

Güterzüge	1300 t	auf Steigung	5 ‰	mit $V = 70$ km/h
	900 t	„ „	10 ‰	„ $V = 60$ „
	500 t	„ „	25 ‰	„ $V = 50$ „
Schnellzüge	700 t	„ „	10 ‰	„ $V = 90$ „
	400 t	„ „	25 ‰	„ $V = 70$ „

Außerdem sollte die Neukonstruktion als Universal-Lokomotive im Reisezug- und im Güterzugdienst wirtschaftlich eingesetzt werden können, die Achsfolge Bo'Bo' aufweisen, eine Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h erreichen und eine geringe Wartung und einfache Unterhaltung erfordern.

An der Neuentwicklung der Baureihe E 10 beteiligte sich die gesamte einschlägige Industrie. Das Ergebnis dieses Wettbewerbes waren fünf Lokomotiven, die sich äußerlich sehr ähnlich

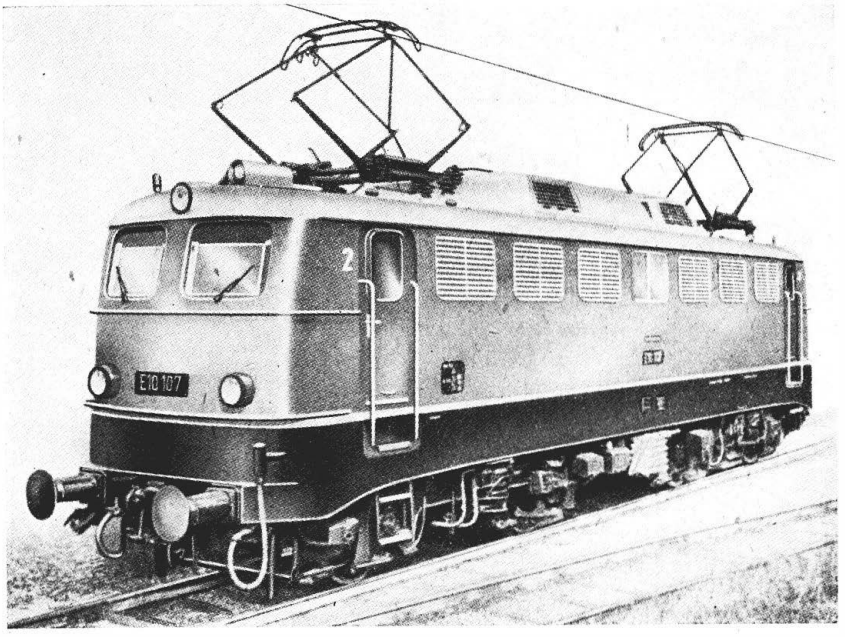


Bild 233. Bo'Bo'Lokomotive der Baureihe E 10[1]

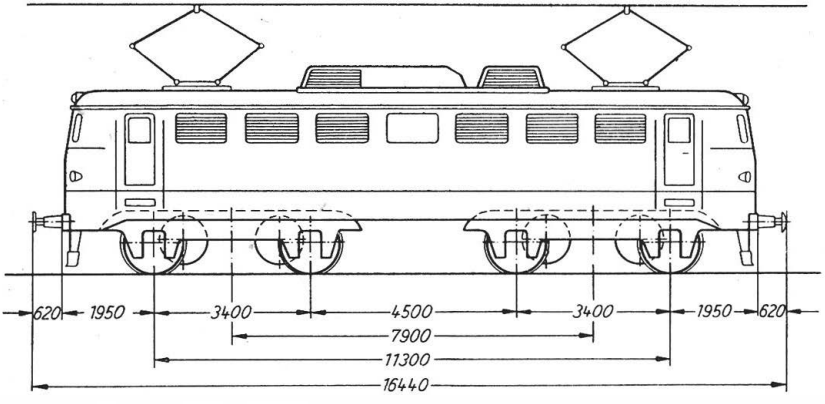


Bild 234. Maßskizze der Baureihe E 10[1]

waren, jedoch durch einen völlig anderen Aufbau des Einzelachsantriebes, des Trafos, der Steuerung und anderer Teile unterschieden. Diese fünf Probelokomotiven wurden in den folgenden Jahren unter schwierigsten Betriebsverhältnissen einer gründlichen Prüfung unterzogen. Sämtliche Erkenntnisse wurden ausgewertet mit dem Ziel, die leistungsfähigste und zugleich wirtschaftlichste Lokomotive herauszukristallisieren.

Auf diese Weise entstand die Konstruktion der Baureihe E 10[1], die seit dem Jahre 1956 in großer Stückzahl in Serienfertigung gebaut wurde. Bild 233 zeigt den äußeren Aufbau, der sowohl den Probelokomotiven als auch den modernen ausländischen elektrischen Lokomotiven weitgehend entspricht. Durch verschiedene Verbesserungen, z. B. durch Vergrößerung des Drehgestellachsstandes auf 3400 mm, konnte die Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h auf 150 km/h heraufgesetzt werden (Bild 234). Da die Leistung dieser Lokomotiven etwas höher liegt als die der Baureihe E 18, sind diese Lokomotiven, die übrigens auch mit einer elektrischen Widerstandsbremse ausgerüstet wurden, besonders für die Beförderung schwerer Schnell- und Eilzüge geeignet. Durch Anwendung der modernen Schweißtechnik und den Bau eines freitragenden Wagenkastens war es möglich, den mechanischen Teil sehr leicht zu gestalten. Durch neuentwickelte Isolierstoffe und eine wohldurchdachte Kühlung konnte auch bei der elektrischen Ausrüstung viel Masse eingespart werden, so daß der Wert Masse je Leistungseinheit der Baureihe E 10[1] mit 22,7 kg/kW als äußerst günstig angesehen werden kann.

Die Baureihe E 40 entspricht im mechanischen Aufbau und auch in der elektrischen Ausrüstung vollkommen der Baureihe E 10[1]. Sie unterscheidet sich lediglich durch eine andere Übersetzung, da diese Lokomotive für den gemischten Dienst bestimmt ist. Ihre Höchstgeschwindigkeit beträgt nur 100 km/h, dafür kann sie 1600 t auf Steigungen von 5‰ anziehen. Beide Neuentwicklungen besitzen eine Hochspannungssteuerung. Auch die Type E 40 wurde in Großserie gefertigt und hat sich im Reisezug- und Güterzugdienst gut bewährt.

Die Baureihe E 41 hat ebenfalls die Achsfolge Bo'Bo', doch wurde hier eine Achslast von 16,6 Mp zugrunde gelegt (Bild 235). Die geringe Masse konnte durch einen selbsttragenden Wagenkasten (Blechstärke etwa 2 mm), durch einen geschweißten Kastenrahmen (Blechstärke 3···5 mm) und durch Verwendung von hochwertigem Werkstoff erreicht werden. Infolge Einbau einer Niederspannungssteuerung wiegt die gesamte elektrische Ausrüstung dieser Lokomotive einschließlich Antrieb nur 31 t. Die wichtigsten Maße sind aus Bild 236 zu erkennen. Diese Lokomotiven sind für die Beförderung von Personen- und leichten Güterzügen auf Haupt- und Nebenbahnen bestimmt und können 900 t auf einer Steigung von 5‰ anziehen. Da diese Fahrzeuge auch im Städte-Schnellverkehr und Wendezugbetrieb eingesetzt werden sollen, sind sie mit Zug- und Mehrfachsteuerung ausgerüstet.

Die Baureihe E 50 ist für den schweren Güterzugdienst auf gebirgigen Strecken bestimmt und hat nach dem Vorbild der Baureihe E 94 die Achsfolge Co'Co' (Bild 237). Sie soll folgendes Leistungsprogramm erfüllen:

Güterzüge	von	2300 t	auf	5‰	Steigung	mit	60 km/h
,,	,,	1600 t	,,	10‰	,,	,,	60 ,,
Eilgüterzüge	,,	800 t	,,	5‰	,,	,,	100 ,,
Schnellzüge	,,	600 t	,,	10‰	,,	,,	100 ,,

Als Antrieb wurde, wie bei den Baureihen E 10[1], E 40 und E 41, der bewährte Gummiringfederantrieb verwendet, lediglich die Lokomotiven mit den Betriebsnummern E 50 001 bis 025 erhielten direkten Tatzlagerantrieb. Das Fahrgestell entspricht etwa dem der Baureihe E 94, die gesamte Länge wurde um 840 mm vergrößert (Bild 238). Die Lokomotiven der Baureihe E 50 sind ebenfalls mit Hochspannungssteuerung und Widerstandsbremse

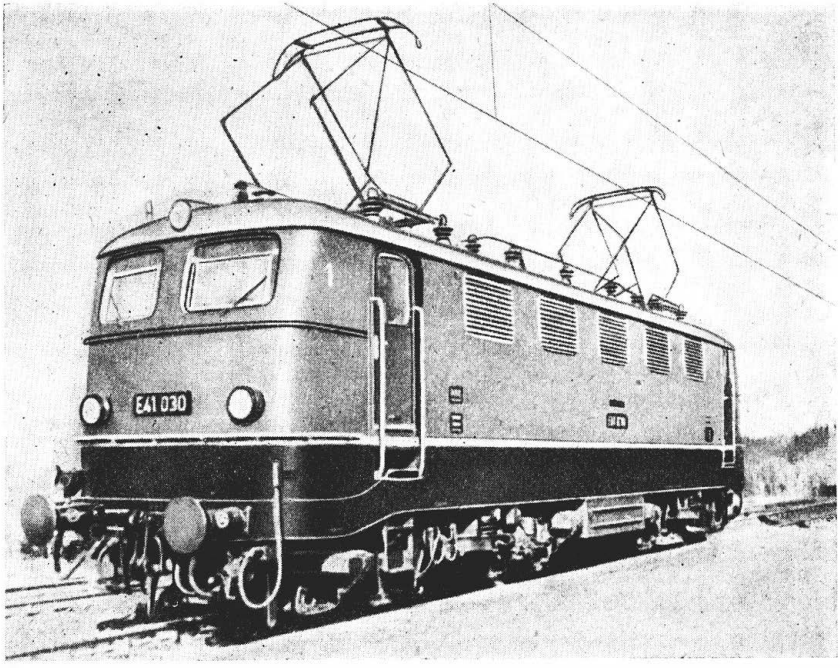


Bild 235. Bo'Bo'-Lokomotive der Baureihe E 41

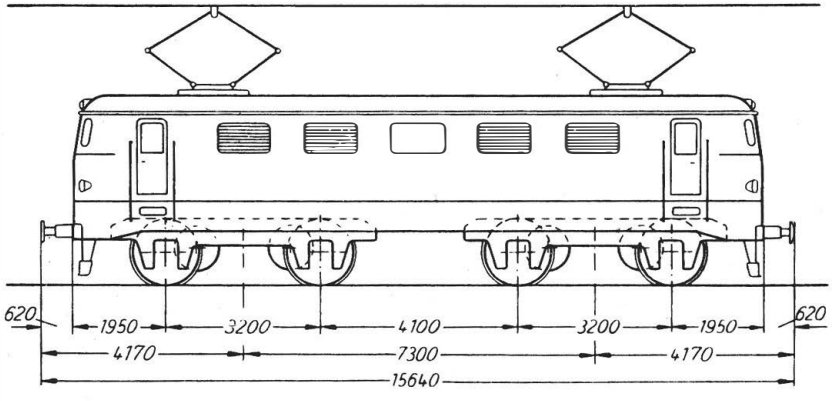


Bild 236. Maßskizze der Baureihe E 41

ausgestattet. Der Doppeltrafo hat eine Gesamtmasse von 16,1 t. Da die Stundenleistung annähernd so groß ist wie bei der verstärkten Baureihe E 94, sind auch diese Lokomotiven für den schweren Güterzugdienst auf bergigen Strecken besonders gut geeignet.

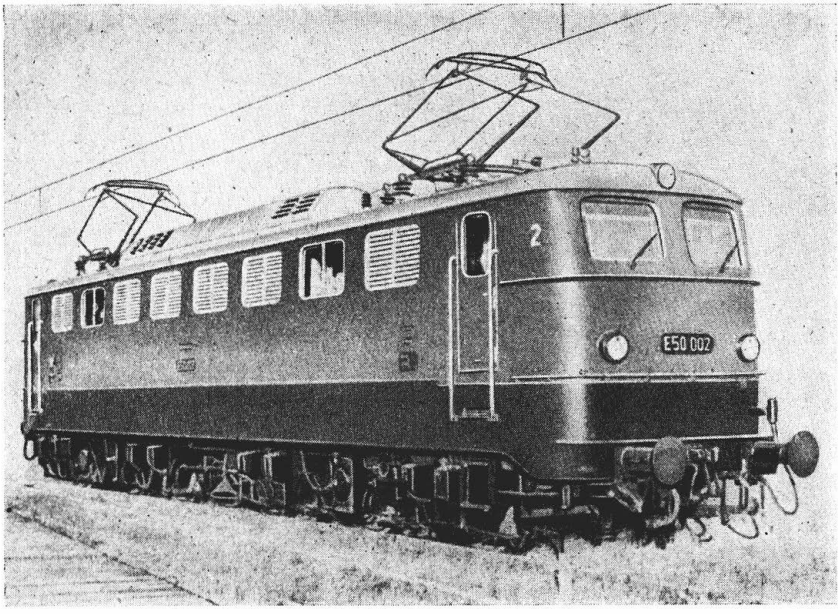


Bild 237. Co'Co'-Lokomotive der Baureihe E 50

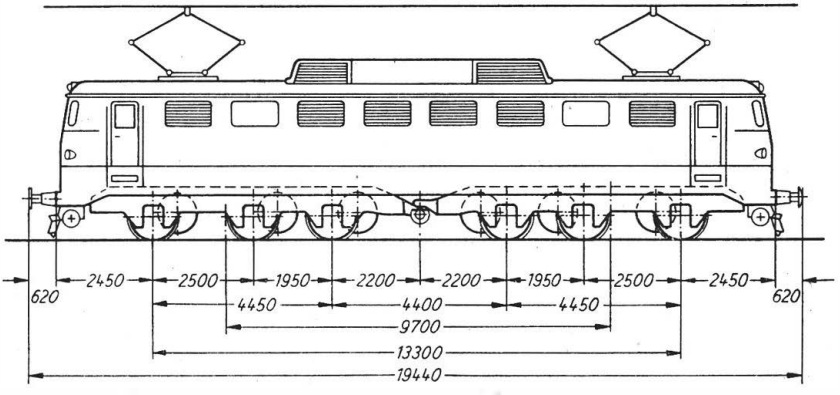


Bild 238. Maßskizze der Baureihe E 50

7.3 Ausländische Wechselstrom-Lokomotiven für $16\frac{2}{3}$ Hz

Auch bei den Neukonstruktionen des Auslandes ist deutlich zu erkennen, daß man auf Laufachsen in der letzten Zeit fast stets verzichtet und bestrebt ist, mit möglichst wenig Lokomotivtypen auszukommen. Neue ausländische Wechselstromlokomotiven sind im Anhang 3 zusammengestellt.

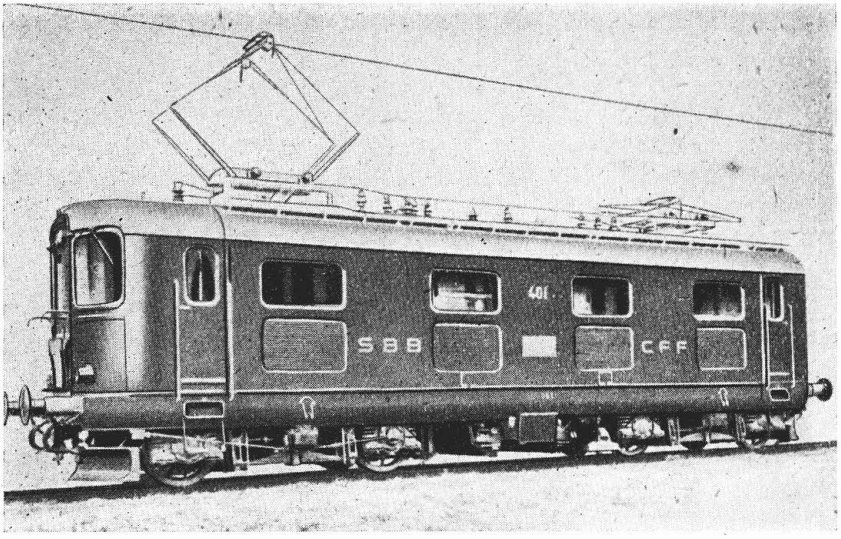


Bild 239. Bo'Bo'-Lokomotive der Schweizerischen Bundesbahnen, Baureihe Re 4/4

Aus früheren Abschnitten ist bekannt, daß in der Schweiz fast sämtliche Züge elektrisch befördert werden, und so ist es auch verständlich, daß man dort die Entwicklung neuer elektrischer Lokomotiven mit besonderer Gründlichkeit betrieb und gute Erfolge erzielte. Die an erster Stelle genannte Baureihe Re 4/4 fällt durch ihre geringe Masse auf und ist für die Beförderung von Reisezügen bestimmt (Bild 239).

Um die Lokomotive auch in der Mitte des Zuges einstellen zu können, wurde bei den ersten 26 Lokomotiven ein vom Maschinenraum vollkommen getrennter Seitengang vorgesehen und in die Stirnwände eine Tür mit Übergangsbrücke und Faltenbalg eingebaut.

Die Lokomotiven der Baureihe Ae 6/6 sind für die Gotthard-Bahn bestimmt und befördern auf einer Steigung von 27‰ Reise- und Güterzüge von 600 t mit einer Geschwindigkeit von 75 km/h (Bild 240).

Um auf kurvenreichen Gebirgsstrecken noch schwerere Züge ohne Vorspann- und Schiebelokomotiven befördern zu können, wurden mehrteilige elektrische Lokomotiven entwickelt. Eine schwere Güterzuglokomotive (Bild 241) hat z. B. die Achsfolge 1'Bo1 Bo1' + 1'Bo1 Bo1', so daß sich eine Gesamtlänge von 34,1 m ergibt. Mit einer Stundenleistung von 8800 kW ist eine solche Lokomotive in der Lage, Züge mit einer Masse von etwa 1000 t auf steilen Gebirgsstrecken mit einer verhältnismäßig hohen Geschwindigkeit zu befördern. Da die Herstellungs- und Unterhaltungskosten für derart schwere Güterzuglokomotiven jedoch ungewöhnlich hoch sind, ist es wesentlich wirtschaftlicher, zwei in Serie hergestellte Bo'Bo'- oder auch Co'Co'-Lokomotiven zu verwenden und diese mit Hilfe der Mehrfachsteuerung von einem Führerstand aus zu steuern.

Auch besteht die Möglichkeit, zwei Lokomotiven zu einer Doppellokomotive zusammen-

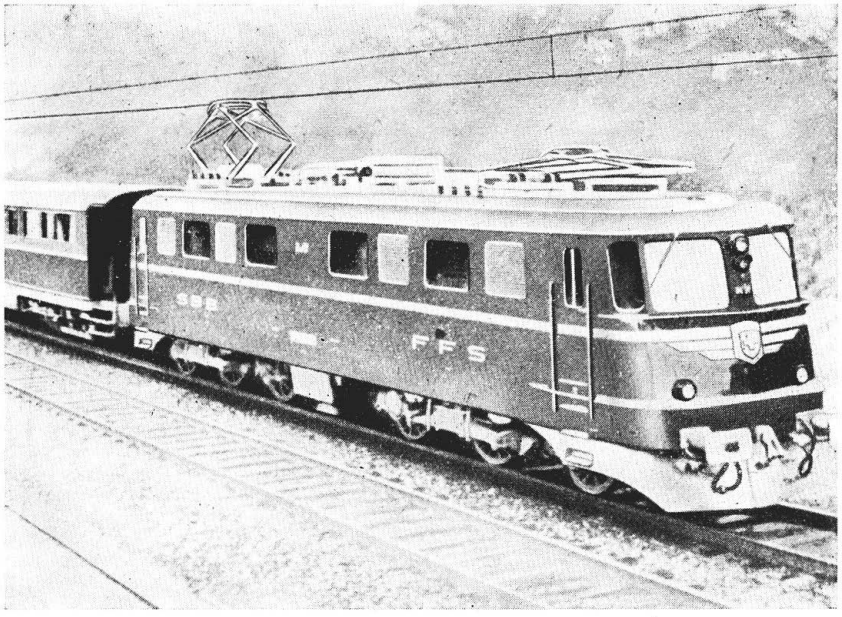


Bild 240. Co'Co'-Lokomotive der Schweizerischen Bundesbahnen, Baureihe Ae 6/6

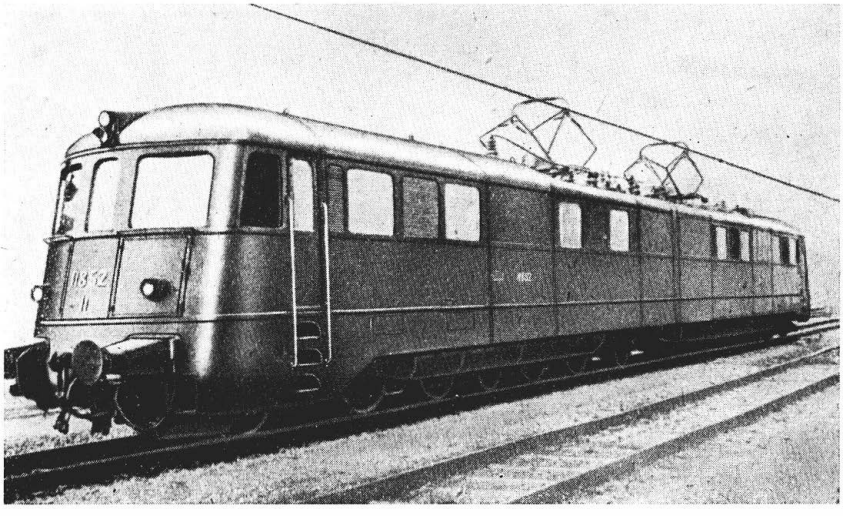


Bild 241. Schwere Güterzug-Lokomotive der Schweizerischen Bundesbahnen, Baureihe Ae 8/14

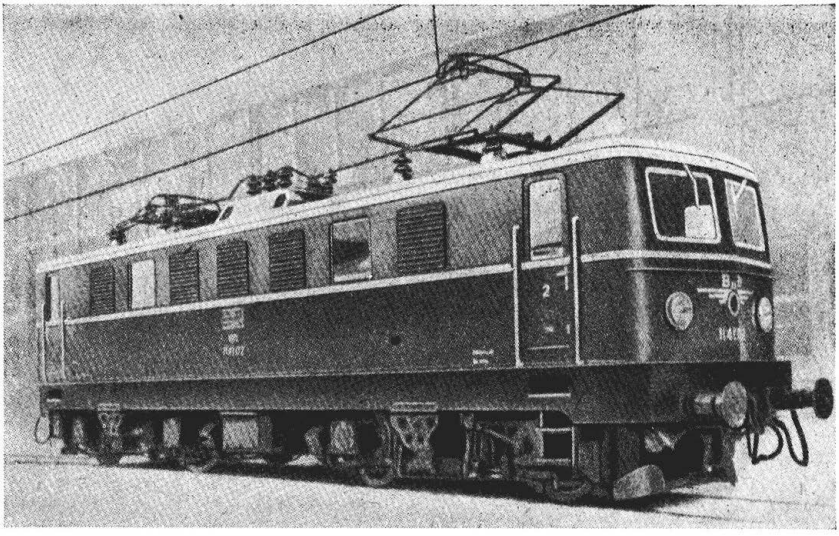


Bild 242. Bo'Bo'-Lokomotive der Österreichischen Bundesbahn, Baureihe 1141

zufassen und dabei auf die in der Mitte liegenden Führerstände zu verzichten. So wurde im Jahre 1959 für den schweren Güterzugdienst auf der Lötschberg-Bahn aus zwei Bo'Bo'-Lokomotiven der Bauart Ae 4/4 die neue Reihe Ae 8/8 entwickelt. Diese Lokomotive erzeugt bei einer Reibungslast von 160 Mp eine Stundenleistung von fast 6500 kW bei einer Geschwindigkeit von 75 km/h. Sie kann eine Zugmasse von 900 t auf Steigungen von 27‰ mit einer Geschwindigkeit von 75 km/h befördern und weist eine maximale Anfahrzugkraft von 48 Mp auf. Diese Lokomotive ist mit einer elektrischen Widerstandsbremse und Hochspannungssteuerung ausgerüstet. Jede Hälfte hat einen eigenen Druckluft-Hauptschalter und einen Trafo mit radialgeblechtem Eisenkern. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 125 km/h, die gesamte Länge der Doppellokomotive etwa 30 m.

Die anschließend genannten elektrischen Lokomotiven der Österreichischen Bundesbahn entsprechen in technischer Hinsicht ebenfalls den neuesten Erkenntnissen. Während die Bo'Bo'-Lokomotive (Bild 242) den SSW-Gummiringantrieb erhielt, wurde die Co'Co'-Lokomotive (Bild 243) mit BBC-Federantrieb, Hochspannungssteuerung und radialgeblechtem Trafo ausgerüstet. Da die Gesamtmasse von 109,8 t für eine Co'Co'-Lokomotive mit einer Stundenleistung von 4000 kW recht niedrig liegt, ergibt sich der verhältnismäßig günstige Wert Masse je Leistungseinheit von 27,5 kg/kW. Die Maßskizze (Bild 244) ermöglicht einen Vergleich mit den Abmessungen der neuen Co'Co'-Lokomotiven der Deutschen Bundesbahn, Baureihe E 50 und zeigt, daß die Baureihe 1010 wesentlich kürzer ist.

Auch die Schwedischen Staatsbahnen verfügen über einen umfangreichen elektrischen Lokomotivpark, aus dem drei charakteristische Typen herausgegriffen werden. Die Baureihe Ra 846 ist eine der leichtesten Schnellzug-Lokomotiven der Welt (Bild 245). Durch

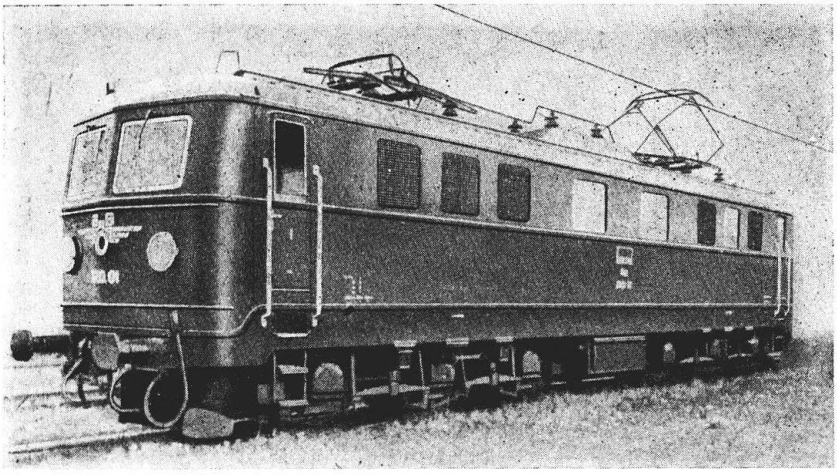


Bild 243. Co'Co'-Lokomotive der Österreichischen Bundesbahn, Baureihe 1010

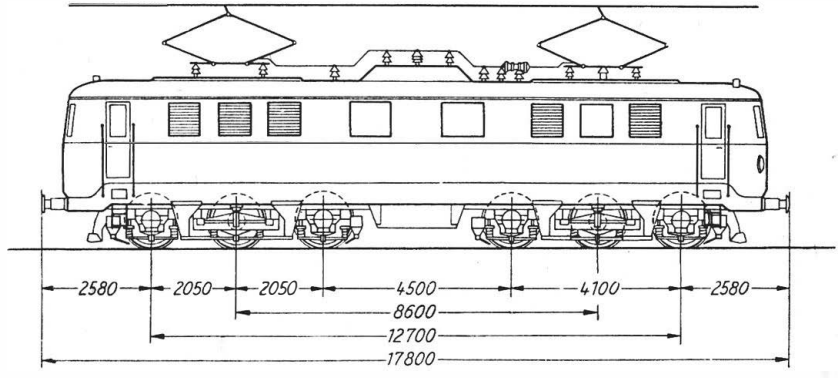


Bild 244. Maßskizze der Baureihe 1010

Anwendung der modernen Schweißtechnik, gute Materialausnutzung und zweckmäßigen Leichtbau (z. B. hohlgebohrte Achswellen), konnte die Masse des mechanischen Teiles auf 31,2 t herabgedrückt werden. Auch die Fahrmotoren sind äußerst leicht konstruiert und wiegen bei einer Stundenleistung von 662 kW nur 2420 kg, so daß sich für das Verhältnis Masse des Motors zu Leistungseinheit der günstige Wert von rund 4 kg/kW ergibt. Die gesamte elektrische Ausrüstung dieser Lokomotive wiegt daher nur 25,0 t.
Das Drehmoment wird vom Antriebsmotor durch einen Kardanantrieb auf die Achsen übertragen. Anstelle der bekannten Kardan-Scheiben bzw. -Lamellen wurden hier Gummi-

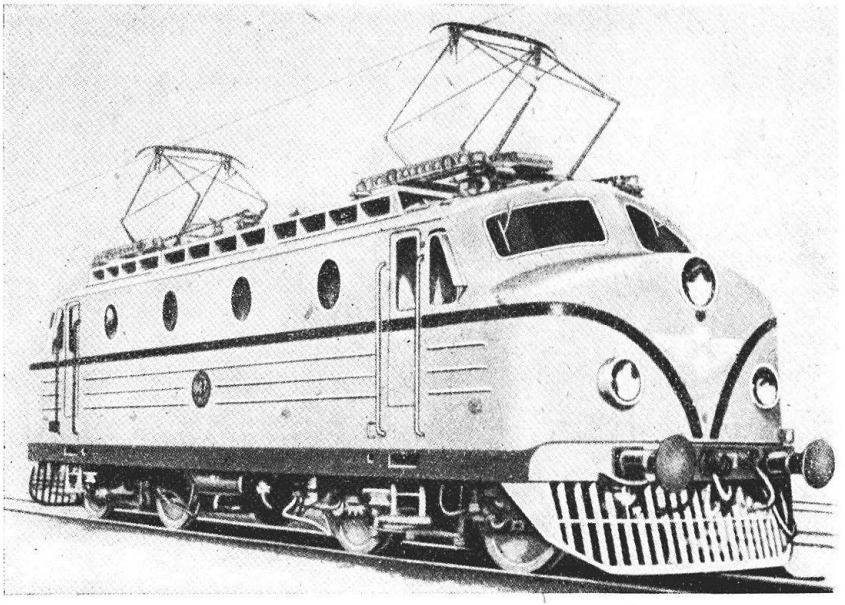


Bild 245. Bo'Bo'-Lokomotive der Schwedischen Staatsbahn Baureihe Ra 846

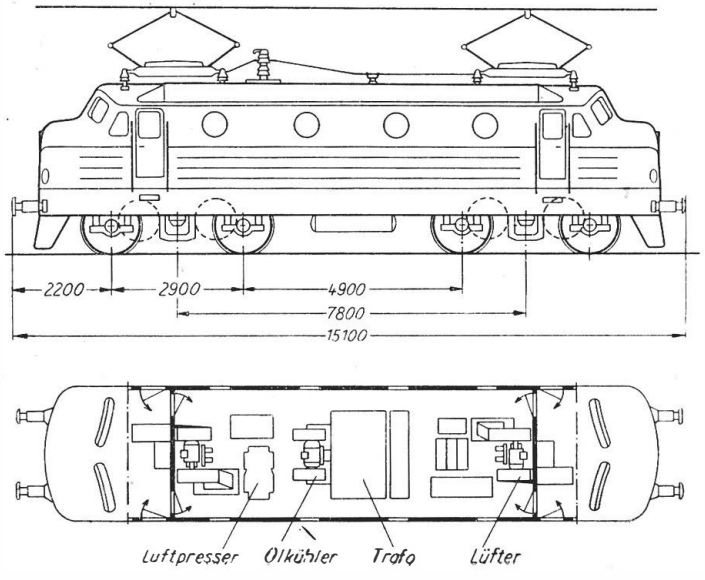


Bild 246
Maßskizze der Baureihe Ra 846

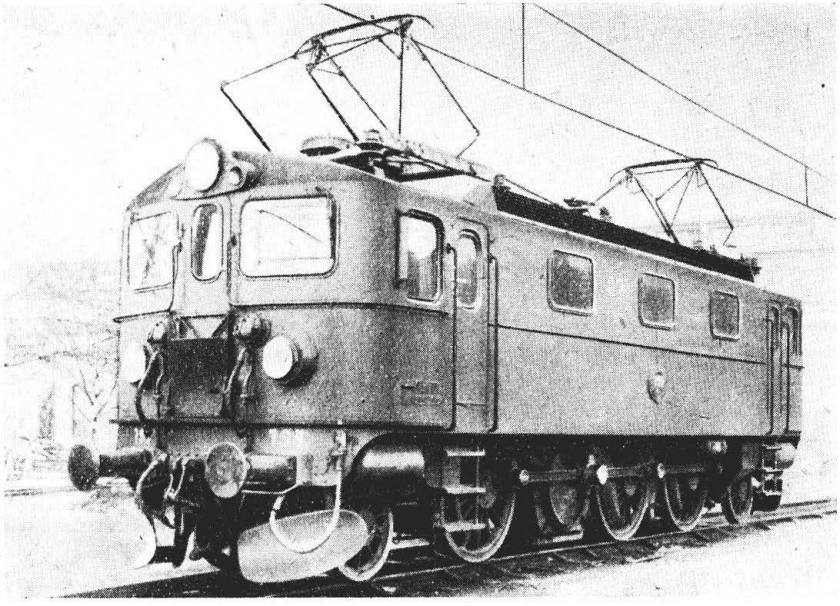


Bild 247. 1'C1'-Lokomotive der Schwedischen Staatsbahn Baureihe Da

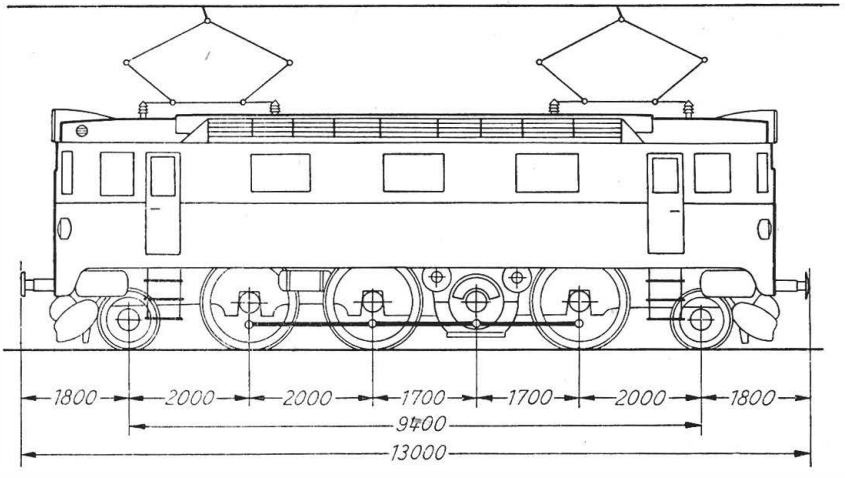


Bild 248. Maßskizze der Baureihe Da

kupplungen verwendet, die auch einen schnellen Ausbau des Motors zulassen. Die Maßskizze (Bild 246) läßt die wichtigsten Abmessungen erkennen und ermöglicht einen Vergleich mit anderen Bo'Bo'-Lokomotiven.

Die beiden anderen elektrischen Lokomotiven der Schwedischen Staatsbahn sind ein Beweis dafür, daß im Gegensatz zu den neuesten Erkenntnissen anderer Länder in Schweden der Stangenantrieb auch noch bei Neukonstruktionen Verwendung findet. Diese Tatsache läßt sich dadurch erklären, daß auf den dortigen Gebirgsstrecken die Haftreibung voll ausgenuzt werden muß und bei Einzelachsantrieb die Schleudergefahr etwas größer ist. Außerdem hatten die Schwedischen Staatsbahnen mit den Güterzuglokomotiven der Baureihe D, die in mehreren 100 Stück gebaut wurde, sehr gute Erfahrungen sammeln können.
Die Baureihe Da stellt eine Weiterentwicklung dieser Bauart dar (Bilder 247 und 248). Zwei Gestellmotoren je 920 kW Stundenleistung treiben über Blindwelle und Stangen die drei gekuppelten Achsen an. Hervorzuheben ist noch, daß bei diesen elektrischen Lokomotiven durch Verändern der Übersetzung die Höchstgeschwindigkeit auf 135 km/h gesteigert werden kann und auf Strecken mit nur 15 Mp Achslast die Möglichkeit besteht, die Achslast von 3×17 Mp (Kuppelachsen) $+ 2 \times 12$ Mp (Laufachsen) auf 5×15 Mp zu verändern.
Die dritte Type der Schwedischen Staatsbahn, die Baureihe Dm, wurde erstmalig im Jahre 1958 in Betrieb genommen (Bild 249). Es handelt sich dabei um eine schwere zweiteilige Güterzuglokomotive der Achsfolge 1'D + D1' mit einer Gesamtmasse von 186,0 t. Diese Lokomotive entstand aus zwei kurz gekuppelten Lokomotiven der Bauart Da, wobei zwecks Erhöhung der Zugkraft die innenliegenden Laufachsen durch angetriebene Achsen ersetzt wurden. Auch die elektrische Ausrüstung wurde von der Baureihe Da übernommen. Jede Lokomotivhälfte besitzt also vier Kuppelachsen, die über Blindwelle und Kuppelstangen von

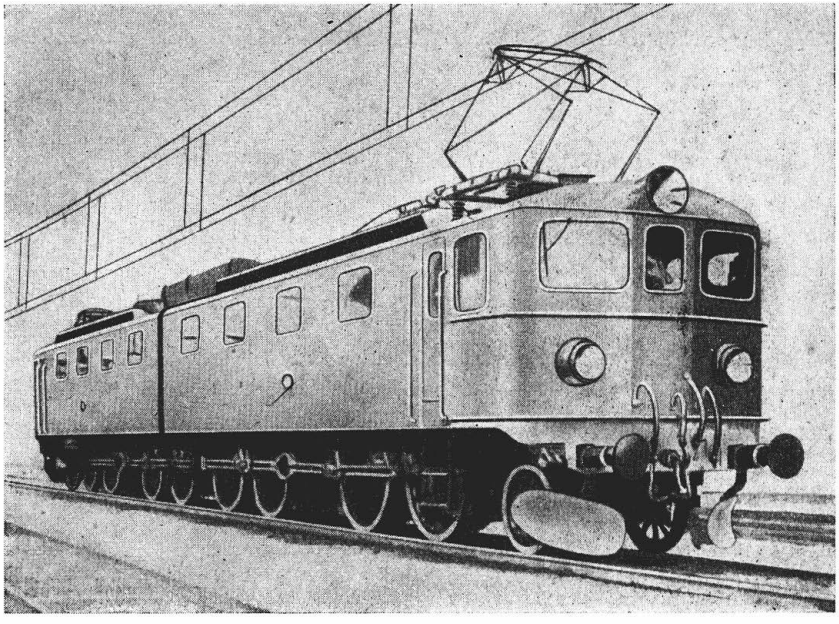


Bild 249. 1'D + D1'-Lokomotive der Schwedischen Staatsbahn Baureihe Dm

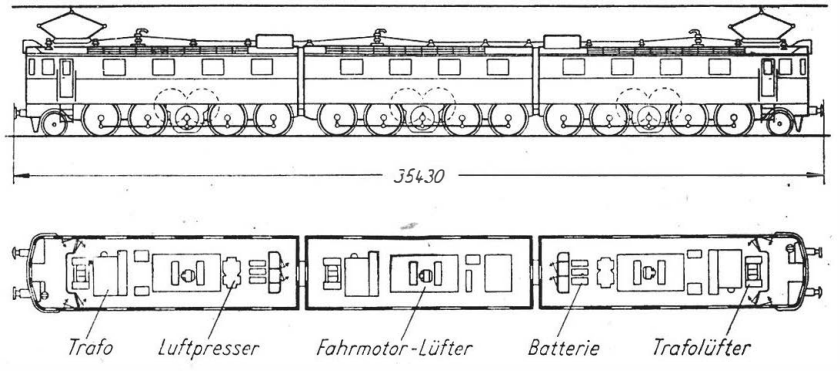


Bild 250. Schwere Güterzuglokomotive der Schwedischen Staatsbahn

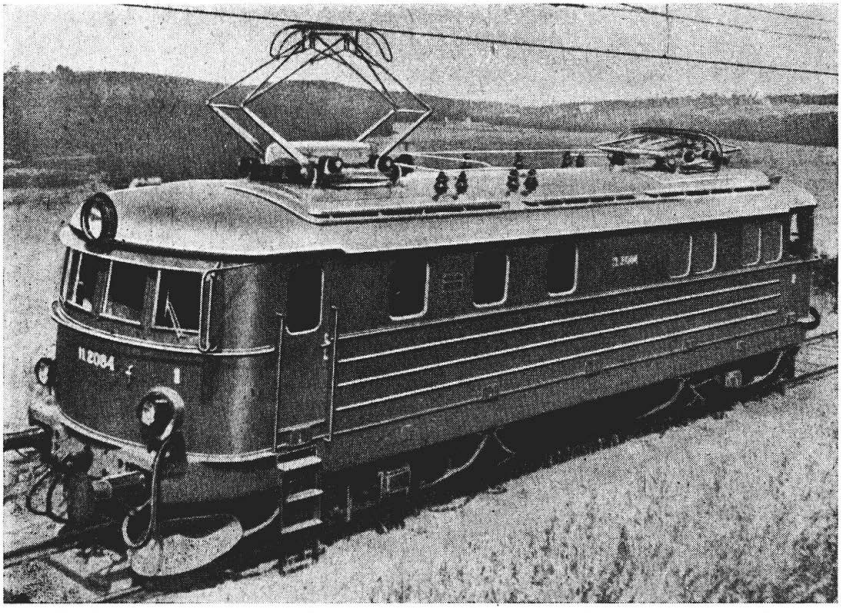


Bild 251. Bo'Bo'-Lokomotive der Norwegischen Staatsbahn Baureihe EL 11

einem Doppelmotor (2 × 950 kW Stundenleistung) angetrieben werden. Diese Lokomotiven haben eine maximale Anfahrzugkraft von 57 Mp und sind in der Lage, 65 Erzwagen mit einer Masse von 3100 t auf einer Steigung von 10‰ anzuziehen und mit einer Geschwindigkeit von 40···45 km/h zu befördern.

Um auch bei schlechtem Wetter ein Schleudern der Treibräder zu vermeiden und die mechanische Beanspruchung des Triebwerkes herabzusetzen, wurde bei einer weiteren Neuentwicklung zwischen die beiden Lokomotivhälften noch eine dritte Einheit mit vier Kuppelachsen eingefügt (Bild 250). Es ergab sich dann die Achsfolge 1'D + D + D1' mit einer Gesamtlänge von 35,43 m und mit einer Stundenleistung von rund 5520 kW bei einer Geschwindigkeit von 54,4 km/h. Die Gesamtmasse dieser Lokomotive beträgt 258 t. Trotz Vergrößerung der maximalen Anfahrzugkraft auf fast 80 Mp ist es nicht möglich, die Anhängelast zu steigern, da die Zugvorrichtungen bereits bis zur Grenze beansprucht sind. Eine neuere elektrische Lokomotive der Norwegischen Staatsbahnen, Baureihe EL 11, zeigt Bild 251. Der mechanische Teil entspricht weitgehend den Bo'Bo'-Lokomotiven der Schweizer Bundesbahnen Typ Re4/4. Der Lokomotivkasten ist freitragend und stützt sich auf die beiden austauschbaren Drehgestelle. Es wurde ein radialgeblechter Umspanner mit Hochspannungssteuerung eingebaut. Auch diese Lokomotiven haben sich im praktischen Einsatz gut bewährt.

7.4 Gleichstrom-Lokomotiven

Die Abmessungen neuer Gleichstromlokomotiven sind im Anhang 4 zusammengestellt. Hier ist ebenfalls das Streben nach hoher Leistung bei geringer Eigenmasse deutlich zu erkennen, auch wenn das zum Teil außerordentlich günstige Verhältnis Masse zu Leistungseinheit der Wechselstromlokomotiven im allgemeinen nicht erreicht wird. Die beiden an erster Stelle genannten Lokomotiven der Baureihen E 04 und E 05 wurden vom VEB LEW „Hans Beimler" Hennigsdorf entwickelt und in großer Stückzahl an die Volksrepublik Polen geliefert. Beide Bauarten entsprechen dem neuesten Stand der Technik und weisen beachtliche Fortschritte auf dem Gebiet der Typisierung und Standardisierung auf. So verwenden z. B. beide Lokomotiven den gleichen 530-kW-Motor, der von LEW neu entwickelt wurde und zu den leistungsfähigsten Tatzlagermotoren der Welt gehört. Die zweckmäßige Konstruktion des Fahrgestelles gewährleistet auch bei der Höchstgeschwindigkeit von 110 km/h sehr gute Laufeigenschaften.

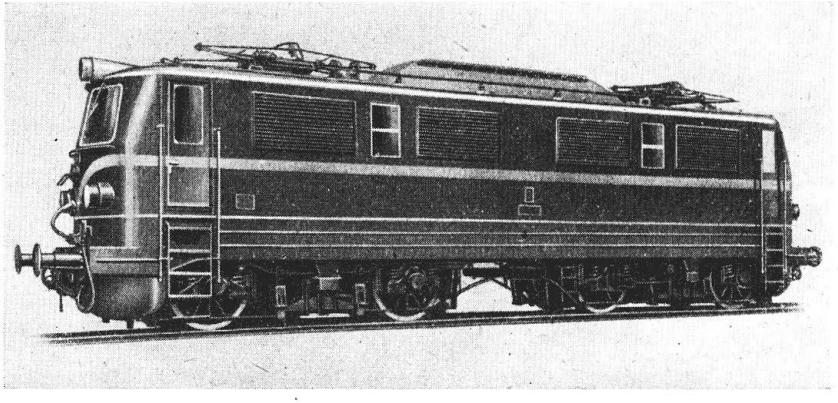


Bild 252. Bo'Bo'-Lokomotive von LEW für Volksrepublik Polen

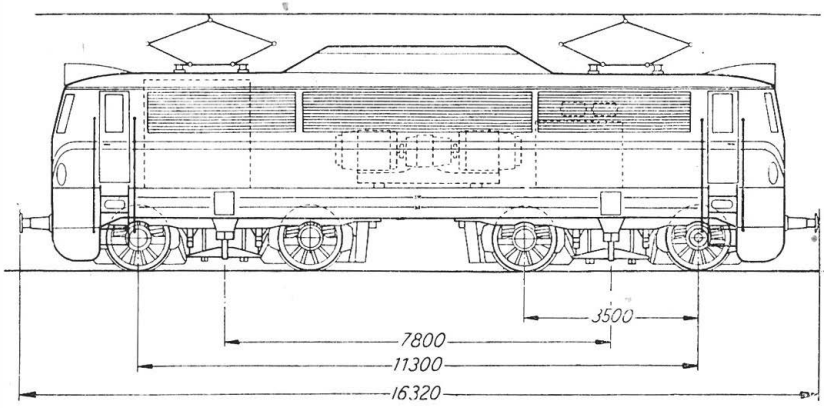


Bild 253. Maßskizze der Lokomotive Achsfolge Bo'Bo'

Bild 252 zeigt die Gesamtansicht der Bo'Bo'-Schnellzuglokomotive und läßt die tiefliegenden Wiegenfedern deutlich erkennen (siehe auch Bild 32). Die wichtigsten Maße dieser Lokomotive sind aus Bild 253 ersichtlich.

Eine Ansicht der Co'Co'-Lokomotive zeigt Bild 254. Auch hier erhielt der Wagenkasten eine moderne und übersichtliche Form, die in Verbindung mit einem zweckmäßigen Farbanstrich zu einem formschönen und verkehrswerbenden Äußeren beiträgt. Die wichtigsten Abmessungen der Co'Co'-Lokomotiven sind aus Bild 255 zu erkennen. Beide Lokomotiven können im Schnellzug- und Güterzugdienst eingesetzt werden. Die sechsachsige Bauart befördert auf ebener Strecke Reisezüge mit einer Masse von 650 t bei einer Geschwindigkeit von 110 km/h und Güterzüge von 2000 t mit 60 km/h. Beide Typen haben sich im Reisezug- und Güterzugdienst gut bewährt.

Die anschließend genannten elektrischen Lokomotiven der Französischen Staatsbahnen zeichnen sich durch ein besonders günstiges Verhältnis Masse zu Leistungseinheit aus. Dieses wurde durch eine selbsttragende Leichtbaukonstruktion des Wagenkastens und durch einen völlig geschweißten und verwindungssteifen Drehgestellrahmen erreicht (Bild 256). Bei der Baureihe BB 9000 wurde mit dem neu entwickelten Kardan-Gummiringantrieb eine sehr zweckmäßige Kraftübertragung vom gefederten Motor zum ungefederten Radsatz geschaffen. Ihre Eignung für besonders hohe Geschwindigkeiten stellte die elektrische Lokomotive mit der Betriebsnummer 9004 bei Schnellfahrversuchen unter Beweis und erreichte am 29. März 1955 die Rekordgeschwindigkeit von 331 km/h, nachdem die elektrische Lokomotive 7107 am Vortage die gleiche Höchstgeschwindigkeit erreicht hatte (Bild 257). Diese Versuche wurden auf der fast geradlinigen Strecke Bordeaux–Dax in Südfrankreich durchgeführt, deren Spannung man vorübergehend auf 1800 V erhöht hatte. Durch umfangreiche theoretische und praktische Untersuchungen wurden diese Schnellfahrten sorgfältig vorbereitet, die Übersetzung der elektrischen Lokomotiven entsprechend abgeändert und mit Rücksicht auf die hohen Zentrifugalkräfte die Radkörper und Radreifen aus einem Stück gefertigt. Außerdem wurde der Luftwiderstand der drei angehängten Reisezugwagen mit einer Masse von 101 t durch Abbau der Lüfter, Griffstangen und Trittbretter

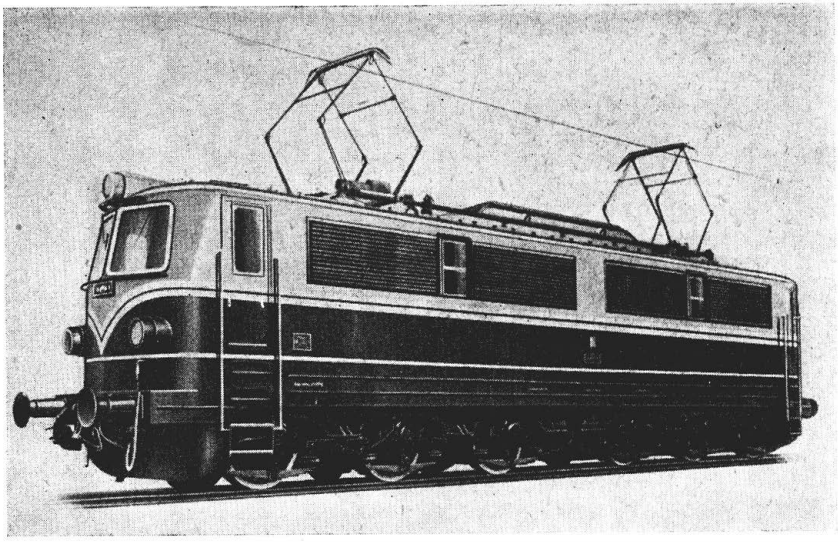


Bild 254. Co'Co'-Lokomotive von LEW für Volksrepublik Polen

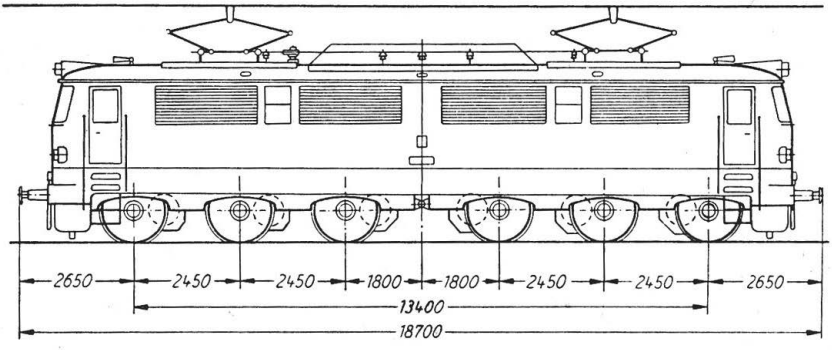


Bild 255. Maßskizze der Lokomotive Achsfolge Co'Co'

verringert und eine allzu starke Wirbelbildung zwischen den einzelnen Fahrzeugen durch Faltenbälge und ein entsprechendes Endstück am Heck des letzten Wagens vermieden. Es dürfte noch interessieren, daß diese Lokomotiven einen Anlaufweg von 21 km benötigten, um eine Geschwindigkeit von 300 km/h zu erreichen und bei den Höchstgeschwindigkeiten eine Stromaufnahme von 4800 A und eine Leistung an den Motorwellen von etwa 8800 kW aufwiesen.

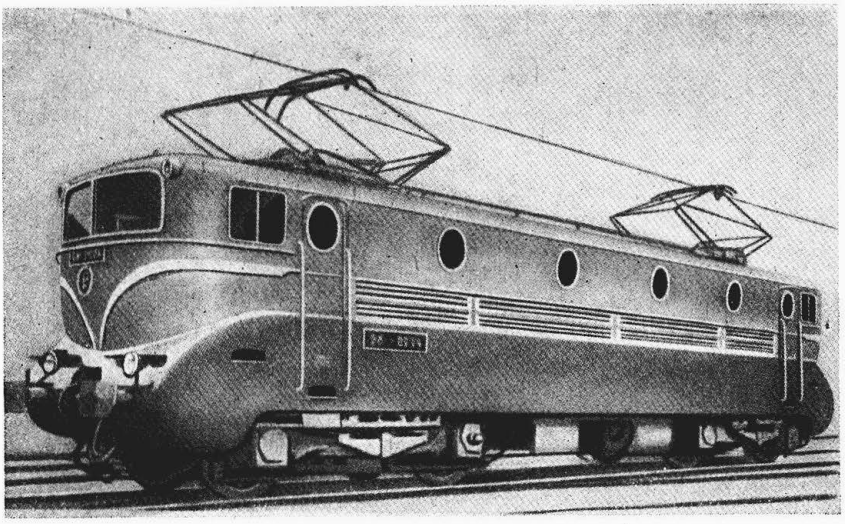


Bild 256. Bo'Bo'-Lokomotive der SNCF Baureihe 9 000

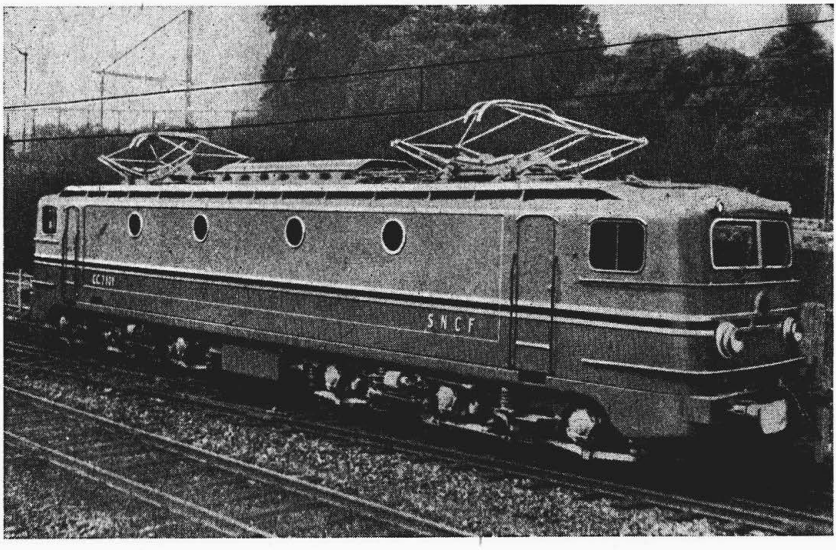


Bild 257. Co'Co'-Lokomotive der SNFC Baureihe 7 100

Die Baureihe BB 9400 ist die modernste Gleichstromlokomotive Frankreichs (Bild 258). Ihr Äußeres ist durch die großen Führerstandsfenster in Rundblick-Anordnung und durch die nichtunterbrochene Reihe der Jalousien in den Seitenwänden des Lokomotivkastens ge-

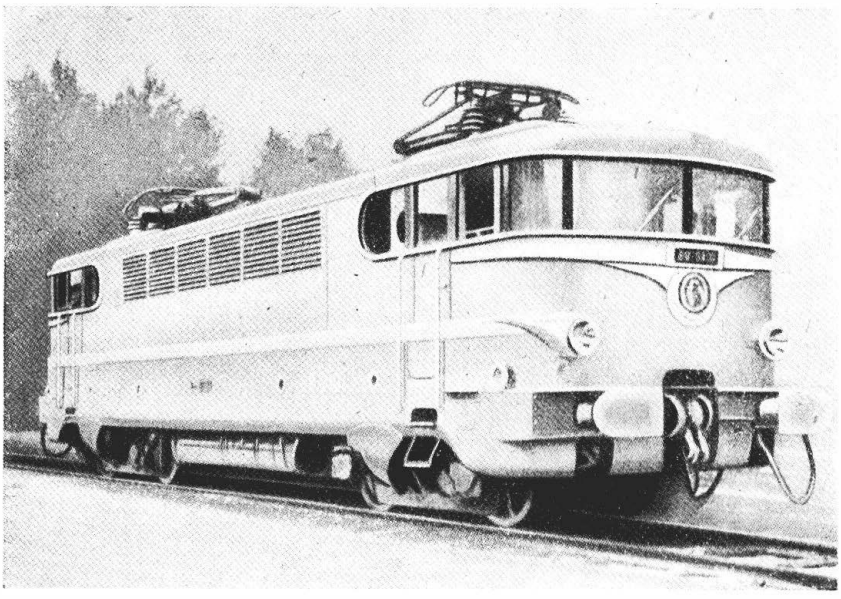


Bild 258. B'B'-Lokomotive der SNFC Baureihe 9400

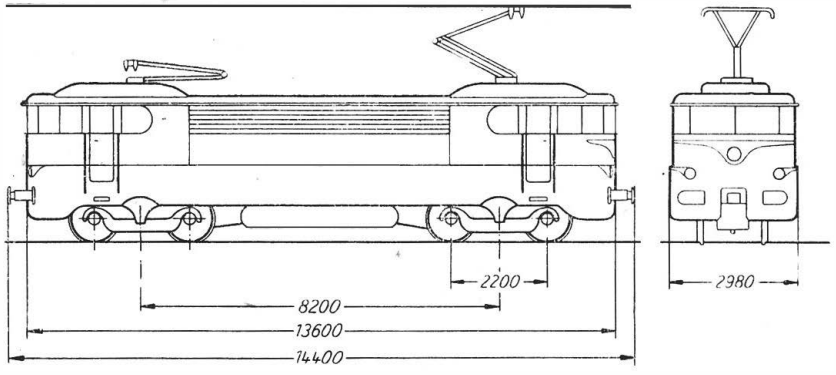


Bild 259. Maßskizze der Baureihe 9 400

kennzeichnet. Die wichtigsten Abmessungen gehen aus Bild 259 hervor. Der Lokomotivkasten stützt sich über Gleitstützen pendelnd auf die Drehgestelle ab. Drehzapfen sind nicht vorhanden.

Jedes Drehgestell hat nur einen Motor, der bei einer Masse von 6295 kg eine Stundenleistung von 1152 kW aufweist (Bild 260). Das Drehmoment wird über Zwischenräder und

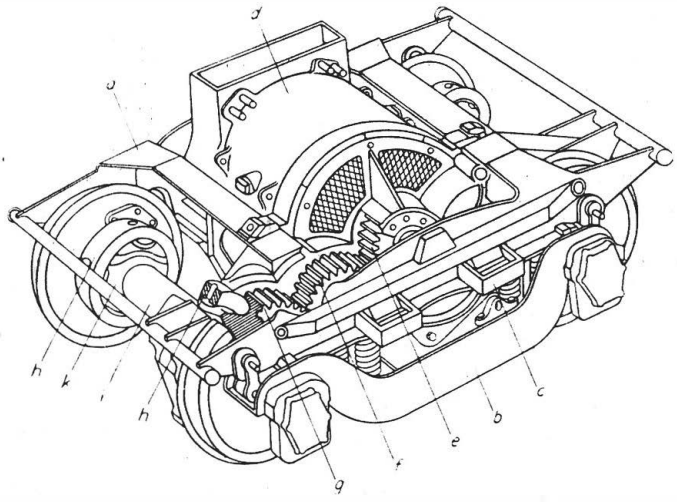


Bild 260. Drehgestell einer elektrischen Lokomotive der Baureihe 9 400

a Drehgestellrahmen
b Schwanenhalsträger
c Auflagerung des Lokomotivkastens
d Fahrmotor
e Motorritzel
f Zwischenzahnrad
g Vorgelegerad
h Gummiring
i Torsions-Hohlwelle
k Mitnehmer

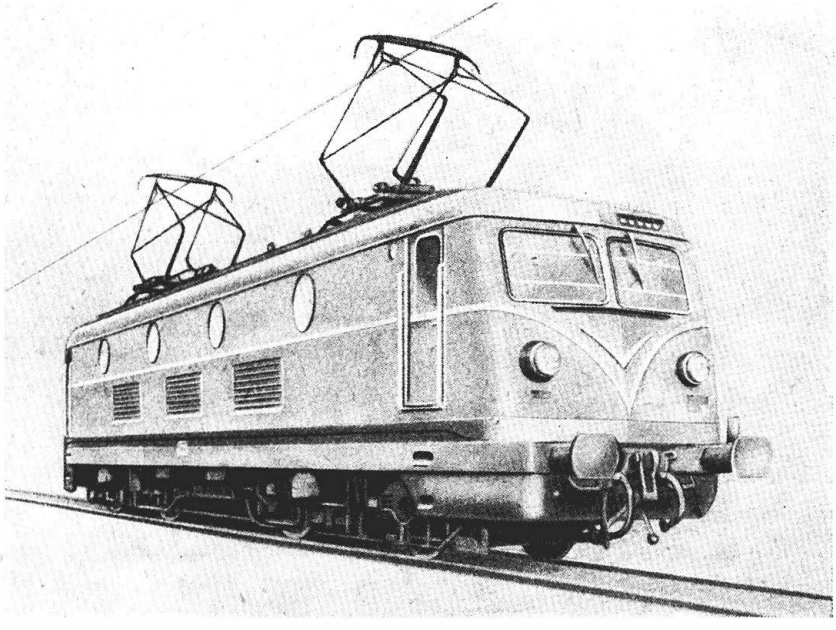


Bild 261. Bo'Bo'-Lokomotive der Belgischen Staatsbahn Baureihe 123

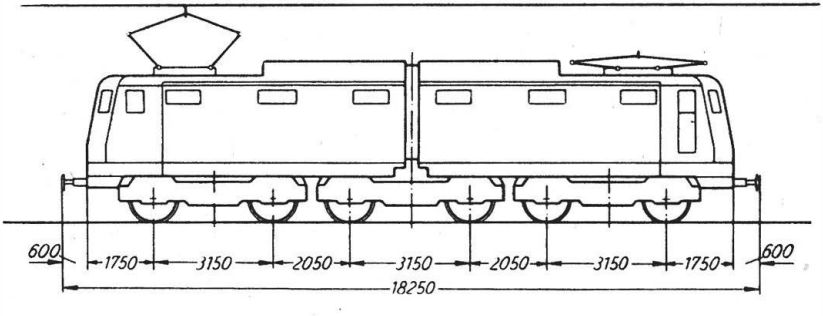


Bild 262. Maßskizze der italienischen Lokomotive Baureihe E 646

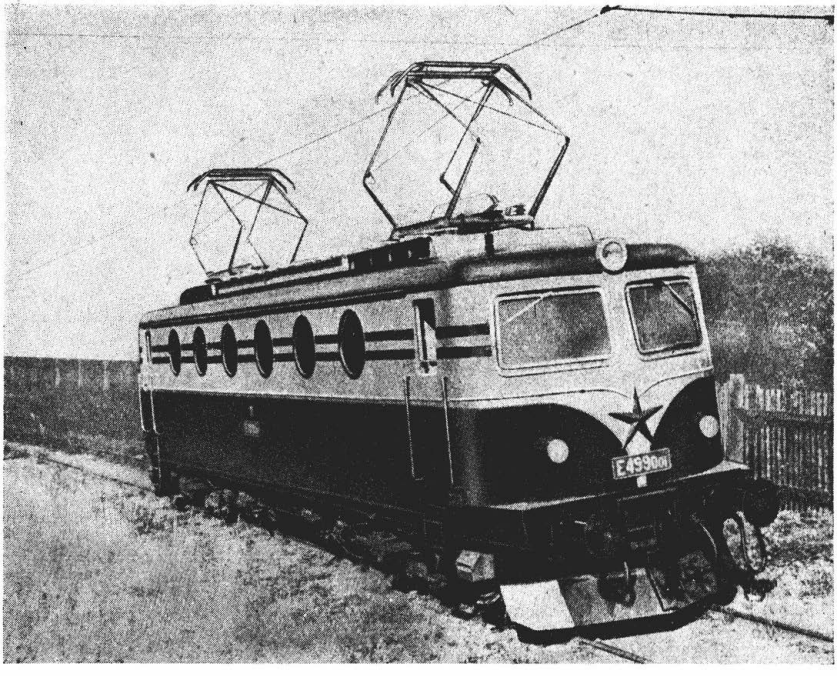


Bild 263. Bo′Bo′-Lokomotive der ČSSR Baureihe E 494

den bekannten Kardan-Gummiringantrieb auf die beiden somit gekuppelten Achsen eines Drehgestelles übertragen. Infolge der geringen Eigenmasse ist diese Lokomotive tür den leichten Reisezug- und Güterzugdienst besonders geeignet. Ihre Leistung reicht aus, um Reisezüge mit einer Masse von 800 t in der Ebene mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h

zu befördern. Im Güterzugdienst erreicht sie mit einer Zugmasse von 1100 t auf einer Steigung von 8,8‰ eine Geschwindigkeit von 50 km/h.
Auch die Belgischen Staatsbahnen (SNCB) haben in den letzten Jahren den elektrischen Zugbetrieb stark ausgedehnt und im Einvernehmen mit der Luxemburger Eisenbahngesellschaft eine große Anzahl Lokomotiven der Baureihe 123 beschafft (Bild 261).
In Italien machte sich durch die fortschreitende Elektrifizierung mit 3 kV-Gleichstrom und durch die laufende Umstellung noch vorhandener Drehstromstrecken ebenfalls die Konstruktion neuer elektrischer Lokomotiven erforderlich. Bei der sechsachsigen Schnellzuglokomotive E 646 sind die Achsfolge Bo'Bo'Bo' und auch der Aufbau des Wagenkastens beachtenswert (Bild 262). Dieser ist nämlich geteilt, und die beiden Hälften stützen sich jeweils auf das äußere Drehgestell und gemeinsam auf das mittlere Drehgestell ab, das gewissermaßen als Jakobsgestell ausgebildet ist.
Bei der tschechischen Lokomotive Baureihe E 499 handelt es sich um eine gelungene Neukonstruktion der Lenin-Werke in Pilsen (Bild 263). Diese Lokomotive ist als Universallokomotive für die Beförderung von Schnell- und Güterzügen gleich gut geeignet und erreichte bei Probefahrten eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h. Sie ist zur Zeit die leistungsfähigste Bo'Bo'-Lokomotive für 3000 V Gleichstrom und 20 Mp Achslast.
Die beiden im Anhang 4 an letzter Stelle genannten Typen sind Neukonstruktionen der UdSSR. Beide Typen wurden im mechanischen und elektrischen Teil weitgehend vereinheitlicht und sind auch mit den gleichen Tatzlagermotoren ausgerüstet. Sie werden auf steilen Gebirgsstrecken und unter schwierigen klimatischen Verhältnissen eingesetzt und müssen sehr hohen und niedrigen Außentemperaturen gewachsen sein. Sie sind für schwere Güterzüge bestimmt, für deren Beförderung vorher zwei oder drei leichtere elektrische Lokomotiven verwendet wurden, die miteinander gekuppelt waren und durch Zugsteuerung vom vordersten Führerstand aus bedient wurden.

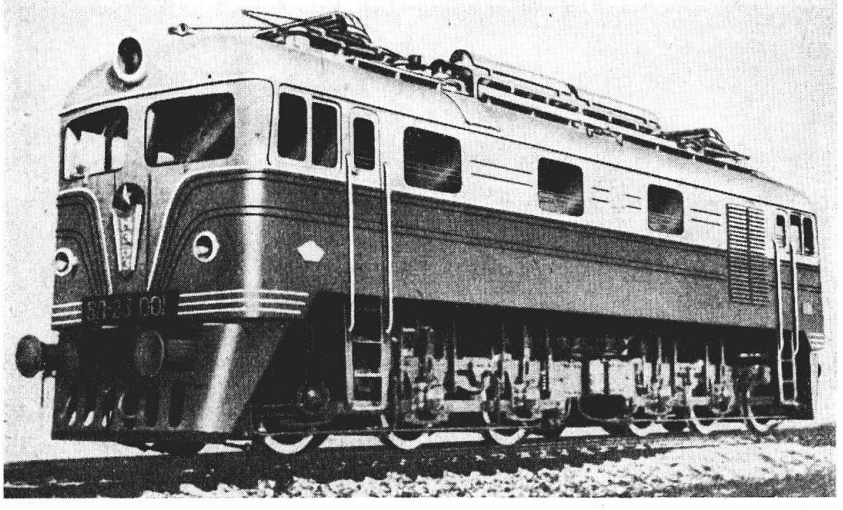


Bild 264. Co'Co'Lokomotive der UdSSR Baureihe WL-23

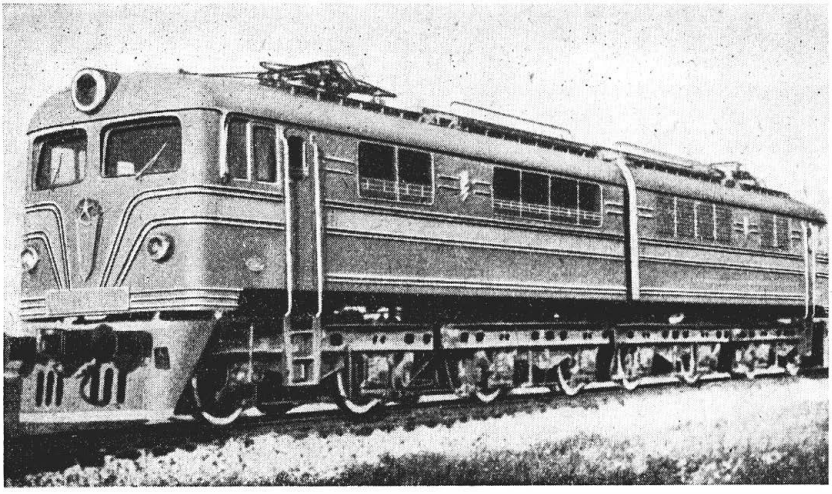


Bild 265. Bo'Bo'+Bo'Bo'-Lokomotive der UdSSR Baureihe N-8

Die leichtere Type WL 23 (Bild 264) ist eine Weiterentwicklung der bewährten Type WL 22-m und durchaus in der Lage, in der Ebene eine Zugmasse von maximal 4500 t mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h zu befördern.
Die Doppellokomotive Type N-8 ist für den schweren Güterzugdienst auf Gebirgsstrecken besonders geeignet und daher auch mit Nutzbremsung ausgerüstet (Bild 265). Sie hat einen zweiteiligen, durch Faltenbälge verbundenen Wagenkasten, der sich auf insgesamt vier Drehgestelle abstützt. Die Lokomotive entwickelt sehr hohe Zugkräfte und befördert Züge von

4300 t bei 6 ‰ Steigung mit einer Geschwindigkeit von 68 km/h,
3200 t „ 8 ‰ „ „ „ „ „ 64 km/h und
2400 t „ 12 ‰ „ „ „ „ „ 60 km/h.

Die Zug- und Stoßvorrichtungen sind bei diesen Lokomotiven an den Drehgestellen angebracht, die alle miteinander gekuppelt sind.

7.5 Deutsche Wechselstrom-Lokomotiven für 50 Hz

Im Anhang 5 sind verschiedene Deutsche Wechselstromlokomotiven für 50 Hz zusammengestellt. Die ersten vier davon sind Versuchslokomotiven der Deutschen Reichsbahn, die im Jahre 1936 für die Höllentalbahn im Schwarzwald entwickelt wurden. Die an fünfter Stelle genannte Lokomotive wurde von der Deutschen Bundesbahn im Jahre 1950 für das gleiche Streckennetz beschafft. Die ersten beiden Lokomotiven sind mit ruhenden Quecksilberdampf-Gleichrichtern ausgerüstet und wandeln den durch den Fahrdraht zugeführten Wechselstrom in Gleichstrom um, der dann Reihenschlußmotoren antreibt. Die Firma SSW wählte für den Antrieb Einphasen-Kommutatormotoren für 50 Hz, während

die Firma Krupp in ihrer Umformerlokomotive die von ihr entwickelten Einphasen-Induktionsmotoren mit Zwischenläufern einbaute. Die zuletzt beschaffte E 244 22 ist mit vier Einphasen-Kommutatormotoren in Tatzlagerbauart (Tandemmotoren) ausgestattet (siehe Abschnitt 5).

Fast 25 Jahre wurde die Höllentalbahn mit Wechselstrom der Industriefrequenz gespeist, ohne daß sich nennenswerte Beanstandungen ergaben. Wenn diese Strecken nun im Jahre 1960 auf $16\,^2/_3$ Hz umgestellt wurden, so ist das darauf zurückzuführen, daß die vor etwa 25 Jahren gebauten Lokomotiven jetzt verbraucht waren und ausgemustert werden mußten. Hinzu kommt, daß der Ausgangsbahnhof der Höllentalbahn, Freiburg (Br.), inzwischen an die mit $16\frac{2}{3}$ Hz elektrifizierte Rheintalstrecke angeschlossen wurde, so daß sich bei Aufrechterhaltung des 50-Hz-Betriebes unnötige Erschwernisse ergeben hätten.

Bei der an nächster Stelle genannten Lokomotive für 50 Hz handelt es sich um eine Neukonstruktion, deren elektrische Ausrüstung die Siemens-Schuckert-Werke AG, Erlangen, und deren mechanischen Teil die Friedrich-Krupp-Maschinenfabriken, Essen, herstellten. Diese Type wurde im Auftrage der UdSSR entwickelt, die im Mai 1959 einen Auftrag über 20 Stück dieser schweren Güterzuglokomotiven erteilte. Sie sind in der Lage, Anhängelasten von 3000 t auf Steigungen bis zu $10\,^0/_{00}$ zu befördern. Mit einer Stundenleistung von 4900 kW gehören sie zu den stärksten sechsachsigen Lokomotiven, die bisher gebaut wurden. Die Lokomotiven sind mit Gleichstrommotoren, Siliziumgleichrichtern und einer elektrischen Widerstandsbremse ausgerüstet. Zu den hohen Leistungsanforderungen tritt noch die Bedingung, daß diese Lokomotiven sowohl in heißen Zonen mit Außentemperaturen von + 40 °C wie auch in Sibirien mit Temperaturen von — 50 °C universell einsatzfähig sein müssen.

Am Ende der Zusammenstellung deutscher Wechselstromlokomotiven für 50 Hz ist die Neukonstruktion angeführt, die zur Zeit beim VEB Lokomotivbau Elektrotechnische Werke (LEW) „Hans Beimler", Hennigsdorf, gebaut wird. Da der mechanische Teil und auch die elektrische Ausrüstung dieser Lokomotiven bereits im Abschnitt 5.33 erläutert wurden, erübrigt sich an dieser Stelle eine weitere Beschreibung.

7.6 Ausländische Wechselstrom-Lokomotiven für 50 Hz

Bei den im Anhang 6 genannten Wechselstromlokomotiven für 50 Hz handelt es sich um Neukonstruktionen des Auslandes. In Auswertung der auf der Höllentalbahn gesammelten Erfahrungen hat Frankreich auf einem eigenen Streckennetz Großversuche mit Industriestrom fortgesetzt und sich somit für die Weiterentwicklung der 50-Hz-Lokomotiven große Verdienste erworben. Das äußere Bild der Baureihen 12 000, 13 000 und 14 000 zeigt, daß die Konstruktion bei diesen Lokomotiven von den bisherigen Gepflogenheiten abweicht und anstelle der beiden Führerstände an den Stirnseiten ein in der Fahrzeugmitte liegender Zentralführerstand und lange niedrige Vorbauten gewählt wurden. Bild 266 zeigt die Maßskizze der BB 12 000 und läßt erkennen, daß das Dach des Führerstandes in beiden Fahrtrichtungen beträchtlich vorgezogen wurde, um eine entsprechende Auflage für die beiden Stromabnehmer zu schaffen. Bei den Lokomotiven der Baureihe 12 000 wird in acht wassergekühlten Ignitrons ein welliger Gleichstrom erzeugt, der die acht Fahrmotoren speist. Die beiden Treibachsen eines Drehgestelles sind durch Zahnräder gekuppelt, um die Schleudergefahr herabzusetzen. Diese Lokomotiven weisen daher sehr hohe Anfahrkräfte auf und haben im Güterzugdienst etwa die gleichen Förderleistungen vollbracht wie

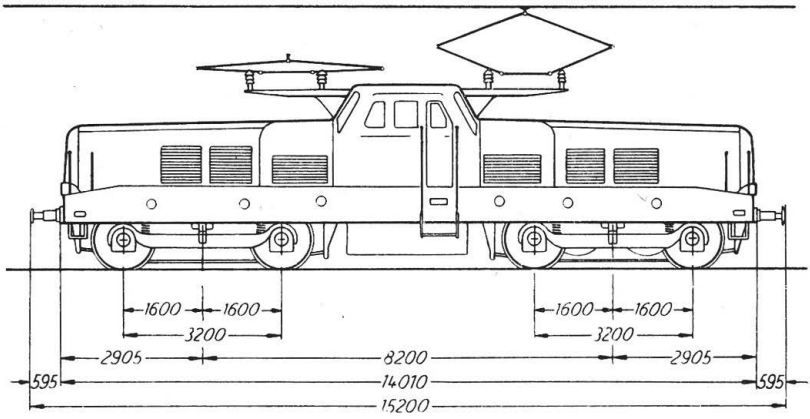


Bild 266. Maßskizze der französischen Lokomotive BB 12 000

die 124 t schwere Co'Co'-Type. So konnten die Lokomotiven der Baureihe BB 12 000 z. B. auch in den Wintermonaten unter ungünstigsten Witterungsbedingungen auf Steigungen von 10 ‰ Anfahrten mit einer Zugmasse von 1860 t einwandfrei bewältigen. Bei Probefahrten mit Zügen von insgesamt 2223 t wurde eine maximale Zugkraft am Zughaken von 38 Mp gemessen und eine Anfahrbeschleunigung von 0,032 m/s² erreicht.
Von dieser Type wurden im Jahre 1957 insgesamt 33 Stück an die UdSSR geliefert.

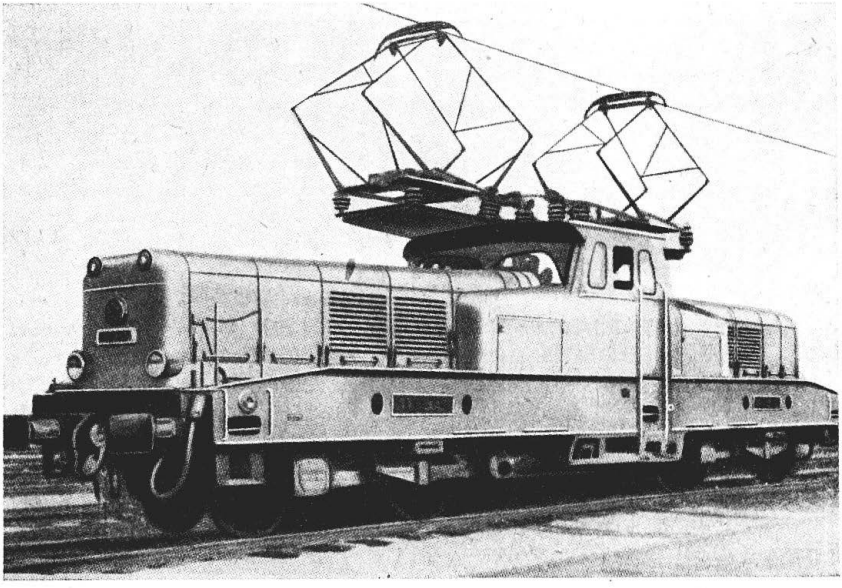


Bild 267. Bo'Bo'-Lokomotive der Französischen Staatsbahn Baureihe BB 13 000

Im Gegensatz zu dieser mit Ignitrons ausgerüsteten Bauart werden die Lokomotiven der Baureihe BB 13 000 durch Einphasenwechselstrom-Kommutatormotoren für 50 Hz angetrieben (Bild 267). Beide Typen sind für den gemischten Dienst bestimmt und mit Rücksicht auf die über 100 km/h liegende Höchstgeschwindigkeit mit Gestellmotoren und einem elastischen Antrieb ausgerüstet. Der mechanische Aufbau ist bei beiden Lokomotiven gleich. Für den Güterzugdienst wurden ebenfalls zwei verschiedene Typen entwickelt, und zwar die Baureihen CC 14 000 und CC 14 100. Ihr mechanischer Teil ist völlig gleich. Da ihre Höchstgeschwindigkeit nur 60 km/h beträgt, konnten Tatzlagermotoren verwendet werden. Bild 268 zeigt den Aufbau der Baureihe CC 14 000. Sie hat zwei Umformer, nämlich einen Einphasenstrom/Gleichstromumformer und einen Gleichstrom/Drehstrom-Umformer, der als Frequenzumformer arbeitet. Der Synchronmotor des ersten Umformers ist gleichzeitig Phasenspalter. Er liefert die dritte Phase für den läufererregten Drehstromgenerator des Frequenzumformers. Die sechs Fahrmotoren sind Drehstrom-Induktionsmotoren mit Käfigläufern.

Im Gegensatz dazu besitzt die Baureihe CC 14 100 nur einen Umformer und sechs Gleichstromfahrmotoren. Beide Typen sind für Nutzbremsung eingerichtet.

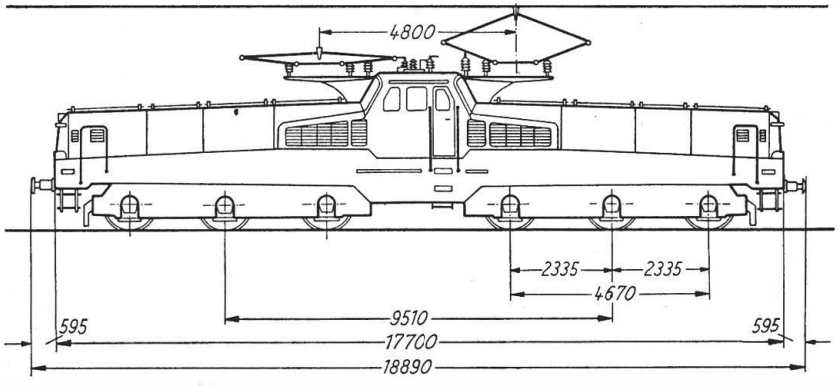


Bild 268. Maßskizze der französischen Lokomotive CC 14 000

Auch die im Jahre 1958 entwickelte Baureihe BB 16 500 ist interessant und verdient, an dieser Stelle besonders erwähnt zu werden (Bild 269). Diese Lokomotiven besitzen ein Getriebe, das im Stillstand mühelos umgestellt werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, die Übersetzung zwischen Motor und Treibachse von 1:1,88 auf 1:3,22 zu verändern, je nachdem, ob die Lokomotive im Güterzugdienst mit einer Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h oder im Schnellzugdienst mit maximal 150 km/h eingesetzt werden soll (Bilder 270 und 271). Das Getriebe ist auf der einen Seite des Drehgestelles außerhalb der Räder angeordnet.

Neu ist auch, daß diese Lokomotive je Drehgestell nur einen Motor besitzt, der sein Drehmoment über einen Gelenkstangenantrieb an die Treibachsen überträgt. Die Motoren werden von je zwei Ignitron-Gleichrichtern gespeist, die Steuerung ist als Hochspannungs-

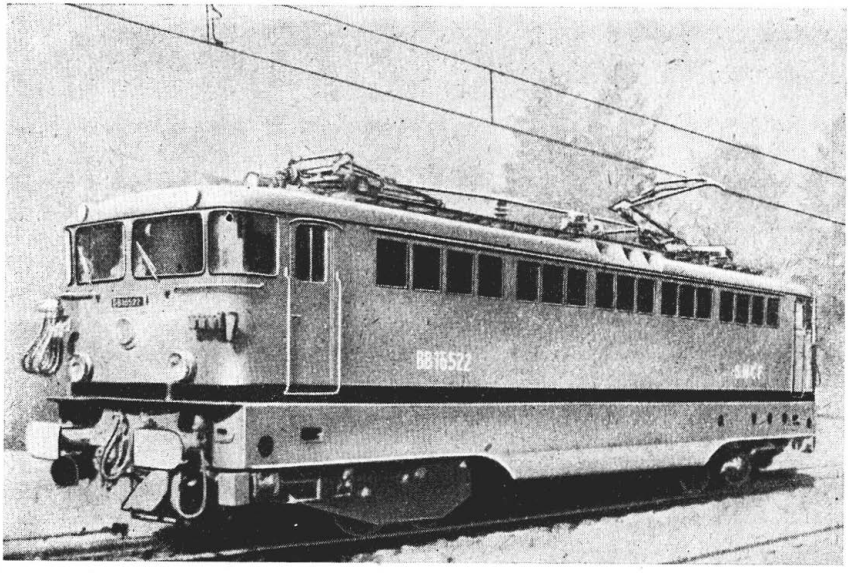


Bild 269. B'B'-Lokomotive der Französischen Staatsbahn Baureihe BB 16 500

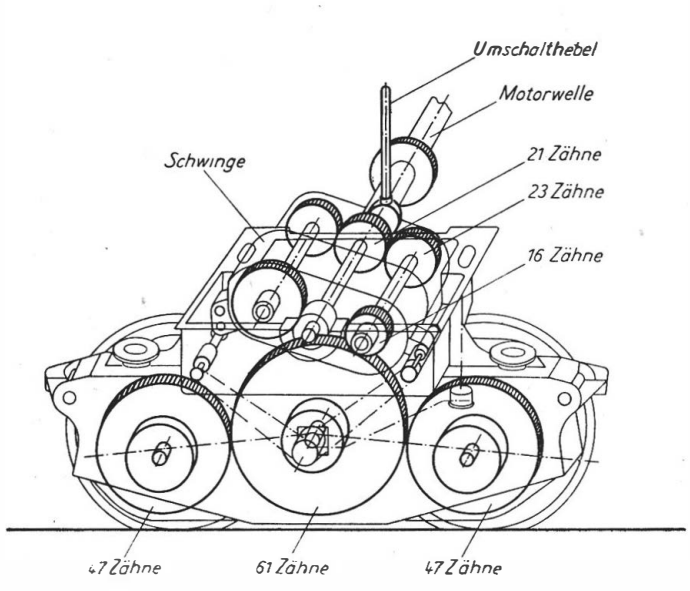


Bild 270. Getriebe in Stellung Güterzugdienst

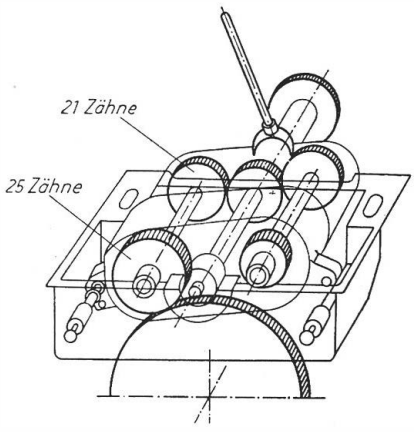


Bild 271
Getriebe in Stellung Reisezugdienst

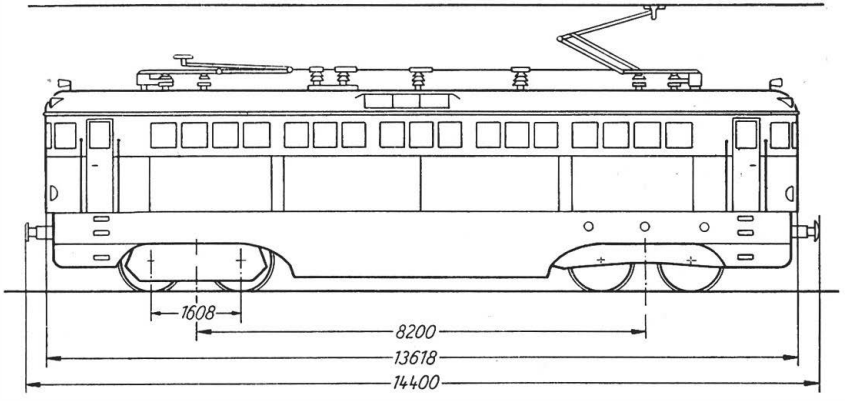


Bild 272. Maßskizze der französischen Lokomotive BB 16 500

steuerung ausgebildet. Die Abmessungen dieser Lokomotiven sind aus Bild 272 zu erkennen.

Die beiden anschließend genannten elektrischen Lokomotiven sind Neukonstruktionen, die im Jahre 1959 von den französischen Firmen Alsthom und MTE für die Sowjetunion entwickelt wurden. Die Bestellung umfaßte insgesamt

30 Stück Co'Co'-Güterzuglokomotiven der Baureihe Φ 01,

10 Stück Co'Co'-Güterzuglokomotiven mit Widerstandsbremse der Baureihe Φ P 01 und

10 Stück Co'Co'-Schnellzuglokomotiven der Baureihe $\Phi\pi$ 01.

Außerdem wurden 25 Lokomotiven gleicher Bauart von der Volksrepublik China in Auftrag gegeben. Als Bedingung wurde gestellt, daß sämtliche Lokomotiven mit Ignitron-Gleichrichtern ausgerüstet werden und in einem Temperaturbereich von — 50°C bis

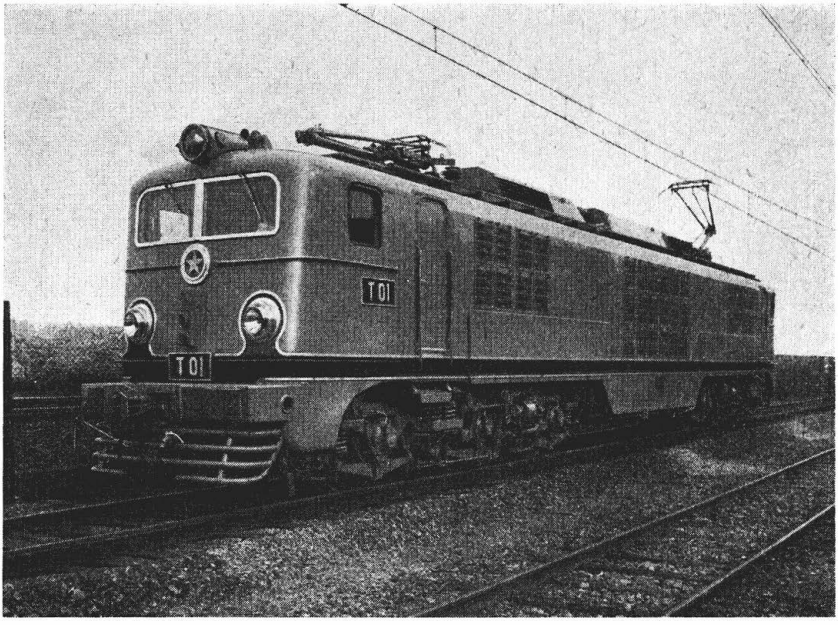


Bild 273. Wechselstromlokomotive für 50 Hz Baureihe Φ 01

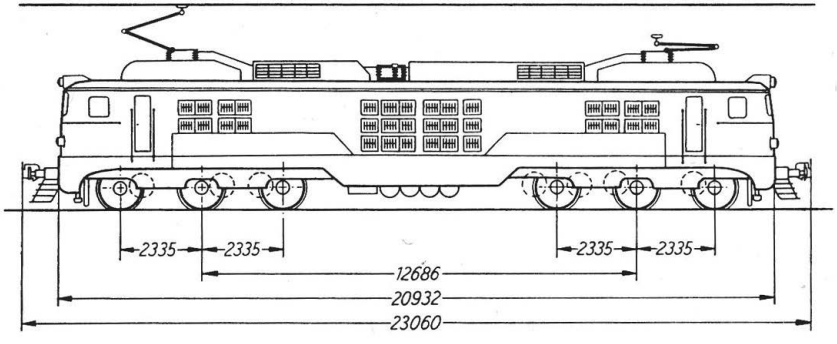


Bild 274. Maßskizze einer elektrischen Lokomotive der Baureihe Φ 01

+40°C betriebssicher arbeiten. Bei diesen Konstruktionen wurden die Erfahrungen mit den französischen elektrischen Lokomotiven der Baureihen 14 000 und 14 100 und mit den sowjetischen Lokomotiven der Baureihe N-60 ausgewertet. Das Äußere der Lokomotiven der Baureihe Φ 01 (frühere Bezeichnung T 01) zeigt Bild 273. Die wichtigsten Abmessungen sind aus Bild 274 zu erkennen.

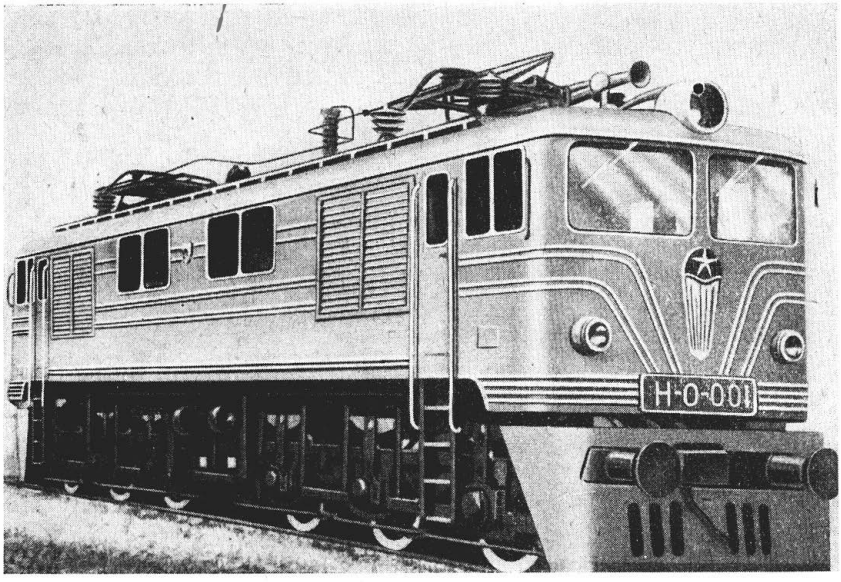


Bild 275. Sowjetische Co'Co' Wechselstromlokomotive Baureihe N-0

Die im Jahre 1954 von sowjetischen Konstrukteuren entwickelten Wechselstromlokomotiven der Baureihe N-0 besitzen acht einanodige wassergekühlte Ignitrons, die den Wechselstrom in Gleichstrom umformen (Bild 275). Ein automatisches Schaltwerk, das durch einen Servomotor angetrieben wird, ermöglicht ein selbsttätiges Höherschalten der Steuerung mit verschiedenen Schaltgeschwindigkeiten und somit eine sehr gute Ausnutzung der Anfahrzugkraft. Nähere Einzelheiten der elektrischen Ausrüstung sind aus Bild 276 zu erkennen.

Im Jahre 1958 wurde eine neue sowjetische Wechselstromlokomotive für 50 Hz Baureihe N-60 entwickelt (Bild 277). Auch diese Lokomotive ist mit acht Ignitrons ausgerüstet, die in zwei Gruppen aufgeteilt sind und je drei Fahrmotoren speisen. Es sind sechspolige Reihenschlußmotoren in Tatzlagerbauart. Die Steuerung wird durch vier Feldschwächungsstufen erweitert.

Die ungarische elektrische Lokomotive V 55 verwendet ebenfalls Einphasen-Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz und ist mit Phasen- und Periodenumformern ausgerüstet. Sie unterscheidet sich von allen übrigen elektrischen Lokomotiven durch das unsymmetrische Fahrwerk; denn sie hat vorn ein zweiachsiges und hinten ein dreiachsiges Drehgestell (Bild 278). Als Tragfedern werden ausschließlich Schraubenfedern verwendet. Da diese keine Eigendämpfung aufweisen, war der zusätzliche Einbau von Stoßdämpfern erforderlich.

Am Rande seien noch einige neue amerikanische Lokomotiven für Einphasen-Wechselstrom und eine Frequenz von 25 Hz erwähnt, die in ihrem Aufbau von den bisher beschriebenen Konstruktionen wesentlich abweichen. Die beiden Standardtypen, die in

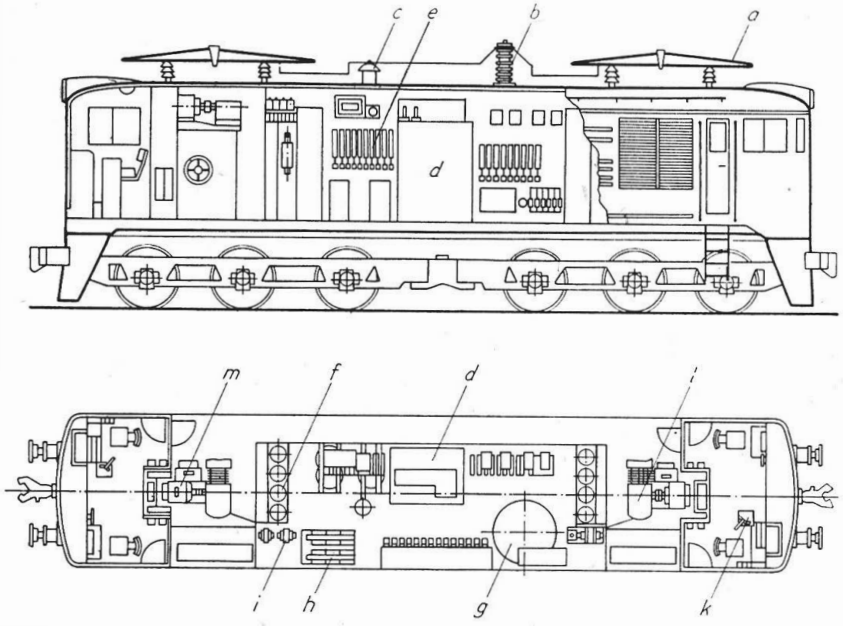


Bild 276. Anordnung der elektrischen Ausrüstung der sowjetischen Gleichrichterlokomotive Baureihe N-0

a Stromabnehmer
b Überspannungsableiter
c Hauptschalter
d Umspanner
e Schützensteuerung
f Ignitrons
g Glättungsdrossel
h Anodenschalter
i Motorgenerator für Steuerstrom
k Fahrschalter
l Luftpresser
m Lüfter

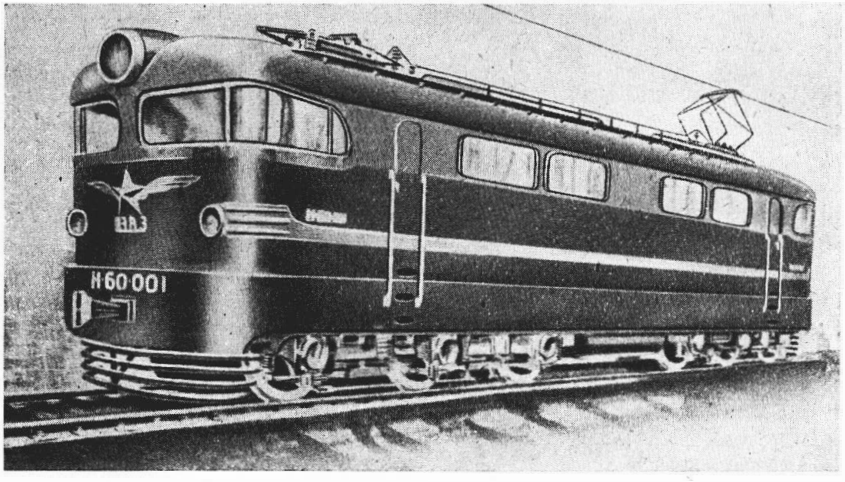


Bild 277. Sowjetische Co'Co'-Wechselstromlokomotive Baureihe N-60

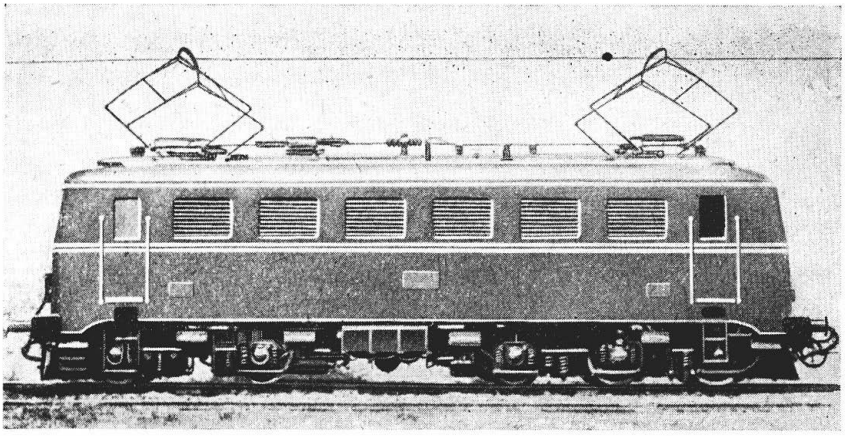


Bild 278. Ungarische Einheitslokomotive Baureihe V 55, Achsfolge Bo'Co'

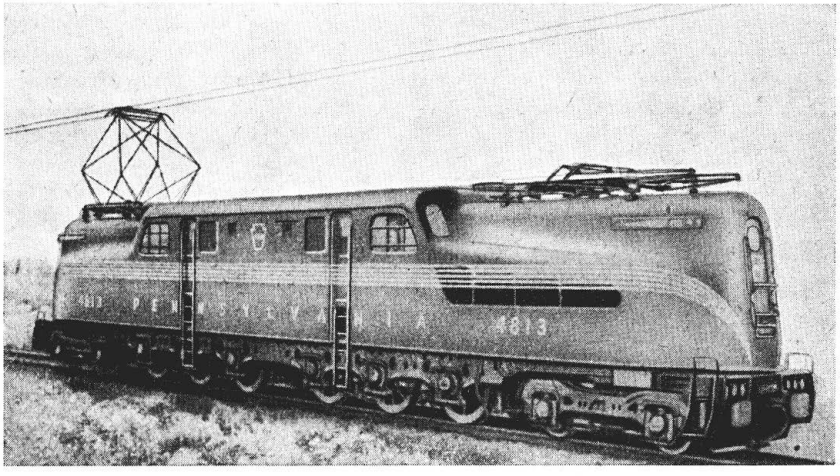


Bild 279. Amerikanische (2'Co) (Co2')-Wechselstromlokomotive für 50 Hz

großen Serien gebaut wurden, haben an beiden Enden noch führende Drehgestelle, so daß sich die Achsfolge (2'Co) (Co2') bzw. (2'Do) (Do2') ergibt (Bild 279). Sie sind sehr solide gebaut, leicht zu unterhalten und meist mit Nutzbremse und Schützensteuerung ausgerüstet. Bei einer neuen elektrischen Lokomotive, die für den schweren Güterzugdienst auf starken Steigungen bestimmt ist, werden auch die in den Drehgestellen gelagerten Achsen noch durch Tatzlagermotoren angetrieben, so daß sich die Achsfolge Bo'Do' + Do'Bo' ergibt. Diese Lokomotiven entwickeln eine Dauerzugkraft von 53 Mp und er-

reichen eine Höchstgeschwindigkeit von 105 km/h, leisten jedoch bei einer Gesamtmasse von 326 t nur etwa 3700 kW. Sie sind also im Vergleich zu den vorgenannten Lokomotiven ungewöhnlich schwer.

8 Betrieb mit elektrischen Lokomotiven

Als Abschluß dieser Ausführungen über elektrische Lokomotiven für Vollbahnen sollen einige kurze Hinweise für den Betrieb mit elektrischen Lokomotiven dienen. Das ist erforderlich, weil dieser zum Teil ganz erheblich von dem bekannten Betrieb mit Dampflokomotiven oder Dieselfahrzeugen abweicht.

8.1 Zugkraft und Leistung einer elektrischen Lokomotive

Die Zugkraft, die eine elektrische Lokomotive am Zughaken ausübt, wird hauptsächlich durch die Leistung der Fahrmotoren bestimmt, sie hängt aber auch von der Haftreibung zwischen Rad und Schiene ab, die von der Reibungslast der Lokomotive G_1 und dem Reibwert beeinflußt wird. Dabei ist die Reibungslast gleich der Summe der Achslasten der angetriebenen Achsen. Bei Einzelachsantrieb ist jedoch zu beachten, daß die einzelnen Achsen unter Umständen recht unterschiedlich belastet werden können. Dies ist z. B. bei Drehgestell-Lokomotiven mit Tatzlagermotoren der Fall (siehe Abschnitt 2.3221) und wird nur zum Teil durch Achslastausgleicher abgestellt. Die einzelnen Treibachsen werden auch dann ungleichmäßig belastet, wenn eine elektrische Lokomotive beim Anziehen eines schweren Zuges „aufbäumt". Dies bedingt eine Entlastung der vorderen und eine zusätzliche Belastung der hinteren Achsen und ist auf das Moment aus der Zugkraft, die am Zughaken angreift, und ihrem Abstand von der Schienenoberkante bzw. Achsmitte zurückzuführen.

Der Haftwert μ ist von der Oberflächenbeschaffenheit der Schienen abhängig und liegt bei elektrischen Lokomotiven etwas höher als bei Dampflokomotiven, da dort die Zugkraft infolge der sich ständig ändernden Kolbenkräfte stark schwankt. Dieser Wert beträgt bei niedrigen Geschwindigkeiten und trockenen oder vollkommen nassen Schienen etwa 0,33, er fällt bei feuchten oder durch Schmieröl verunreinigten Schienen auf 0,15, bei starkem Laubfall sogar auf 0,1 ab und kann durch Sandstreuen vorübergehend auf 0,4 erhöht werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit fällt der Reibwert allmählich ab (siehe Bild 178).

Soll ein Wagenzug mit einer bestimmten Masse auf einer geraden ebenen Strecke von der Länge l befördert werden und bezeichnet man die am Zughaken aufzubringende Zugkraft mit Z_W, dann ist die zu verrichtende Arbeit

$$A_W = 1000\ Z_W\ l$$

A_W in mkp
Z_W in kp
l in km

Soll die Beförderung in der Zeit t erfolgen, so errechnet sich die am Zughaken aufzubringende Leistung

$$P_W = 1000\ Z_W \frac{l}{t}$$

$$= 1000\ Z_W\ v$$

P_W in mkp/s
t in s
v in km/s

Wird die Leistung P_W in PS ausgedrückt (1 PS = 75 mkp/s), so beträgt

$$P_W = \frac{1000}{75} Z_W V$$

$$= \frac{1000}{3600 \cdot 75} Z_W V \qquad P_W \text{ in PS}, \; V \text{ in km/h}$$

$$= \frac{Z_W V}{270}$$

Da nach gesetzlicher Verordnung (Verordnung vom 14. 8. 1958 über die physikalisch-technischen Einheiten) die Leistung bevorzugt in kW anzugeben ist, beträgt die für die Fortbewegung eines angehängten Wagenzuges erforderliche Leistung

$$P_W = \frac{Z_W V}{367} \qquad P_W \text{ in kW}$$

Andererseits benötigt die elektrische Lokcmotive, um sich selbst auf der gleichen Strecke mit der gleichen Geschwindigkeit fortzubewegen, die Leistung

$$P_L = \frac{Z_L V}{367} \qquad P_L \text{ in kW}, \; Z_L \text{ in kp}$$

Die gesamte, am Treibradumfang der elektrischen Lokomotive aufzubringende Leistung beträgt daher

$$P_{Ges} = \frac{(Z_L + Z_W) V}{367} \qquad P_{Ges} \text{ in kW}$$

oder allgemein

$$P = \frac{Z V}{367} \qquad P \text{ in kW}$$

Diese Leistung muß ausreichen, um den größten jeweils auftretenden Widerstand des gesamten Zuges zu überwinden.

8.2 Fahrwiderstände

Der Zugwiderstand W besteht aus

dem Bahnwiderstand der elektrischen Lokomotive	W_L,
dem Bahnwiderstand der Wagen	W_W,
dem Steigungswiderstand	W_s,
dem Krümmungswiderstand	W_k und
dem Beschleunigungswiderstand	W_b,

die je nach den Streckenverhältnissen einzeln oder zusammen auftreten.

$$W = W_L + W_W + W_s + W_k + W_b \qquad W \text{ in kp}$$

Anstelle des Zugwiderstandes W kann man auch die Widerstandsziffer w angeben. Der Zugwiderstand wird dann auf die jeweilige Lokomotiv- bzw. Zuglast G bezogen.

$$W = w\,G \qquad \begin{matrix} w \text{ in kp/Mp} \\ G \text{ in Mp} \end{matrix}$$

8.21 Bahnwiderstand der elektrischen Lokomotive

Der Bahnwiderstand W_L einer elektrischen Lokomotive auf gerader ebener Strecke besteht aus dem Lagerwiderstand, dem Getriebewiderstand und dem Luftwiderstand. Der Lagerwiderstand ist bei Gleitlagern größer als bei Wälzlagern und wird durch die Schmierung und den Unterhaltungszustand der Achslager beeinflußt. Der Getriebewiderstand hängt ab von der Art der Kraftübertragung vom gefederten Motor zu den ungefederten Radsätzen und ist bei Einzelachsantrieben günstiger als bei Stangenantrieben. Der Luftwiderstand ist auf den Staudruck an der Stirnfläche, die Reibung an den Seitenwänden, am Dach und Boden und auf den Sog hinter dem Fahrzeug zurückzuführen. Er ist abhängig von der Form der Fahrzeuge, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung. Da der Staudruck mit dem Quadrat der Geschwindigkeit ansteigt, ist besonders bei schnellfahrenden Lokomotiven auf eine zweckmäßige Form des Wagenkastens zu achten.
Für die Berechnung des Bahnwiderstandes von elektrischen Lokomotiven verwendet man im allgemeinen die Formel von Kother:

$$W_L = c_1\,G_1 + c_2\,G_2 + c_3\,F_L\left(\frac{V+15}{10}\right)^2$$

Dabei berücksichtigt der erste Teil $c_1\,G_1$ den Bahnwiderstand der Laufradsätze, der zweite Teil $c_2\,G_2$ den Bahnwiderstand der Treibradsätze einschließlich Getriebewiderstand und der Rest den Luftwiderstand. Es bedeuten

W_L = Bahnwiderstand einer elektrischen Lokomotive in kp

G_1 = Summe der Achslasten der Laufachsen in Mp

G_2 = Summe der Achslasten der Treibachsen in Mp

c_1 = Beiwert für Laufachswiderstand in kp/Mp
z. B. c_1 = 1,5 kp/Mp für Laufachsen mit Rollenlagern
= 2,0 kp/Mp für Laufachsen mit Außenlagern
= 2,5 kp/Mp für Laufachsen mit Innenlagern

c_2 = Beiwert für Treibachswiderstand (einschl. Getriebewiderstand) in kp/Mp
z. B. c_2 = 4,5 kp/Mp für Tatzlager- und Buchli-Antrieb
= 5,0 kp/Mp für Hohlwellenantriebe
= 5,5···7,0 kp/Mp für Stangenantriebe

c_3 = Beiwert für Luftwiderstand in kp/Mp
z. B. c_3 = 0,3 kp/Mp für elektrische Lokomotiven mit windschnittigem Wagenkasten
= 0,45 kp/Mp für elektrische Lokomotiven älterer Bauform

F_L = Stirnfläche der elektrischen Lokomotiven in m²

z. B. F_L = 11,4 m² für elektrische Lokomotiven mit windschnittigem Wagenkasten

= 10,0 m² für elektrische Lokomotiven älterer Bauform

V = Fahrgeschwindigkeit in km/h

8.22 Bahnwiderstand der Wagen

Der Bahnwiderstand der angehängten Wagen W_W wird wie bei den anderen Zugförderungsarten ermittelt. Für Schnell- und Eilzugwagen verwendet man im allgemeinen die Formel von Sauthoff:

$$W_W = (1{,}9 + a\,V)\,G_W + 0{,}48\,F_W\,(n + 2{,}7)\left(\frac{V + 15}{10}\right)^2$$

Dabei bedeuten:

W_W = Bahnwiderstand des Wagenzuges in kp

a = Beiwert für den Laufwiderstand

z. B. a = 0,0025 für vierachsige Wagen

= 0,004 für dreiachsige Wagen

= 0,007 für zweiachsige Wagen

V = Fahrgeschwindigkeit in km/h

G_W = Last des Wagenzuges ohne Lokomotive in Mp

F_W = Stirnfläche der Wagen in m²

z. B. F_W = 1,15 m² für zwei- und dreiachsige Personenwagen

= 1,45 m² für neuere D-Zug-Wagen

= 1,55 m² für ältere D-Zug-Wagen

n = Anzahl der Wagen

Für die Berechnung des Bahnwiderstandes von Personen- und Güterwagen verwendet man im allgemeinen folgende Formel:

$$W_W = \left[2 + (0{,}007 + m)\left(\frac{V + 15}{10}\right)^2\right] G_W$$

Dabei bedeutet:

m = Beiwert für Zusammensetzung des Wagenparks

z. B. m = 0,025 für D-Züge, Eilzüge und Güterzüge aus gleichartigen Wagen, z. B. Kohlenzüge

= 0,033 für Personenzüge

= 0,04 für Eilgüterzüge (gedeckte Güterwagen)

= 0,05 für gemischte Güterzüge (O- und G-Wagen)

= 0,1 für Leerwagenzüge (O-Wagen)

V = Fahrgeschwindigkeit in km/h

G_W = Last des Wagenzuges ohne Lokomotive in Mp

8.23 Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand W_s ist von dem Steigungswinkel abhängig und läßt sich nach folgender Formel mit genügender Genauigkeit berechnen:

$$W_s = s\,G$$

Dabei bedeuten:

W_s = Steigungswiderstand des ganzen Zuges in kp

s = Steigung in ‰

G = Last des ganzen Zuges in Mp

Bei Gefällestrecken wird der Steigungswiderstand abgezogen.

8.24 Krümmungswiderstand

Der Krümmungswiderstand W_k kann in Gleisbögen mit einem Radius $R > 1000$ m vernachlässigt werden. Er wird sonst nach folgender Formel berechnet:

$$W_k = \frac{336{,}6\,a}{R} \cdot G$$

Hierbei bedeuten:

W_k = Krümmungswiderstand des ganzen Zuges in kp

a = Achsstand der Fahrzeuge in m

R = Krümmungsradius in m

G = Last des ganzen Zuges in Mp

Daraus folgt für

vierachsige Güterwagen	$W_k \approx \frac{424}{R} G$
zweiachsige Güterwagen	$W_k \approx \frac{700}{R} G$
D-Zug-Wagen	$W_k \approx \frac{600}{R} G$
dreiachsige Reisezugwagen	$W_k \approx \frac{1000}{R} G$

8.25 Beschleunigungswiderstand

Der Beschleunigungswiderstand W_b hängt von der Größe der umlaufenden Massen der elektrischen Lokomotiven bzw. des ganzen Zuges ab und wird nach folgender Formel berechnet:

$$W_b = [m\,b]G$$

$$= \left[\frac{102}{G}\,(G + L_z\,0{,}5A)\,b\right] G$$

Dabei bedeuten:

W_b = Beschleunigungswiderstand des ganzen Zuges in kp

G = Last des ganzen Zuges in Mp

L_z = Gewichtszuschlag für umlaufende Massen des Triebfahrzeuges bei neuen Radreifen in Mp. Dieser Wert wird angegeben in % der Last der betriebsfähigen Lokomotive.

Er beträgt

z. B.: für E 04	14,6 %	für E 77	39,3 %
„ E 18	15,6 %	„ E 94	26,4 %
„ E 44	25,1 %		

A = Achszahl der angehängten Wagen

b = Beschleunigung in m/s²
z. B. $b = 0{,}2 \cdots 0{,}3$ m/s² für elektrische Lokomotiven im Streckendienst

8.3 Fahrtechnik

Aus der Gegenüberstellung elektrische Lokomotiven – Dampflokomotiven (Abschnitt 1.4) ging bereits hervor, daß der elektrische Zugbetrieb in mancher Hinsicht dem Dampfbetrieb überlegen ist. Die elektrische Lokomotive verfügt über eine wesentlich höhere Leistung am Zughaken und kann diese auch ohne weiteres längere Zeit abgeben, da sie ihre Antriebsenergie dem Fahrdraht entnimmt und nicht wie die Dampflokomotive von der Kesselleistung abhängig ist. Da eine elektrische Lokomotive außerdem für kurze Zeit überlastet werden kann und die Anfahrleistung wesentlich über der Dauer- bzw. Stundenleistung liegt (siehe Abschnitt 3.54), ist sie auch beim Anfahren schwerer Züge oder beim Befahren von Steigungen der Dampflokomotive überlegen. Die hohe Anfahrbeschleunigung, die im Streckendienst mit etwa $0{,}2 \cdots 0{,}3$ m/s² die einer Dampflokomotive ($0{,}04 \cdots 0{,}07$ m/s²) weit übertrifft, ist besonders wertvoll, wenn es sich um dicht befahrene Streckenabschnitte handelt. Freilich muß der Lokomotivführer beim Bedienen der Steuerung darauf achten, daß der durch die Haftreibung bestimmte Grenzwert nicht überschritten wird, da sonst die Treibräder schleudern und die Zugkraft dann beträchtlich zurückgeht. Bei Einzelachsantrieb kann man das Schleudern einer Achse sofort daran erkennen, daß die Stromaufnahme des betreffenden Motors plötzlich stark sinkt. Der Lokomotivführer muß dann für sämtliche Fahrmotoren eine niedrigere Fahrstufe einschalten, und darf erst dann, wenn keine Achse mehr schleudert, Sand streuen und erneut hochschalten.

Auch ist zu beachten, daß bei schweren Anfahrten das am Stromwender entstehende Kommutatorfeuer zu Beschädigungen des Kommutators führt, wenn der Motorläufer zu lange im Stillstand verharrt.

Der Lokomotivführer hat jedoch nicht nur die Aufgabe, die vorgeschriebene Fahrzeit einzuhalten, sondern er muß auch stets bestrebt sein, die Zugfahrt so wirtschaftlich wie möglich durchzuführen. Das bedeutet, daß er auf ebener Strecke von der kinetischen Energie des Zuges weitgehend Gebrauch macht, indem er ihn mit abgeschalteten Fahrmotoren möglichst lange auslaufen läßt und auf Gefällestrecken auch die potentielle Energie des Zuges ausnutzt. Dadurch kann man die Bremsklötze und Radreifen schonen und mit der kleinsten Menge Energie aus der Fahrleitung auskommen.

In Bild 280 ist für einen bestimmten Streckenabschnitt A B die richtige Fahrtechnik einer falschen gegenübergestellt. Dabei wurde eine elektrische Lokomotive mit einer Stundenleistung von etwa 3000 kW und eine Wagenmasse von etwa 400 t zugrunde gelegt. Auf einen allmählichen Übergang zwischen den einzelnen Abschnitten Anfahren, Fahrt mit

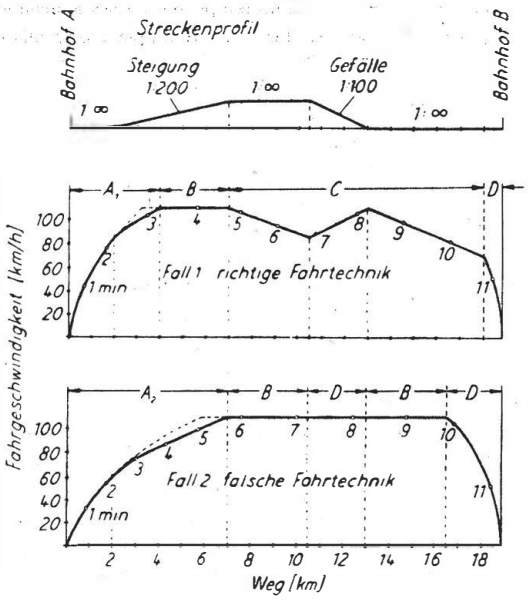


Bild 280
Fahrzeitdiagramm eines Zuges mit elektrischer Lokomotive

A_1 Anfahrt mit Anfahrleistung
A_2 Anfahrt mit Dauerleistung
B Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit
C Auslauf
D Bremsen

Höchstgeschwindigkeit, Auslaufen und Bremsen wurde mit Rücksicht auf eine bessere Übersichtlichkeit bewußt verzichtet. Im Falle 1 fährt der Lokomotivführer mit der größtmöglichen Leistung an und erreicht die für die Strecke vorgesehene Höchstgeschwindigkeit von 110 km/h bereits nach 4 km Weg. Dort stellt er die Steuerung auf eine niedrigere Fahrstufe ein und fährt mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bis km 7 weiter. An dieser Stelle schaltet er sämtliche Fahrmotoren ab und läßt den Zug auslaufen. Bei km 10,5 fährt er mit einer Geschwindigkeit von etwa 85 km/h in eine Gefällestrecke ein, auf der der Zug wieder bis auf die Höchstgeschwindigkeit beschleunigt wird. Auf dem anschließenden ebenen Streckenabschnitt geht die Fahrgeschwindigkeit wieder allmählich zurück und erst bei einer Geschwindigkeit des Zuges von etwa 65 km/h bedient der Lokomotivführer die Bremse. Die Fahrzeit für diesen 19 km langen Streckenabschnitt beträgt nur 12 Minuten, obgleich die Antriebsleistung bereits bei km 7 unterbrochen wurde.

Im Gegensatz dazu ist Fall 2 ein Beispiel für falsche Fahrtechnik. Hier fährt der Lokomotivführer nur langsam an, da er die Fahrmotoren nur bis zur Dauerleistung beansprucht. Die Höchstgeschwindigkeit wird erst nach 7 km erreicht. Dadurch geht viel kostbare Zeit verloren, die der Lokomotivführer nur dadurch wieder aufholen kann, daß er bis km 10,5 mit der Höchstgeschwindigkeit weiterfährt. Auf der anschließenden Gefällestrecke betätigt er die Bremse und vernichtet wertvolle Energie. Auch von km 13···16,5 fährt er mit der Höchstgeschwindigkeit weiter, um die zulässige Fahrzeit nicht zu überschreiten und bremst anschließend den Zug bis zum Stillstand ab. Bei dieser falschen Fahrtechnik ist die Stromentnahme aus dem Netz wesentlich höher, da die elektrische Lokomotive während insgesamt 14,0 km Energie aufnimmt. Dies führt außerdem zu einer stärkeren Erwärmung der Fahrmotoren und des Trafos und zu einem stärkeren Verschleiß der Bremsklötze und Radreifen.

8.4 Unregelmäßigkeiten

Durch sachgemäße Bedienung und sorgfältige Pflege der Lokomotive, durch richtige Auswertung aller Meßergebnisse und sorgfältige Beobachtung aller Unregelmäßigkeiten lassen sich Schäden während des Betriebes oft von vornherein vermeiden. Man darf jedoch nicht übersehen, daß der Aufbau und die Ausrüstung einer elektrischen Lokomotive viel komplizierter sind als die einer Dampflokomotive und auch durch Schäden an der Fahrleitung oder durch Störungen im Kraftwerk der elektrische Zugbetrieb empfindlich beeinträchtigt werden kann.

8.41 Störungen an der Fahrleitung

Bei Entgleisungen, Flankenfahrten oder Zusammenstößen auf elektrifizierten Strecken werden häufig nicht nur die Gleise, sondern auch die Fahrleitungen und Fahrleitungsmaste beschädigt. Wenn bei schweren Unfällen auch meist ein gerissener Fahrdraht die Erde oder geerdete Fahrzeugteile berührt und der dadurch hervorgerufene Kurzschluß zu einer Abschaltung des betreffenden Fahrleitungsabschnittes führt, so ist doch in jedem Falle, besonders bei Dunkelheit, eine sorgfältige Prüfung erforderlich. Das Lokomotivpersonal muß bei Gefahr alle Beteiligten vor dem Berühren irgendwelcher spannungführender Teile warnen und die Fahrleitung unter Zuhilfenahme der auf der Lokomotive mitgeführten Erdungsstangen erden.

8.42 Unterbrechung der Stromzuführung

Eine Unterbrechung der Stromzuführung kann auf Störungen im Kraftwerk, Schäden an der Fernleitung, Schaltfehler oder auch auf Mängel an der Lokomotive zurückzuführen sein. Häufig wird auch ein Kurzschluß dadurch verursacht, daß eine elektrische Lokomotive durch Unachtsamkeit des Personals das Signal El 6 (Halt für Fahrzeuge mit Stromabnehmer) überfährt. Auch die durch Überschläge an verschmutzten Isolatoren, durch Vögel oder Gewitter verursachten Kurzschlüsse sind nicht selten.

Im allgemeinen dauert die Stromunterbrechung nur kurze Zeit, da der Leistungsschalter im Unterwerk nach Prüfung des betreffenden Abschnittes mit Prüfspannung sofort wieder eingelegt wird. Spricht er ein zweites Mal an, so wird der schadhafte Fahrleitungsabschnitt abgetrennt und die Ursache ermittelt. Da bei einem größeren Netz die einzelnen Kraftwerke und Umformerstationen durch eine Ringleitung miteinander verbunden sind, kann bei Ausfall eines Kraftwerkes die fehlende Leistung im allgemeinen von den anderen Speisestellen mit übernommen werden. Störungen in der Stromversorgung können auch dadurch vermieden werden, daß die Lokomotivpersonale auf den einwandfreien Zustand der Fahrleitungen achten und evtl. Schäden an den elektrischen Anlagen sofort melden.

8.43 Schäden an der elektrischen Lokomotive

Es ist auch ohne weiteres möglich, daß der Leistungsschalter im Unterwerk infolge eines Schadens an der elektrischen Lokomotive selbst angesprochen hat. Stellt z. B. der Lokomotivführer in dem Augenblick, in dem die Fahrdrahtspannung ausbleibt, einen Feuerschein, eine Rauchentwicklung, Brandgeruch oder einen Knall fest, muß er mit einem Kurzschluß im Hochspannungskreis seiner Lokomotive rechnen. Er wird in diesem Falle sofort durch Senken beider Stromabnehmer die Lokomotive vom Fahrleitungsnetz trennen.

Falls ein Schaden an der Dachausrüstung der elektrischen Lokomotive vorliegt, der vom Lokomotivpersonal selbst behoben werden kann, so muß der Lokomotivführer, der nach Umschalten des Streckenfernsprechers mit einem Spezialschlüssel eine direkte Verbindung mit dem Unterwerk erhält, veranlassen, daß der entsprechende Streckenabschnitt durch das Unterwerk abgeschaltet wird.
Daraufhin muß der Lokomotivführer die Fahrleitung unmittelbar vor und hinter der Lokomotive mit Hilfe der beiden mitgeführten Erdungsstangen erden, wobei besonders darauf zu achten ist, daß zuerst die Erdungsklemme mit der Fahrschiene verbunden wird und erst dann die Erdungsstange an den Fahrdraht gehängt wird. Erst nach diesen Vorsichtsmaßnahmen darf der Lokomotivführer oder sein Begleiter das Lokomotivdach besteigen, gegebenenfalls den beschädigten Stromabnehmer festbinden und den Dachtrennschalter öffnen. Daraufhin entfernt der Lokomotivführer die Erdungsstangen und veranlaßt das Einschalten der Fahrleitung. Sobald er sich mit Hilfe des Fahrdrahtspannungsmessers davon überzeugt hat, daß dies geschehen ist, kann er die Fahrt fortsetzen.
Bemerkt der Lokomotivführer, daß ein Motorstrommesser nicht mehr anzeigt, und stellt er bei Überprüfung fest, daß das zugehörige Motorüberstromrelais angesprochen hat, so wird er zunächst den Schalter wieder einlegen und vorsichtig anfahren. Spricht das Relais erneut an, so ist damit zu rechnen, daß dieser Motor schadhaft ist. Er wird daraufhin mit Hilfe des zugehörigen Motortrennschalters abgeschaltet und die Fahrt fortgesetzt.
Auch bei Störungen im Niederspannungsstromkreis oder beim Versagen der Hilfseinrichtungen wird das Lokomotivpersonal zunächst versuchen, die Fehlerquelle zu finden und durch Auswechseln der Sicherungen oder dergleichen zu beseitigen. Nur wenn dies nicht innerhalb weniger Minuten möglich ist, wird das Lokomotivpersonal über den Streckenfernsprecher eine Ersatzlokomotive anfordern.

8.5 Gefahren des elektrischen Zugbetriebes und Unfallschutz

Auch wenn der elektrische Zugbetrieb gegenüber dem Dampf- und Dieselbetrieb mancherlei Vorteile aufweist, so darf doch die erhöhte Unfallgefahr keineswegs übersehen werden. Diese ist dann besonders groß, wenn die elektrifizierten Strecken gleichzeitig noch von Dampflokomotiven befahren werden oder wenn irgendwelche Unregelmäßigkeiten im Zugbetrieb auftreten. Um Unfälle nach Möglichkeit zu vermeiden, wurden zahlreiche Sicherheitsmaßnahmen getroffen und für den allgemeinen Dienst auf elektrisch betriebenen Strecken mit Einphasenwechselstrom 15 kV und 16⅔ Hz eine „Betriebssicherheitsvorschrift (DV 462a)" erlassen. Diese muß allen Beteiligten so oft wie möglich in Erinnerung gebracht werden, da immer wieder festgestellt werden muß, daß viele Menschen infolge des täglichen Umganges die Gefährlichkeit der Hochspannungsanlagen unterschätzen und daher leichtfertig handeln.
Hinzu kommt, daß der menschliche Körper keine Organe besitzt, um unter Spannung stehende Leitungen von solchen, die spannungsfrei sind, unterscheiden zu können. Zu beachten ist auch, daß bei Hochspannungsanlagen (mehr als 250 V gegen Erde) nicht allein die unmittelbare Berührung spannungführender Teile verboten ist, sondern auch eine zu dichte Annäherung an diese Teile mit Lebensgefahr verbunden sein kann, da diese hohen Spannungen auch kurze Luftstrecken oder schlecht leitende Stoffe (z. B. Holz) durchschlagen. Bei allen Arbeiten in der Nähe von Hochspannungsleitungen ist ein Sicherheitsabstand von 1,5 m einzuhalten.

Der menschliche Körper kann nur kleine elektrische Ströme ohne Schaden ertragen. Bei größeren Strömen machen sich starke Einwirkungen auf das Nervensystem bemerkbar, die unter Umständen durch Lähmung des zentralen Nervensystems den sofortigen Tod zur Folge haben können. Hinzu kommen starke Verbrennungen an den Ein- und Austrittsstellen des Stromes.

Um derartige Unfälle zu vermeiden, ist verboten:

1. Das Berühren der Fahrleitung und auch evtl. herabhängender Teile sowie eine zu dichte Annäherung an diese;
2. das Berühren der Stromabnehmer und anderer elektrischer Einrichtungen an den elektrischen Triebfahrzeugen;
3. der Aufenthalt auf hohen Ladungen, insbesondere auf verladenen Fahrzeugen, Transportgeräten usw.;
4. das Belassen und Ausfahren von Antennen an verladenen Fahrzeugen;
5. das Besteigen von Fahrzeugdächern, hohen Wagenladungen, Laufstegen, Lokomotivkesseln und Tendern;
6. das Berühren von Verunglückten sowie von Gegenständen jeder Art, die noch mit einer Hochspannungsleitung in Verbindung stehen (z. B. Äste, Schutzplanen oder dergleichen);
7. das Betreten des Erdreiches in einem Umkreis von 20 m um die Stelle, an der ein gerissener Fahrleitungsdraht den Boden berührt.

Größte Vorsicht ist geboten und ein Sicherheitsabstand von mindestens 1,5 m einzuhalten

1. auf Dampflokomotiven beim Gebrauch der Schürgeräte und des Spritzschlauches sowie beim Vorholen der Kohle und beim Wassernehmen,
2. bei Arbeiten auf Güterwagen und beim Befestigen von Ladungen z. B. mit Bindedraht,
3. beim Anbringen, Abnehmen oder Anzünden der Zugschlußsignale,
4. beim Aufstellen oder Umlegen von Lampenmasten oder Fahnenstangen und beim Besteigen von Fahrleitungsmasten (z. B. wegen Anstricharbeiten),
5. bei Feuerlöscharbeiten mit Wasser; der Strahl darf nicht in die unmittelbare Nähe der Fahrleitung kommen.

Außerdem ist zu beachten:

1. starkes Qualmen der Dampflokomotiven sowie der Halt mit dem Schornstein unter Fahrleitungsisolatoren sind verboten;
2. Fahrzeuge mit brennenden Ladungen sind auf Bahnhöfen nach Möglichkeit auf Gleise zu bringen, die nicht mit Fahrleitung überspannt sind oder so zu verschieben, daß sie nicht unter Quertragwerken stehen;
3. Schäden an der Fahrleitung (z. B. gerissene Drähte, gebrochene Isolatoren oder dergleichen) sind sofort der nächsten Betriebsstelle oder unmittelbar dem Unterwerk zu melden.

Ist trotz aller Vorsicht ein Unfall geschehen, so muß der Verunglückte so schnell wie möglich der Einwirkung des elektrischen Stromes entzogen werden. Auch in diesem Falle sind die „Betriebssicherheitsvorschrift für den allgemeinen Dienst auf elektrisch betriebenen Strecken mit Einphasen-Wechselstrom 15000 V und 16⅔ Hz (Bsv Eb; Dv 462a)" und die „Anleitung zur ersten Hilfe bei Unfällen VDE 0134" streng zu beachten. Die durch elektrischen Strom herbeigeführte Bewußtlosigkeit ähnelt dem Scheintod. Die künstliche Atmung muß daher so lange fortgesetzt werden, bis entweder das Leben zurückkehrt – nicht selten stellen sich erst nach stundenlanger künstlicher Atmung Lebenszeichen wieder ein – oder bis sichere Zeichen des Todes vom Arzt festgestellt werden.

Wechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn für 16⅔ Hz

Bezeichnung		E 04	E 05	E 17	E 18	E 19	E 44	E 94	E 11
erstes Baujahr		1933	1933	1928	1935	1939	1932	1940	1960
Achsfolge		1'Co1'	1'Co1'	1'Do1'	1'Do1'	1'Do1'	Bo'Bo'	Co'Co'	Bo'Bo'
Treibrad-Durchmesser	mm	1600	1400	1600	1600	1600	1250	1250	1350
Höchstgeschwindigkeit	km/h	130	110	120	150	180	90	90	140
Antriebsart		Federtopf-Antrieb	Tatzmot.-Antrieb	AEG-Federtopf-Antrieb			Tatzmotor-Antrieb		Gummiring-Feder-Antrieb
Ges. Länge ü. P.	m	15,12	15,40	15,95	16,92	16,92	15,29	18,60	16,32
Masse der betriebsfäh. Lok	t	92,0	89,0	111,7	108,5	113,0	77,2	118,5	82,5
Reibungslast	Mp	61,4	59,2	80,8	78,1	80,8	77,2	118,5	82,5
Stundenleistung	kW	2190	2160	2800	3040	4000	2200	3300	2800
bei Geschwindigkeit	km/h	98	97	89	117	180	76	68	89
Dauerleistung	kW	2010	1785	2300	2840	3720	1860	3000	2640
bei Geschwindigkeit	km/h	102,5	110	97	122	180	86	71	
max. Anfahrzugkraft	Mp	15,5	15,8	24,0	21,0	22,4	20,0	37,0	22,0
Masse/Leistungseinheit	kg/kW	42,0	41,2	39,9	35,7	28,3	35,1	35,9	29,3
Bild Nr.		219, 220	221	222, 223	224, 225	226	227, 228	229, 230	231, 232

Wechselstrom-Lokomotiven der Deutschen Bundesbahn für 16⅔ Hz

Bezeichnung		E 10 001	E 10 002	E 10 003	E 10 004/5	E 10[1]	E 40	E 41	E 50
Lieferwerk, mech. Teil		Krauß-Maffei	Krupp	Henschel	Henschel				
„ elektr. Ausrüstung		AEG	BBC	SSW	AEG/BBC				
erstes Baujahr		1952	1952	1952	1952	1956	1957	1956	1957
Achsfolge		Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'	Co'Co'
Treibrad-Durchmesser	mm	1350	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Höchstgeschwindigkeit	km/h	130	130	130	130	150	100	120	100
Antriebsart		Gelenk-stangen-Antrieb	Kardan-scheiben-Antrieb	Gummi-ringfeder-Antrieb	Kardan-Lamellen-Antrieb	SSW-Gummiringfeder-Antrieb[1])			
Ges. Länge ü. P.	m	16,10	16,65	15,90	15,90	16,44	16,44	15,64	19,44
Masse der betriebsfähigen Lok	t	83,3	82,3	80,3	80,0	84,0	84,0	66,4	124,0
Stundenleistung	kW	3800	3280	3570	3420	3700	3700	2400	4500
bei Geschwindigkeit	km/h					120	88	98	79
Dauerleistung	kW	2820	2520	3000	2820	3620	3620	2310	4410
bei Geschwindigkeit	km/h					123	90	102	80
max. Anfahrzugkraft	Mp	22,9	23,5	21,4	22,6	30,0	41,0	22,0	45,0
Masse/Leistungseinheit	kg/kW	21,9	25,1	22,5	23,4	22,7	22,7	27,7	27,6
Bild Nr.						233, 234		235, 236	237, 238

[1]) E 50 001 - 025 haben Tatzantrieb

Ausländische Wechselstrom-Lokomotiven für 16⅔ Hz

Herstellungsland		Schweiz			Österreich		Schweden			Norwegen
Bezeichnung		Re 4/4	Ae 6/6	Ae 8/14	1141	1010	Ra	Da	Dm	El 11
erstes Baujahr		1946	1952	1939	1955	1955	1955	1952	1953	1951
Achsfolge		Bo'Bo'	Co'Co'	1'Bo1Bo1' + 1'Bo1Bo1'	Bo'Bo'	Co'Co'	Bo'Bo'	1'C1'	1'D + D1'	Bo'Bo'
Treibrad-Durchmesser	mm	1040	1260		1300	1300	1300	1530	1530	1060
Höchstgeschwindigkeit	km/h	125	125	110	110	130	150	100	75	100
Antriebsart		BBC-Feder-Antrieb			SSW Gummi-ring-Antrieb	BBC-Feder-Antrieb	Kardan-Antrieb	Stangen-Antrieb		BBC-Feder-Antrieb
Ges. Länge ü. P.	m	14,90	18,40	34,10	15,30	17,80	15,10	13,00	25,10	14,45
Masse d. betriebsfäh. Lok	t	58,0	123,0	236,0	80,0	109,8	60,8	75,0	186,0	62,0
Reibungslast	Mp	58,0	123,0	160,0	80,0	109,8	60,8	51	152,0	62,0
Stundenleistung	kW	1920	4416	8800	2480	4000	2648	1900	3800	1625
bei Geschwindigkeit	km/h	83	74		77	91	113	77	58	68
Dauerleistung	kW	1680	3980			3360		1780	3560	1493
bei Geschwindigkeit	km/h	87	78,5			99		80	59	71
max. Anfahrzugkraft	Mp	14,0	33,0		21,0	28,0	16,2	21,5	57,0	15,6
Masse/Leistungseinheit	kg/kW	30,2	27,9	26,8	32,3	27,5	23,0	39,5	48,9	38,2
Bild Nr.		239	240	241	242	243, 244	245, 246	247, 248	249	251

Gleichstrom-Lokomotiven

Herstellungsland		DDR f. Polen		Frankreich			Belgien	Italien	ČSSR	UdSSR	
Bezeichnung		E 04	E 05	BB 9000	BB 9400	CC 7100	123	E 646	E 499	WL 23	N-8
erstes Baujahr		1954	1955	1952	1959	1952	1955	1958	1953	1947	1953
Fahrdrahtspannung	kV	3	3	1,5	1,5	1,5	3	3	3	3,3	3,3
Achsfolge		Bo'Bo'	Co'Co'	Bo'Bo'	B'B'	Co'Co'	Bo'Bo'	Bo'Bo'Bo'	Bo'Bo'	Co'Co'	Bo'Bo' + Bo'Bo'
Treibrad-Durchmesser	mm	1350	1350	1250	1020	1250	1262	1250	1250	1200	1200
Höchstgeschwindigkeit	km/h	110	110	140	130	160	125	145	120	90	90
Antriebsart		Tatzmotor-Antrieb		Kardan-Gummiring-Antrieb			Tatzmotor-Antrieb	Gelenkstangen-Antrieb	Lamellen-Antrieb	Tatzmotor-Antrieb	
Ges. Länge ü. P.	m	16,32	18,70	16,20	14,40	18,92	18,00	18,25	15,6	16,97	27,52
Masse d. betriebsfäh. Lok	t	86,0	120,0	80,0	60,0	107,0	93,3	108,0	80,0	138,0	184,0
Stundenleistung	kW	2120	3180	3535	2304	3730	1885	3750	2344	3150	4200
bei Geschwindigkeit	km/h	50	50	79	49	80	48	98	59	42,6	42,6
Dauerleistung	kW	1800	2700	3180	2135	3460	1735		2032	2800	3750
bei Geschwindigkeit	km/h			81	50	82	49		68	44	44
max. Anfahrzugkraft	Mp	25,0	36,0	21,8		26,0	20,0	21,0	24,0	28,0	30,0
Masse/Leistungseinheit	kg/kW	40,6	37,7	22,6	26,0	28,7	49,5	28,8	34,1	43,8	43,8
Bild Nr.		252 253	254 255	256	258 259	257	261	262	263	264	265

Deutsche Wechselstrom-Lokomotiven für 50 Hz

		Höllentalbahn						
Lieferwerk		AEG	BBC	SSW	Krupp	AEG	SSW/Krupp	LEW
Bezeichnung		E 244 01	E 244 11	E 244 21	E 244 31	E 244 22	für UdSSR	Hennigsdorf
erstes Baujahr		1936	1936	1936	1936	1950	1958	1961
Fahrdrahtspannung	kV	20	20	20	20	20	25	25
Achsfolge		Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'	Co'Co'	Co'Co'
Treibrad-Durchmesser	mm	1250	1250	1250	1250	1250		1350
Höchstgeschwindigkeit	km/h	85	85	85	84	80	100	100
Antriebsart		Tatzlager-Antrieb					Gummiringfeder-Antrieb	
Ges. Länge ü. P.	m	14,32	15,29	16,44	15,08	15,29		18,64
Masse der betriebsfähigen Lokomotive	t	85,0	84,6	84,8	83,0	83,6	138,0	122,0
Stundenleistung	kW	2000	2400	2060	2020	2600	4900	3360
bei Geschwindigkeit	km/h	57	71	70	80	75		50
Dauerleistung	kW	1720	2340	1940	1920	2460		
bei Geschwindigkeit	km/h	59	72	74	80	79		
max. Anfahrzugkraft	Mp	24,0	24,0	24,0	24,0	26,0		40,0
Masse/Leistungseinheit	kg/kW	42,5	35,3	41,2	41,1	32,2	28,2	36,3

Ausländische Wechselstrom-Lokomotiven für 50 Hz

Herstellungsland		Frankreich				Frankreich f. UdSSR		UdSSR		Ungarn
Bezeichnung		12000	13000	14000	16500	Φ 01	Φπ 01	N-0	N-60	V 55
erstes Baujahr		1954	1954	1955	1958	1959	1959	1954	1958	1952
Fahrdrahtspannung	kV	25	25	25	25	25	25	25	25	15
Achsfolge		Bo'Bo'	Bo'Bo'	Co'Co'	B'B'	Co'Co'	Co'Co'	Co'Co'	Co'Co'	Bo'Co'
Treibrad-Durchmesser	mm	1250	1250	1100	1100	1280	1280	1200	1250	1040
Höchstgeschwindigkeit	km/h	120	120	60	150/90	100	160	75	110	125
Antriebsart		Kardan-Antrieb		Tatzlager-Antrieb	Gelenkstangen-Antrieb	Tatzlager-Antrieb	Gelenkstangen-Antrieb	Tatzlager-Antrieb		
Ges. Länge ü. P.	m	15,20	15,20	18,89	14,40	23,06	23,06		20,40	14,60
Masse der betriebsfäh. Lok	t	84,0	84,0	126,0	68,0	135,2[1])	126,0	129,6	138,0	86,4
Stundenleistung	kW	2650	2135	3030	2650	4640	4640	2700	4050	2955
bei Geschwindigkeit	km/h	46	65	40	76/45	46	74	41	45	125
Dauerleistung	kW	2475	2135	2640	2580	4400	4400	2400	3600	
bei Geschwindigkeit	km/h	48	65	41	82/49	46	74			
max. Anfahrzugkraft	Mp	24,0	22,0	42,0	19,0/32,0	52,0	32,5		50,0	21,0
Masse/Leistungseinheit	kg/kW	31,7	39,3	41,6	25,7	29,1	27,2	48,0	34,1	29,2
Bild Nr.		266	267	268	269, 272	273, 274		275,276	277	278

[1]) einschl. Ballast

LITERATURVERZEICHNIS

I. Vorschriften

Dv 939c Merkbuch für die Fahrzeuge der Deutschen Reichsbahn, Teil III, Elektrische Lokomotiven, Elektrische Trieb-, Steuer- und Beiwagen.

Dv 953 Vorläufige Dienstvorschrift für elektrische Lokomotiven (Dv Ellok).

Dv 462 Dv für den Dienst auf elektrisch betriebenen Strecken.

Dv 462a Betriebssicherheitsvorschrift für den allgemeinen Dienst auf elektrisch betriebenen Strecken.

Dv 969 Dv für die Sicherheitsfahrschaltung an elektrischen Lokomotiven und Triebwagen (Dv Sel).

Dv 93051 Beschreibung der Baureihe E 44.

Dv 93053 Beschreibung der Baureihe E 18.

Dv 93055 Beschreibung der Baureihe E 94

Dv 93058 Beschreibung der Baureihe E 04.

Vorschrift für die Behandlung und Bedienung von Bahnölschaltern.

Dv 93092 Beschreibung der Druckgasschalter für elektrische Lokomotiven.

Merkblatt für den elektrischen Zugheizbetrieb.

II. Fachbücher

Elektrische Triebfahrzeuge, Karl Sachs, Band I und II, Kommissionsverlag Huber & Co. AG, Frauenfeld 1953.

Leitfaden für den Elektro-Lokomotivdienst, Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahn, Wien 1953.

Elektrische Lokomotiven, Lokomotivkunde, Verlag der Verkehrswissenschaftlichen Lehrmittelgesellschaft, Berlin 1937.

Elektrische Triebfahrzeuge für Oberleitung, Josef-Keller-Verlag, Starnberg 1958.

Elektrische Lokomotiven, Lokomotivbetrieb, Josef-Keller-Verlag, Starnberg 1952.

Handbuch der elektrischen Triebfahrzeuge der Deutschen Bundesbahn, Vereinigte Verlagsanstalten GmbH, Düsseldorf und Oberhausen.

Die Entwicklung der elektrischen Lokomotiven bei der Deutschen Reichsbahn, Karl Stolte, VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1956.

III. Lehrbriefe

der Hochschule für Verkehrswesen, Dresden.

Elektrische Zugförderung, Lehrbrief 1···3, Schleif/Kahler.

der Ingenieurschule für Eisenbahnwesen, Dresden.

Eisenbahnfahrzeuge, Lehrbrief 9 und 10, Deinert.

Elektrische Ausrüstungen elektrisch angetriebener Fahrzeuge, Lehrbrief 1 Kahler, Lehrbrief 2 Schmidt.

IV. Fachzeitschriften

Deutsche Eisenbahntechnik, Herausgeber: Kammer der Technik (Fachverband: Fahrzeugbau und Verkehr), Berlin, VEB Verlag Technik.

Elektrische Bahnen, Verlag R. Oldenbourg, München.

Der Modelleisenbahner, Verlag „Die Wirtschaft", Berlin.

Fahrt frei. Die Wochenzeitung der Deutschen Eisenbahner, einschl. Beilagen „Die Werkstatt" und „Der operative Dienst", Herausgeber: Min. f. Verkehrswesen.

BILDQUELLEN-VERZEICHNIS

„Die Entwicklung der elektrischen Lokomotiven", Karl Stolte, Fachbuchverlag Leipzig 1956. Nr. 1, 8, 10, 13

„Elektrische Bahnen, Siemens Handbuch 1929". Nr. 2, 4, 7, 11

„Elektrische Lokomotiven, Lokomotivkunde", Berlin 1937. Nr. 95, 107, 109

„Leitfaden für den Elektro-Lokomotivdienst", Selbstverlag der Österr. Bundesbahn, Wien 1953. Nr. 66, 152, 174

„Elektrische Triebfahrzeuge für Oberleitungen", Joseph Keller-Verlag, Starnberg 1958. Nr. 113

„Deutsche Eisenbahntechnik", VEB Verlag Technik, Berlin. Nr. 3, 249, 264, 275, 279

„Elektrische Bahnen", Zentralblatt für elektr. Zugbetrieb, Verlag von R. Oldenbourg, München. Nr. 34, 37, 43, 69, 84, 86, 88, 89, 111, 125, 127, 128, 168a, 169, 175, 182, 216, 226, 233, 235, 237, 239, 240, 242, 243, 245, 251, 256, 257, 258, 261, 267, 278

„Der Modelleisenbahner", TRANSPRESS VEB Verlag für Verkehrswesen. Berlin. Nr. 247, 273

„Chemin de Fer", Paris. Nr. 100

„Die elektrischen Lokomotiven der DR im Bild" 1929. Nr. 42, 45, 70, 222

VEB LEW Hans Beimler, Hennigsdorf. Titelbild, Nr. 27, 32, 33, 35, 39, 57, 58, 98, 196, 197, 198, 200, 231, 252, 254

Foto-Illner, Leipzig. Nr. 219, 227, 229

Die übrigen Bilder sind Neuzeichnungen oder stammen aus dem Bildarchiv des Verfassers.

Abrißschaltung 206
Abstützung des Lokomotivkastens 63
Achsanordnuug 48
Achsantrieb 66
Achsfolge 44
Achslager 49
Achslastausgleich 81
Achsmotor 77
Adamsachse 55
AEG-Kleinow-Antrieb 94
Allstrom-Lok 228
Anfahrleistung 39, 185
Anker 177
Anlagekosten 42
Antrieb für Hauptschalter 125
Antrieb für Stromabnehmer 113
Auf-Ab-Steuerung 168
Ausgleichkupplung für Drehgestelle 59
Ausgleichschaltung 148
Ausrüstung 189

Bahnwiderstand 272
Batterie 194
Begrenzungslinie 46
Beleuchtung 194
Beschleunigungswiderstand 274
Betriebsverhalten 184
Bisselgestell 54
Blasmagnet 159
Blindwelle 68
Bremse 59, 187
Bremsumschalter 174
Brückenschaltung 206
Buchli-Antrieb 85
Bügeleinstellventil 115
Bügelsteuerung 113
Bürsten 180
—-halter 180

Dachleitung 115
Dachsicherung 115
Dachtrennschalter 116
Dauerleistung 39, 185
Direktmotor-Lok 214
Doppelschleifbügel 110
Drehgestell 55
Drehstrom 19, 29
Druckgasschalter 122
Druckluft 193
—-Bremse 60
—-Erzeugung 193
—-Schnellschalter 124
—-Schütz 158

Einphasen-Wechselstrom 16 2/3 Hz 29
—-Lok 22
Einphasen-Wechselstrom 50 Hz 31
—-Lok 31
Einzelachsantrieb 76
Eisenkern 129
Eisenverluste 130, 177
Elektrische Bremse 187
Erdungsschalter 116
Erregung 177
Erwärmung 135, 184
Excitron 221
Expansionsschalter 119

Fahrdrahthöhe über SO 106
Fahrgestell 48
Fahrmotor 175
Fahrmotoren-Trennschalter 172
Fahrschalter 157, 209
Fahrtechnik 275
Fahrtwender 173
Fahrwiderstand 271
Fahrzeuglauf 53
Federantrieb 98
Federausgleich 52
Federtopfantrieb 94
Feinregler 150
Feldschwächung 205
Fernauslöser 125
Fernsteuerung 171
Führerbügelventil 144
Führerstand 65
Funksteuerung 171

Gattungsbezeichnung 44
Gefahren des elektrischen Zugbetriebes 278
Gelenkstangenantrieb 89
Gestellmotor 84
Gleichrichter 219
—-Lokomotiven 219
Gleichstrom 28
—-Lok 203
—-Motor 208
Gleitlager 49
Gummifederantrieb 82

Handbremse 60
Handluftpumpe 115
Handsteuerung 166
Hauptschalter 116
Hauptumspanner 128
Heizschalter 196
Heizung 196
Hilfseinrichtungen 189
Hilfsstromkreise 189
Hilfsumspanner 140
Hochspannung 105
Hochspannungskabel 115
Hochspannungssicherung 115
Hochspannungssteuerung 156
Hochspannungsteil 105
Hohlwelle 77, 82, 89, 91, 92, 94, 105

Ignitron 219
Isolator 109

Jakobsdrehgestell 263

Kardan-Gummiringantrieb 104
—-Lamellenantrieb 103
—-Scheibenantrieb 99
Kleinow-Antrieb (AEG) 94
Kleinselbstschalter 66
Kohlebürste 180
Kollektor 179
Kommutator 179
Kompensation 177
Krauß-Helmholtz-Drehgestell 56
Kreuzschaltung 212
Krümmungswiderstand 274
Kühlluft 137, 183
Kühlung 135
Kupferverluste 129
Kuppel-Antrieb 73
Kurbelschleifen-Antrieb 74

Läufer 177
—-wicklung 178
Lamellen-Antrieb 103
Lastschalter 116
Laufachse 54
Laufdrehgestell 55
Laufwerk 48
Leistung 39, 185, 205
Leistungssteuerung 141
Lenkachse 54
Lenkgestell 54
Lichtbogenhorn 158
Lichtraumprofil 46
Lichtumformer 194
Lokomotivbetrieb 270
Lokomotivkasten 63
Lüfter 190
Luftpfeife 203
Luftpresser 193

Magnetschütz 157
Maschinenraum 66
Mehrfachsteuerung 171
Mehrfrequenz-Lok 226
Mehrspannungs-Lok 226
Mehrstrom-Lok 228
Meßeinrichtung 200
Meßwandler 140
Motor 175
—-Gehäuse 175
—-Kennlinien 39, 185
—-lager 176
—-lüftung 183
—-strommessung 140
—-trennschütz 172

Nachlaufsteuerung 169
Niederspannungssteuerung 144
Nockenschaltwerk 162

Nullspannungsrelais 126
Nutzbremse 189

Oberspannungsleitung 115
Oberspannungswandler 140
Oberstromwandler 140
Ölkühler 135
Ölpumpe 135
Ölschalter 117
Ölumspanner 128

Periodenumformer 217
Peyinghauslager 50
Primärwicklung 129
Prüfeinrichtung 190
Prüfumschalter 190
Pumpe 193
Pumpenschalter 193

Radsatz 48
Rahmen 61
Reibungsgrenze 184
Reihenschlußmotor 28, 175, 210
Reihenschlußverhalten 142
Richtungswender 173
Ritzel 72
Röhrenspule 131
Rollenlager 49
Rückstelleinrichtung 54

Sammler 194
Sandstreuer 203
Schäden an der Ellok 277
Schalter 116
—-öl 117
Schaltmagnet 169
Schaltmotor 168
Schaltung 144
Schaltwerk 157
Scheibenspule 131
Schere 109
Schleifbügel 109
Schleifstück 109
Schleuderschutz 186
—-Bremse 60
—-Relais 82
Schlittenschaltwerk 160
Schlitzkanal 17
Schnellabschaltknopf 172
Schrägstangen-Antrieb 74
Schütz 157
Schützensteuerung 157
Schuppenprüfanlage 190
Schutzeinrichtung 200
Sécheron-Antrieb 92
Sekundärwicklung 129
Sicherheitsfahrschaltung 198
Silentblock 91
Spaltbürsten 180
Spannung 28
Spannungsrückgangsauslöser 126
Spannungswandler 140
Sparschaltung 132
Spurkranz 49
Standardisierung 237
Ständer 176
Stangenantrieb 67
Steigungswiderstand 274
Stellmotor 168
Steuereinrichtung 172
Steuerelement 157
Steuerung 141
Stoßvorrichtung 63
Strom 105
—-abnehmer 106
—-art 27
—-messer 65
—-rückgewinnung 189
—-system 27
—-teiler 145
—-verbrauch 275
—-versorgung 33
—-wandler 107
—-wendung 179
Stundenleistung 39, 185
Systemwechselbahnhof 225

Tatzlagermotor 78
Tatzmotor-Antrieb 79
Torsionswelle 99
Tragfeder 52
Transformator 128

Treibachse 48
Trennschalter 172
Triebdrehgestell 59
Triebwerk 66
Trockengleichrichter 219
Trockenumspanner 135

Überlastung 126
Überspannungsschutz 126
Überstromzeitauslöser 126
Übertragungssteuerung 166
Umformer 215
—-Lok mit Drehstromfahrmotoren 215
—-Lok mit Gleichstromfahrmotoren 219
Umspanner 128
—-verluste 129
Unfallschutz 278
Unregelmäßigkeiten 277

Verriegelung 174
Verriegelungskontakt 174
Vorgelege 72

Wälzlager 49
Wagenkasten 63
Wandernocken-Schaltwerk 164
Wanderwalzen-Schaltwerk 164
Wechselstrom-Lok für 16 2/3 Hz 230
— für 50 Hz 260
Wendepol 177
Westinghouse-Antrieb 91
Wicklung 176
Widerstandsbremse 187
Widerstandsziffer 271
Wiege 55
Wippe 106
Wirkungsgrad 175, 206

Zahnrad 72
—-federung 73
Zubehör 203
Zugheizung 196
Zugkraft 186
Zugvorrichtung 63
Zusatzumspanner 149
Zweimotoren-Antrieb 72
Zweistangen-Antrieb 70
Zwischenläufer 218