



This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

### **Usage guidelines**

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

- + *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
- + *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
- + *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
- + *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

### **About Google Book Search**

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at <http://books.google.com/>



## Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

## Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

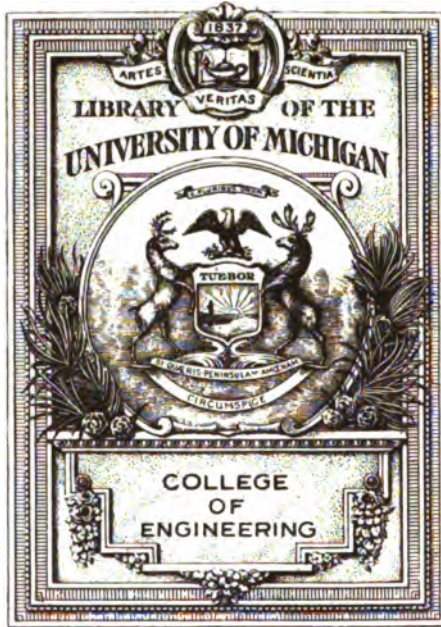
Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

- + *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.
- + *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.
- + *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.
- + *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

## Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter <http://books.google.com> durchsuchen.

**B** 474587



Engin. Library

TF  
975  
.281









622,91  
28

# Elektrische Vollbahnlokomotiven für einphasigen Wechselstrom

Von

Professor Hermann Zipp,

Dozent am städtischen Friedrichs-Polytechnikum zu Cöthen i. Anh.

Mit 226 Abbildungen



Leipzig  
Verlag von Oskar Leiner  
1915

### **Die Einrichtung elektrischer Beleuchtungsanlagen für Gleichstrombetrieb.**

Von Prof. Dr. Carl H e i m. 4. umgearbeitete Auflage. Gr. 8°. 672 Seiten mit 605 Abbildungen. *M* 11.50, geb. *M* 12.50

*Von Büchern, die zur gleichen Zeit wissenschaftlich richtig und gemeinfaßlich geschrieben sind, gibt es nur wenige, und unter diesen ist das Heimsche Buch ein hervorragendes Beispiel.*

*(Elektrotechnische Zeitschrift.)*

### **Die Einrichtung elektrischer Beleuchtungsanlagen für Wechsel- und Drehstrombetrieb.**

Von Ingenieur Richard B a u c h. Gr. 8°. 283 Seiten mit 160 Abbildungen.

*M* 8.—, geb. *M* 9.25

*Die Kreise, an die sich dieses Werk wendet, sind Installateure, Monteure, Architekten, Bau- und Maschineningenieure, sowie Besitzer und Besteller derartiger Anlagen. Diese sachliche Arbeit des rühmlichst bekannten Verfassers kann bestens empfohlen werden.*

*(Österr. Polytechnische Zeitschrift.)*

### **Hilfsbuch für die Montage elektrischer Leitungen zu Beleuchtungszwecken.**

Für Elektrotechniker, Monteure und Installateure zur praktischen Anlage und Behandlung des Leitungsmaterials. Von Ingenieur A. P e s c h e l. 2. vermehrte Auflage. Gr. 8°. 340 Seiten mit 589 Abbildungen.

*M* 6.—, geb. *M* 7.50

*Das Buch, dessen klar gehaltener Text mit reichem Inhalt von vielen Abbildungen unterstützt wird und auf dessen Ausstattung der Verlag eine große Sorgfalt verwendet hat, entspricht den Bedürfnissen der Praxis und ist sicherlich als eines der besten seiner Art zu betrachten.*

*(Zeitschrift für Elektrotechnik.)*

### **Die Bogenlampe.**

Von Dir. Prof. Wilh. B i s c a n. Physikalische Gesetze, Funktion, Bau und Konstruktion derselben, für Mechaniker, Installateure, Maschinenschlosser, Monteure usw., sowie als Anleitung zur Anfertigung von Bogenlampen. 112 Seiten. Gr. 8° mit 76 Abbildungen 2. umgearbeitete Auflage.

*M* 2.—, geb. *M* 2.75

*Im vorstehenden Werke hat der Verfasser eine Beschreibung der physikalischen Gesetze, sowie der Konstruktion und Anwendung der Bogenlampe gegeben, die hauptsächlich für jene Kreise berechnet ist, welche die geistige Arbeit des Theoretikers durch ihrer Hände Arbeit in die Praxis umsetzen. Er hat ausführlich, in leichtfaßlicher Weise die Entstehung und Anwendung der Bogenlampe, sowie die Konstruktion derselben an einigen der besten und augenblicklich gebräuchlichsten Bogenlampen beschrieben und durch mehrere dem Text beigelegte Abbildungen erläutert. Wir können das Werk nicht allein den Praktikern als Hilfsbuch, sondern auch allen denen empfehlen, die sich für die allgemeine Beleuchtungsfrage interessieren und sich über das Wesen der Bogenlampe genau orientieren wollen.*

*(Uhlands Technische Rundschau.)*

### **Die Herstellung der elektrischen Glühlampe.**

Nach in den verschiedensten Glühlampenfabriken gesammelten praktischen Erfahrungen gemeinverständlich erörtert. Zum praktischen Gebrauch für Fabrikanten, Ingenieure, Techniker, Installateure, Monteure und Konstrukteure. Von Ing. E. A. K r ü g e r. 103 Seiten mit 72 Abb. und 5 Tafeln. Gr. 8°.

*M* 3.—, geb. *M* 3.50

*Dieses Buch ist für Fabrikanten, Ingenieure, Techniker, Installateure, Monteure und Konsumenten bestimmt. Es ist das darin Gebotene in einfacher leichtfaßlicher Darstellungsweise gebracht, und deshalb wird sich auch der Nichtfabrikant gern mit den verschiedenen Stadien der Glühlampenfabrication befassen, in welche der Verfasser den Leser einführt. Ausführlich wird die Herstellung des Kohlefadens wie auch das Auspumpen der Luft aus den Glasbirnen beschrieben. Gute bildliche Darstellungen erleichtern das Verständnis dieses mit Fleiß und Fachkenntnis geschriebenen Buches.*

*(Zeitschrift des Österr. Ingenieur- u. Architektenvereins.)*

---

---

## Einleitung.

### **Die geschichtliche Entwicklung des elektrischen Bahnbetriebes und die Ausbreitung der Vollbahnen mit einphasiger Wechselstromspeisung.**

Das Jahr 1879 muß als das Geburtsjahr der elektrischen Zugförderung bezeichnet werden; auf der in diesem Jahre eröffneten Berliner Gewerbeausstellung führte die Firma Siemens & Halske die erste Lokomotive im Betrieb vor, die imstande war, drei kleine Anhängewagen mit einer Gesamtbesatzung von etwa 18 Personen zu ziehen.

Wer heutzutage im Deutschen Museum für Meisterwerke der Naturwissenschaft und Technik zu München, wo die von dem genialen Werner von Siemens erfundene Maschine eine ihrer hohen geschichtlichen Bedeutung würdige Stätte der Aufbewahrung gefunden hat, vor diesem Meisterwerke der Elektrotechnik stehend die zahlreichen Wege der Entwicklung verfolgt, die von dieser unscheinbaren Maschine abzweigen und dabei bedenkt, daß bereits im Jahre 1880 von der Firma Siemens & Halske den Behörden der Entwurf einer Hochbahn für Berlin vorgelegt wurde, wird sich der starken treibenden Kräfte bewußt werden, welche damals schon die Elektrotechnik beseelten; er wird aber auch der Tatsache gedenken, daß deutscher Geist und deutsche Tatkraft besonders der Entwicklung des Vollbahnbetriebes unter Verwendung des einphasigen Wechselstroms, der in letzter Zeit allgemeine Geltung erlangt hat, förderlich war.

Elektrische Wechselstromlokomotiven deutschen Ursprungs und deutscher Bauart werden fast in allen Teilen der Welt verwendet, und wenn in diesem Buche die Entwicklung der elektrischen Lokomotive geschildert werden soll, so kann mit Fug und Recht das Schwergewicht auf den deutschen Anteil an dieser Entwicklung verlegt werden.

Die Richtlinien dieser Entwicklung sind nun in kurzen Zügen folgende.

Im Jahre 1882 wurde im Kgl. Sächsischen Kohlenbergwerke Zaukerode die erste elektrische Güterförderung mit Lokomotivbetrieb durch die Firma Siemens & Halske eingerichtet. Im gleichen Jahre wurde von derselben Firma die erste Straßenbahn mit elektrischem Betrieb und Oberleitung auf der Strecke Charlottenburg—Spandauer Bock erbaut. Diese erstmalige Verwendung einer Oberleitung stellt die zweite Stufe der Entwicklung dar. Jener oben erwähnten Ausstellungsbahn wurde ebenso, wie einer im Jahre 1881 zwischen dem Anhalter Bahnhof und dem Kadettenhause in Lichterfelde erbauten Bahn der Strom durch die beiden Schienen mit einer Spannung von etwa 150 Volt zugeführt.

Eine im Jahre 1884 zwischen Sachsenhausen und Offenbach am Main errichtete Bahn unterschied sich von der Charlottenburg—Spandauer Anlage

durch die Stromzuführung insofern, als bei der letzteren ein kleiner Stromabnehmerwagen auf den beiden Stromzuleitungsdrähten, die neben dem Gleis herliefen, entlang fuhr, während die Stromzuführung der Offenbacher Anlage aus zwei geschlitzten Eisenröhren bestand, innerhalb derer elliptisch geformte Stromabnehmer gleiten konnten.

Inzwischen hatte auch im Ausland, ganz besonders in Amerika, der elektrische Straßenbahnbetrieb sich Eingang verschafft, wo die Bauart entwickelt wurde, die heute noch unseren Straßenbahnen zugrunde liegt, nämlich die einpolige Oberleitung bei Benutzung des Gleises als Rückleitung. Erst nachdem diese Bauart im Jahre 1891 durch die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft in Deutschland zuerst bei der Halleschen Straßenbahn angewandt worden war, setzte eine großzügige Entwicklung des elektrischen Straßenbahnbetriebes ein. Das Jahrzehnt 1890—1900 brachte den meisten Großstädten und mittleren Städten elektrische Straßenbahnen, und der riesige Aufschwung der Städte gerade in dieser Zeit ist nicht in letzter Linie diesem neuen Verkehrsmittel zuzuschreiben.

Hand in Hand mit der Entwicklung des elektrischen Straßenbahnbetriebes ging, besonders im Ausland, und hier wieder vor allen Dingen in Amerika und England, die Einführung elektrischer Zugkraft im Vollbahnbetrieb, und zwar waren die ersten elektrisch betriebenen Vollbahnstrecken die Vorortlinien großer Städte und die Stadtbahnen selbst. Erwähnt sei hier als erste derartige Bahn die City and South London Railway, die 1890 von der British Thomson Houston Co. erbaut<sup>1)</sup>, mit Stromzuführung durch eine dritte Schiene arbeitet und mit Gleichstrom von 500 Volt gespeist wird.

In Amerika wurde der erste Vollbahnbetrieb 1895 auf der Nantasketstrecke der New York, New Haven und Hartford-Eisenbahn eröffnet, die ebenso, wie die Londoner Bahn, mit elektrischen Lokomotiven betrieben wurde.

Die ersten Linien mit Gleichstrombetrieb waren in Deutschland die folgenden:

Meckenbeuren—Tettngang im Jahre 1895, Düsseldorf—Krefeld 1898; Schwebebahn Barmen—Vohwinkel 1901; Hoch- und Untergrundbahn Berlin 1902; Berlin—Großlichterfelde 1903; diese Bahnen arbeiten mit Betriebsspannungen zwischen 550 und 750 Volt.

Die weitere Ausdehnung des Verkehrs zwischen den Städten zwang aber sehr bald zur Verwendung höherer Betriebsspannungen; so wurde die Köln—Bonner Rheinuferbahn im Jahre 1906 für 990 Volt, die Industriebahn Maizières—St. Marie (Moselhütte) sogar für 2000 Volt, die Wendelsteinbahn in Bayern für 1500 Volt eingerichtet.

In Österreich setzte diese Entwicklung ein mit der Elektrisierung der Budapester Untergrundbahn im Jahre 1896. Erwähnung mögen noch finden die 60 km lange Nebenbahn Trient—Malé (1909) und die im gleichen Jahre eröffneten Betriebe der Strecken Dermulo—Mendelpaß und Landesgrenze—Salzburg, welche letztere die österreichische Teilstrecke der Linie Berchtesgaden—Salzburg darstellt.

<sup>1)</sup> E. T. Z. 1911, S. 421.

In Frankreich wurde zuerst im Jahre 1900 die Pariser Stadtbahn elektrisiert, die nach vollem Ausbau 138 km Doppelgleis umfassen wird. Daneben wird der elektrische Betrieb auf den westlichen Pariser Vorortlinien ausgebaut, die ebenfalls beinahe 130 km Doppelgleis umfassen werden.

In der Schweiz wurde 1901 die Wynenthalbahn als erste Überlandbahn erbaut, der bald eine größere Zahl anderer Linien folgte, von denen die Verbindungstrecke zwischen Albulabahn und Veltlinbahn, die im Jahre 1910 vollendete Berninabahn, die eine Gesamtlänge von 60 km besitzt, besondere Bedeutung erlangt hat.

Auch Italien hat eine größere Zahl bedeutender Gleichstromvollbahnen aufzuweisen, von denen die im Jahre 1902 vollendete Strecke Mailand—Porto Ceresio mit einer Länge von 73 km Erwähnung finden möge.

Schließlich sind auch die Staaten Norwegen, Holland und Spanien mit je einer Linie an der Entwicklung des Gleichstromvollbahnbetriebes beteiligt.

Diese Entwicklung kann heute als in ihren Richtlinien abgeschlossen betrachtet werden. Es sei bei dieser Gelegenheit noch bemerkt, daß verschiedene Bahnverwaltungen, in erster Linie die preußisch-hessischen Staatsbahnen, auch dem Akkumulatorenbetrieb Eingang verschafft haben, der aber wegen des beschränkten elektrischen Fassungsvermögens der Akkumulatoren nur für den reinen Lokalverkehr und auf Vorortlinien Verwendung finden konnte.

Die Einführung des elektrischen Betriebes brachte allenthalben eine starke Verkehrssteigerung mit sich, was in erster Linie auf dessen Fähigkeit, sich den Bedürfnissen des Verkehrs durch wirtschaftlichen Betrieb kleinerer Zugeinheiten anzupassen, zurückzuführen ist.

Überhaupt ist die Einführung der elektrischen Triebkraft in erster Linie rein wirtschaftlichen Erwägungen zu verdanken, die später noch eingehend zu behandeln sind. Die Betriebsergebnisse dieser elektrischen Gleichstrombahnen rechtfertigten die Voraussetzungen in jeder Hinsicht und veranlaßten schon sehr frühzeitig die verschiedenen Eisenbahnverwaltungen, auch der Möglichkeit der Elektrisierung der eigentlichen Fernbahnen näherzutreten. Man tat diesen Schritt zuerst in Amerika, indem man den erprobten Gleichstrombetrieb in der Weise übertrug, daß man zur eigentlichen Fernleitung des elektrischen Stromes dreiphasigen Wechselstrom verwendete, den man durch umlaufende Umformer, die längs der Strecke in bestimmten Abständen aufgestellt wurden, in Gleichstrom zur Speisung der Stromzuführungsleitungen umwandelte. In der Schweiz und in Italien dagegen führte man die in erster Linie von der Firma Brown, Boveri & Co. ausgebildete Drehstromzugförderung ein.

Diese Linien sind die 40 km lange Strecke Burgsdorf—Thun (1899), die mit Drehstrom von 750 Volt bei 40 sekundlichen Vollschrwingungen aus 14 längs der Strecke aufgestellten Transformatoren gespeist wird; die 23 km lange Simplonstrecke zwischen Brig und Iselle (1906), deren Lokomotiven unmittelbar mit hochgespanntem Drehstrom von 3000 Volt bei 16 Schwingungen betrieben werden; schließlich die italienischen Strecken Chiavenna—Colico—Lecco, Colico—Sondrio (Veltlinbahn) und eine größere Zahl von Linien der italienischen Staatseisenbahnen, die alle mit 3000 Volt bei 15 sekundlichen Vollschrwin-

gungen betrieben werden. Wenn auch der Drehstrom grundsätzlich die Möglichkeit bietet, bei Verwendung hoher Betriebsspannungen die Leistungen zu liefern und fortzuleiten, welche für den Betrieb eines Vollbahnnetzes erforderlich sind, so brach sich doch sehr bald die Erkenntnis Bahn, daß dem wirklich Erreichbaren verhältnismäßig enge Grenzen gesetzt sind. In erster Linie ist es der Drehstrommotor selbst, der trotz seiner einfachen Bauart den Bedingungen eines wirtschaftlichen Betriebes nicht gerecht werden kann; in zweiter Linie verbieten die stark wachsenden Isolationsschwierigkeiten der zweipoligen Oberleitung eine Steigerung der Spannung bis zu jenen Beträgen, die für eine wirtschaftliche Übertragung der Leistung unbedingt erforderlich sind. Schließlich bereitet die Anordnung der zweipoligen Oberleitung bei verwickelter Gleisanlage große Schwierigkeiten.

Diese Sachlage läßt es verständlich erscheinen, daß die meisten Bahnverwaltungen sich der Einführung des Drehstroms gegenüber ablehnend verhielten. Die preußische Eisenbahnverwaltung stellte sich von vornherein auf den Standpunkt, daß bei Fernbahnen für die Übertragung der zum Betrieb schwerer Züge erforderlichen Arbeitsmengen nur einphasiger Wechselstrom hoher Spannung in Frage kommen könne; an eine Verwirklichung dieses an sich richtigen Gedankens konnte aber noch nicht herangetreten werden, weil noch kein für Vollbahnzwecke geeigneter Wechselstrommotor vorhanden war. Wiederholten Anregungen der genannten Behörde folgend beschäftigte sich die damalige Union-Elektricitäts-Gesellschaft, später die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft eingehend mit der Entwicklung eines brauchbaren Wechselstrombahnmotors. Die Frucht dieser Vorarbeiten war ein nach den Schutzrechten von Winter und Eichberg gebauter Wechselstrommotor, dessen Brauchbarkeit sich auf der im Jahre 1903 elektrisierten Strecke Niederschöne-weide—Spindlersfeld, die mit 6000 Volt betrieben wurde, glänzend bewährte.

Ein Blick in die Patentliteratur des Jahrzehntes zwischen 1900 und 1910 zeigt am besten, welche Unsummen von Arbeit von allen elektrotechnischen Firmen auf die Schaffung brauchbarer Wechselstrommotoren verwendet wurden. Heute gibt es eine größere Zahl solcher Motoren, die ihre Brauchbarkeit für den Vollbahnbetrieb erwiesen haben und von denen später noch eingehend die Rede sein wird. — Bei der Elektrisierung der zuletzt genannten Strecke leisteten die Erfahrungen wertvolle Dienste, die von der Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen in den Jahren 1901 bis 1903 auf der von der preußischen Bahnverwaltung zur Verfügung gestellten Strecke Marienfelde—Zossen gesammelt worden waren. Diese Studiengesellschaft, die von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft und von der Firma Siemens & Halske ins Leben gerufen worden war, hat an einer mit 10000 Volt betriebenen Bahnanlage mit dreiphasiger Speisung alle diejenigen Untersuchungen angestellt, die sich auf die damals noch unbekanntenen Größen der Bahnwiderstände bei hohen Geschwindigkeiten bis 200 km in der Stunde bezogen; sie hat ferner den Nachweis geführt, daß eine einwandfreie Stromentnahme aus den Oberleitungen bei hohen Spannungen und bei größten Geschwindigkeiten möglich ist.

Diesen Versuchen, denen auch noch solche von Siemens & Halske auf der Teltower Chaussee (1899) zuzurechnen sind, folgte sehr bald die Ver-

wirklichung größerer Vollbahntwürfe. In Deutschland wurde zunächst im Jahre 1905 die im Besitz der Lokalbahn-Aktiengesellschaft in München befindliche Bahnstrecke Murnau—Oberammergau für elektrischen Lokomotivbetrieb und Triebwagenverkehr durch einphasigen Wechselstrom bei 5000 Volt und 16 Schwingungen durch Siemens & Halske eingerichtet. Ungleich größere Bedeutung für die Weiterentwicklung des elektrischen Vollbahnbetriebs ist indessen dem Entschluß der preußischen Eisenbahnverwaltung, die Stadt- und Vorortbahn Blankenese—Hamburg—Ohlsdorf mit einphasigem Wechselstrom bei einer Spannung von 6300 Volt und bei 25 sekundlichen Vollschnvingungen zu betreiben, beizumessen. Diese Bahn, die erste bedeutende Vollbahn mit Wechselstrombetrieb und Triebwagenverkehr, hat seit ihrer Betriebseröffnung im Jahre 1908 die Erwartungen mehr als erfüllt, so daß die Staatsbahnverwaltung kein Bedenken mehr trug, auch für den Fernbahnbetrieb die gleiche Stromart zu erproben.

Zu diesem Zwecke wurde zunächst die Strecke Dessau—Bitterfeld im Jahre 1911 elektrisiert. Die Erfolge auch dieses Probetriebes waren durchaus günstig; sie zeitigten den Entschluß, die ganze Strecke Magdeburg—Leipzig, deren Teilstrecke die obengenannte Linie ist, und die Strecke Leipzig—Halle zu elektrisieren. Dieser Erweiterungsbau wird augenblicklich ausgeführt, ebenso wie die elektrische Ausrüstung der Gebirgsstrecke Lauban—Königszelt. Beide Anlagen arbeiten mit 15000 Volt bei  $16\frac{2}{3}$  sekundlichen Vollschnvingungen.

Auch die anderen deutschen Bahnverwaltungen haben sich mit der Frage des einphasigen elektrischen Bahnbetriebs eingehend befaßt. Das Kgl. Bayrische Staatsministerium für Verkehrsangelegenheiten hat in einer großzügig angelegten Denkschrift (1908) die Frage der Stromversorgung des oberbayrischen Bahnnetzes erörtert mit dem Ergebnis, den einphasigen Betrieb für eine Anzahl von Strecken aus Gründen technischer und wirtschaftlicher Natur zu empfehlen. Inzwischen ist die Teilstrecke Landesgrenze—Griesen—Garmisch der Linie Garmisch—Innsbruck dem Betrieb übergeben worden und es werden demnächst folgen die Strecken Landesgrenze—Scharnitz—Partenkirchen und Salzburg—Freilassing—Berchtesgaden.

Ebenso hat die Großherzogl. Badische Staatseisenbahnverwaltung die Wiesentalbahn (Basel—Zell i. W.) für einphasigen Betrieb ausgebaut und seitens der Badischen Lokal-Eisenbahngesellschaft wird die Albtalbahn (Karlsruhe—Herrenalb) für elektrische Zugförderung eingerichtet.

Der letzte Abschnitt dieser Entwicklung wird schließlich gekennzeichnet durch den dem preußischen Landtag vorgelegten Antrag der preußischen Eisenbahnverwaltung, die Stadt- und Ringbahn und sämtliche Vorortbahnen Berlins mit elektrischer Zugförderung durch einphasigen Wechselstrom auszurüsten, der inzwischen, soweit die Stadt- und Ringbahn in Frage kommt, die Genehmigung beider Häuser des Landtages gefunden hat.

Wie bereits Eingangs dieser geschichtlichen Übersicht bemerkt, haben sich auch die meisten ausländischen Eisenbahnverwaltungen den Bestrebungen und Überzeugungen der deutschen Behörden angeschlossen. Auf dem allgemeinen Eisenbahnkongreß<sup>1)</sup> in Bern (1909) haben sich die Vertreter von

<sup>1)</sup> E. K. B. 1910, Heft 10, 12 und 20.

Deutschland, Österreich und der Schweiz ohne Einschränkung für diese Betriebsform ausgesprochen.

Der staatliche schweizerische Studienausschuß für elektrischen Bahnbetrieb kommt in seinem Bericht (1912) zu folgendem Ergebnis: „Das Einphasensystem mit Kollektormotoren mit Serienverhalten, ausgeführt mit rund 15 Vollschrwingungen in der Sekunde und einer Fahrdrachtspannung von ungefähr 15 000 Volt, unter Umständen 10 000 Volt, ist für die Verhält-

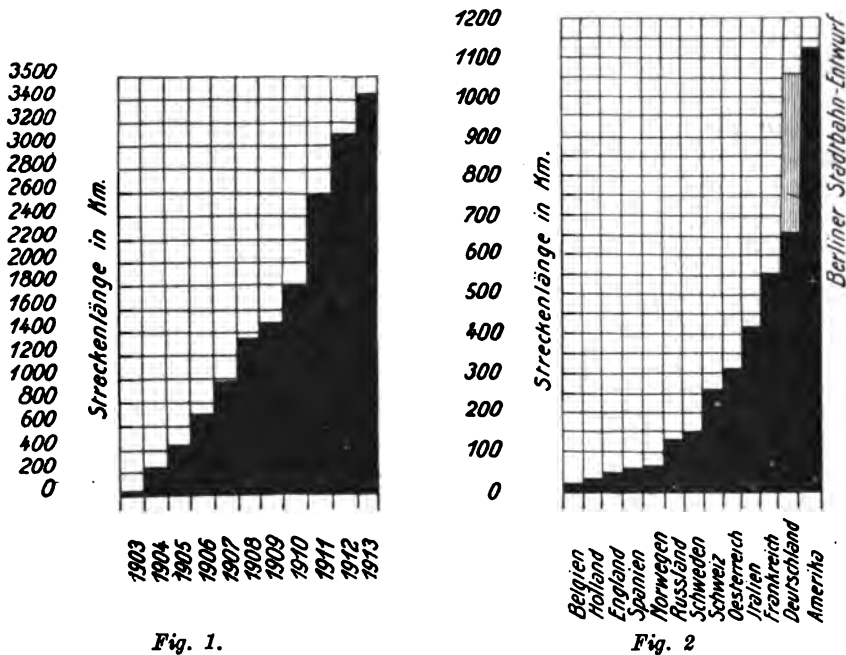


Fig. 1.

Fig. 2

nisse unseres Vollbahnbetriebes technisch und wirtschaftlich als das günstigste System zu empfehlen.“

Die Ausbreitung des Vollbahnbetriebes mit einphasigem Wechselstrom in der ganzen Welt während des Zeitraums 1903 bis 1913 ergibt sich aus dem in Fig. 1 dargestellten Schaubild, während Fig. 2 erkennen läßt, wie sich die im Januar 1913 im Betriebe oder im Bau befindlichen Einphasen-Wechselstrombahnen auf die einzelnen Länder verteilen<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1913, S. 336.



---

---

# I. Kapitel.

## Die einphasigen Vollbahnmotoren.

### 1. Allgemeines.

Wie bereits in der Einleitung angedeutet wurde, setzte die Erprobung des Einphasen-Kollektormotors im Bahnbetrieb etwa mit dem Jahre 1900 ein. Zwar war die Tatsache, daß man einen Gleichstrommotor bei Erfüllung bestimmter Bedingungen auch mit Wechselstrom betreiben könne, bereits vor 1890 bekannt, aber die Aufmerksamkeit der elektrotechnischen Kreise wurde in den Jahren zwischen 1890 und 1900 fast vollständig durch den mehrphasigen Induktionsmotor in Anspruch genommen. Zum ersten Male wird der Wechselstrom-Kollektormotor in der deutschen Literatur in einem Aufsatz von A. du Bois-Reymond erwähnt, der im 1. Heft der Elektrotechnischen Zeitschrift vom Jahre 1889 erschienen ist und der die bezeichnende Überschrift trägt: „Über die Schwierigkeiten, welche der Arbeitsübertragung durch Wechselstrom im Wege stehen.“

In diesem Aufsatz werden Versuche beschrieben, welche die Firma Siemens & Halske an reinen Reihenschlußmotoren, Reihenschluß-Kurzschlußmotoren und Nebenschlußmotoren angestellt hat und die unbefriedigend ausfielen, weil es nicht gelang, die Selbstinduktion der Ankerwicklungen zu beseitigen. Auch konnte man den Einfluß der Eisenverluste auf den Wirkungsgrad derartiger Motoren noch nicht übersehen. Daneben sah man in der Verwendung eines Kollektors für Wechselstrommotoren einen Rückschritt, nachdem man in dem dreiphasigen und einphasigen Induktionsmotor einen scheinbar allen Anforderungen genügenden vollkommenen Wechselstrommotor gefunden hatte. Der Kollektormotor bot außerdem eine Reihe neuartiger Aufgaben, deren Lösung ein großes Maß geistiger Arbeit erforderte; es fehlte der gangbare Weg, um den neuartigen, bei den Kollektormotoren vorliegenden Verhältnissen gerecht werden zu können.

Bahnbrechend in dieser Hinsicht waren die Arbeiten von Poitier und Görges, die in den Jahren 1894 und 1895 entstanden. Die wissenschaftliche Weiterentwicklung wird durch die Namen Atkinson, Latour, Steinmetz, Arnold, Winter und Eichberg in den Hauptlinien gekennzeichnet.

Die ersten, einen wesentlichen Fortschritt auf diesem neuen Gebiete bezeichnenden Patentanmeldungen fallen in den Zeitraum zwischen 1895 und 1900, und das folgende Jahrzehnt bringt dann eine große Reihe wertvoller Arbeiten, die nachfolgend zusammengestellt sind.

- E. T. Z. 1895, S. 750. Görges, Einführung der Quersfeldtheorie.
- E. T. Z. 1898, S. 164. Görges, Entwicklung der Quersfeldtheorie.
- E. T. Z. 1903, S. 271. Görges, graphische Darstellung der Quersfeldtheorie.
- E. T. Z. 1903, S. 453, 877, 1027. Latour, Repulsionsmotor.

- E. T. Z. 1903, S. 903. Osnos, Kreisdiagramm des Repulsionsmotors.  
 E. T. Z. 1903, S. 934. Osnos, Theorie des kompensierten Serienmotors.  
 E. T. Z. 1904, S. 209. Osnos, Diagramm des kompensierten Reihenschlußmotors.  
 E. T. Z. 1904, S. 918. Theorie des Winter-Eichberg-Motors.  
 E. T. Z. 1904, S. 1. Osnos, Entstehung, Arbeitsweise, Regelung und Kritik des einphasigen Kommutator-Motors.  
 E. T. Z. 1904, S. 464. Pichelmayer, Diagramme, Prinzipschaltungen, Stromwendung.  
 E. T. Z. 1904, S. 75. Eichberg, Einphasen-Kollektormotoren und ihre Regelung.  
 E. T. Z. 1905, S. 767. Theorie des Winter-Eichberg-Motors.  
 Dissertation 1905 (Springer-Berlin). v. Koch, Übersicht über die bisherige Entwicklung.  
 1905. Punga, Das Funken von Kollektormotoren. (Gebr. Jänecke, Hannover.)  
 E. T. Z. 1906, S. 406. Breslauer, Verhalten des Einphasen-Kollektormotors.  
 E. T. Z. 1906, S. 267. Punga, Einphasen-Kollektormotoren (Primärschaltungen, Theorie, Diagramme).  
 E. T. Z. 1906, S. 537. Richter, Einphasen-Reihenschlußmotoren (Wicklungen, Diagramme).  
 E. T. Z. 1907, S. 893. Heyland, Gesichtspunkte für Entwicklung des Bahnbetriebs mit Einphasen-Kollektormotoren (Besprechung der gebräuchlichen Motorentypen).  
 E. T. Z. 1907, S. 1097. Schnetzler, Regelung von Repulsionsmotoren durch Bürstenverschiebung.  
 E. T. Z. 1907, S. 730, 758, 771. Görges, Das Verhalten der Wechselstrommotoren in einheitlicher Betrachtungsweise.  
 Dissertation 1907 (R. Dietze, Berlin). Linker, Der Einphasenmotor in der Patentliteratur.  
 E. T. Z. 1908, S. 588. Eichberg, Entwicklung des einphasigen Bahnsystems.  
 E. T. Z. 1908, S. 2, 31, 52. Osnos, Über Wechselstrom-Kommutatormotoren mit besonderer Berücksichtigung der Bahnmotoren.  
 E. T. Z. 1908, S. 183, 510. Jonas, Klassifikation der Einphasen-Motoren.  
 E. T. Z. 1909, S. 485, 516, 544. Fischer-Hinnen, Über die Vorausberechnung des Einphasen-Kollektormotors (Reihenschlußmotor, Repulsionsmotor, Literaturangaben).  
 E. T. Z. 1909, S. 623, 663. Eichberg, Über die verschiedenen Arten des Wechselstrom-Kommutatormotors und die Frage der günstigsten Periodenzahl.  
 E. T. Z. 1910, S. 283, 311. Heilfron, Neuere Fragen aus dem elektrischen Vollbahnwesen (Regelung von Bahnmotoren, Periodenzahl, Spannung, Arbeitsrückgewinnung).  
 Dissertation 1910 (B. G. Teubner, Leipzig). R. Wolf, Die experimentelle Bestätigung des Vektorendiagrammes für den Winter-Eichberg-Latour-Motor.  
 E. T. Z. 1911, S. 157, 190. Rusch, Der Repulsionsmotor.  
 E. T. Z. 1911, S. 587, 614, 808. Ossanna, Über die Dimensionierung der einphasigen Kommutatormotoren mit besonderer Berücksichtigung der schweren Zugförderung.  
 E. T. Z. 1911, S. 1258, 1291. R. Richter, Zur Funkenunterdrückung bei Wechselstrom-Kommutatormotoren.  
 E. T. Z. 1912, S. 873. Schenkel, Über elektrische Bremsung mit Wechselstrom-Kommutatormotoren.  
 E. T. Z. 1912, S. 1264. A. Scherbius, Über Selbsterregung und Nutzbremung von Maschinen mit Reihenschlußcharakteristik.  
 E. T. Z. 1912, S. 1231, 1355. M. Latour, Einphasenwechselstrom-Kollektormotoren.  
 Dissertation 1912 (J. Springer-Berlin). E. Dyhr, Die Einphasenmotoren nach den deutschen Patentschriften.  
 1912 (Springer-Berlin). Arnold, Wechselstromtechnik, Band V, Die asynchronen Wechselstrommaschinen.

## 2. Die Arbeitsgrößen eines Kommutatormotors bei Spelung durch Wechselstrom.

### a) Das Drehmoment des Ankers.

Nach Fig. 3 fließt dem nach Art der Gleichstromanker gewickelten Läufer über die Bürsten der Wechselstrom  $i_2$  zu, während gleichzeitig der

Kraftfluß  $\Phi_y$  in der zu  $m-n$  senkrechten Richtung den Anker durchsetzt.  $\Phi_y$  und  $i_2$  haben gleiche Wechselzahl und ihre zeitliche Verschiebung sei durch das Vektordiagramm Fig. 4 gegeben. Hier und in den späteren Erörterungen sei stets angenommen, daß die  $\uparrow$ -Richtung den positiven Werten von  $\Phi_y$  und die  $\ominus$ -Richtung in den oberhalb der Linie  $m-n$  liegenden Ankerleitern den positiven Werten von  $i_2$  entspricht. Im Wellendiagramm würde man durch Multiplikation der zusammengehörigen Augenblickswerte  $\Phi_y$  und  $i_2$  die in Fig. 5 dargestellte Drehmomentenlinie erhalten. Beispielsweise hat zur Zeit  $t$  das Drehmoment den Wert  $D_t = c \cdot \Phi_{yt} \cdot (-i_{2t}) = -c \cdot \Phi_{yt} \cdot i_{2t}$ . Das mittlere Drehmoment besitzt eine überwiegende Zahl von negativen, d. h. in der Richtung der Uhrzeigerdrehung auftretenden Kraftwirkungen, so daß sich der Anker in der Uhrzeigerdrehung drehen muß. Das Drehmoment eines Kommutatormotors weist also bei

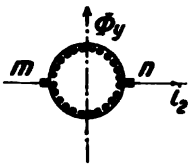


Fig. 3.

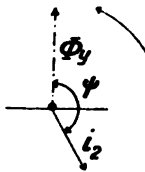


Fig. 4.

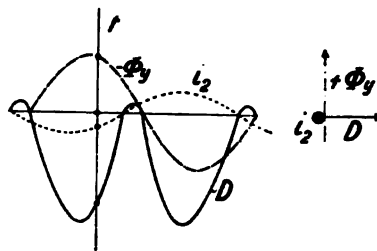


Fig. 5.

Wechselstrombetrieb starke zeitliche Schwankungen auf, ein Umstand, der bei der Beurteilung der Anfahrverhältnisse im Auge zu behalten ist.

Das mittlere Drehmoment  $D_m$  läßt sich folgendermaßen ermitteln. Es muß sein

$$D_m \cdot T = \int_0^T D \cdot dt,$$

wobei  $T$  die Zeit einer Vollschiwingung des Wechselstroms ist; es ist also

$$D_m = \frac{c}{T} \int_0^T \Phi_{yt} \cdot i_{2t} dt.$$

Hierin ist

$$\begin{aligned} \Phi_{yt} &= \bar{\Phi}_y \cdot \sin \omega t \\ i_{2t} &= \bar{i}_2 \sin (\omega t - \psi). \end{aligned}$$

Hieraus folgt weiter

$$\begin{aligned} D_m &= \frac{c}{T} \bar{\Phi}_y \cdot \bar{i}_2 \int_0^T \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \psi) \frac{d \omega t}{\omega} \\ D_m &= \frac{c}{T \cdot \omega} \bar{\Phi}_y \cdot \bar{i}_2 \cdot \pi \cos \psi; \quad T = \frac{1}{\omega}, \quad \omega = 2 \pi \sim; \\ D_m &= c \cdot \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot i_{2 \text{ eff.}} \cdot \cos \psi. \end{aligned}$$

Da im vorliegenden Falle  $\cos \psi$  negativ ist, erhält auch  $D_m$  das negative Vorzeichen.

Während bei Gleichstrom das Drehmoment des Ankers von dem Produkt aus Kraftfluß und Ankerstromstärke abhängt, tritt bei Wechselstrombetrieb zu diesem Produkt noch der Cosinus des von Kraftfluß und Ankerstrom eingeschlossenen zeitlichen Winkels  $\psi$  hinzu.

Ist nach Fig. 6  $\psi < 90^\circ$ , so überwiegen nach Fig. 7 die positiven, linksdrehenden Kraftwirkungen: der Motor muß also gegen die Uhrzeigerrichtung umlaufen;  $D_m$  ist in diesem Falle gemäß obiger Gleichung positiv, da  $\cos \psi$  positiv ist. Für  $\psi = 90^\circ$  ist  $D_m = 0$ , da in diesem Falle die Summe der linksdrehenden gleich der Summe der rechtsdrehenden Kraftwirkungen ist.

Schließlich ist noch der Fall zu betrachten, daß der Kraftfluß  $\Phi_y$  zur Bürstenverbindungslinie um den Winkel  $\beta$  geneigt ist; dann kommt

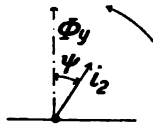


Fig. 6.

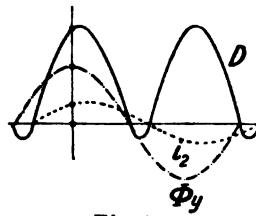


Fig. 7a.

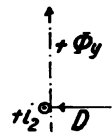


Fig. 7b.

nach Fig. 8 für die Bildung des Drehmomentes nur der Anteil  $\Phi_y' = \Phi_y \sin \beta$  in Betracht und der Ausdruck für das mittlere Drehmoment nimmt die allgemeine Form an

$$D_m = c \cdot \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot i_2 \text{ eff.} \cdot \cos \psi \cdot \sin \beta.$$

Ganz allgemein lautet die Gleichung für einen Motor mit  $Z$  Stäben auf dem Ankerumfang, die sich auf  $a$  Ankerstromzweigpaare verteilen bei  $p$  Polpaaren

$$D_m = \frac{Z \cdot 2p}{2a \cdot 2\pi \cdot 9,81} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot i_2 \text{ eff.} \cos \psi \cdot \sin \beta \text{ mkg.}$$

b) Die im Anker induzierten EMKe.

I. Dreht sich ein Gleichstromanker mit  $Z$  Ankerstäben in einem unveränderlichen Kraftfluß  $\Phi_y$  mit  $n$  Umdrehungen in der Minute, so entsteht an den Bürsten eine EMK von der gleichbleibenden Größe (Fig. 9)

$$E = Z \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi_y \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Ändert sich  $\Phi_y$  nach einem Sinusgesetz, so daß  $\Phi_{ymom} = \bar{\Phi}_y \sin \omega t$  ist, so ist auch  $E$  eine Wechselspannung, die mit  $\Phi_y$  in gleicher Phase liegt, oder um  $180^\circ$  verschoben ist und der Gleichung

$$E_{mom} = Z \cdot \frac{n}{60} \cdot \bar{\Phi}_y \cdot 10^{-8} \sin \omega t$$

folgt. Ihr Effektivwert hat die Größe

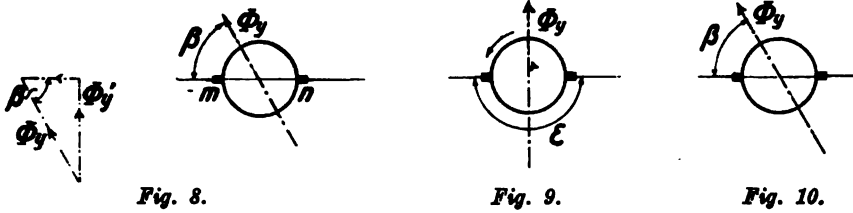
$$E = Z \cdot \frac{n}{60} \cdot \bar{\Phi}_y \cdot \frac{10^{-8}}{\sqrt{2}} \text{ Volt.}$$

Schließt nach Fig. 10  $\Phi_y$  mit der Bürstenverbindungsline den räumlichen Winkel  $\beta$  ein, so ist

$$E = Z \cdot \frac{n}{60} \cdot \overline{\Phi}_y \cdot \frac{10^{-8}}{\sqrt{2}} \cdot \sin \beta.$$

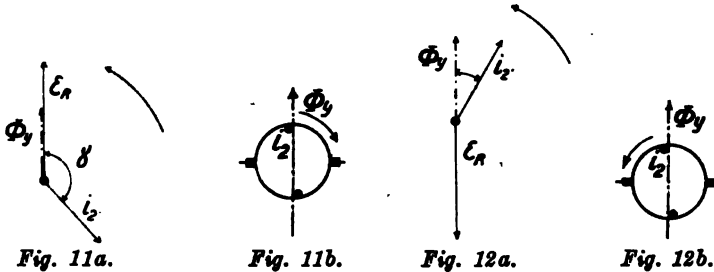
Im folgenden sollen diese durch Drehung in einem Kraftfluß induzierten EMKe stets durch  $E_R$  bezeichnet werden.

Die Verschiebung des  $E_R$ -Vektors gegenüber dem Vektor des Ankerstromes  $i_2$  ergibt sich aus folgender Betrachtung.



Wenn nach Fig. 11  $\Phi_y$  und  $i_2$  einen stumpfen Winkel einschließen, so ergibt sich eine Rechtsdrehung des Ankers;  $E_R$  muß aber nach der Rechtenhandregel im wesentlichen  $i_2$  entgegengerichtet sein, ist also, wie bei einem Gleichstrommotor als genelektromotorische Kraft aufzufassen. Das ist aber nur möglich, wenn  $E_R$  mit  $\Phi_y$  phasengleich ist.

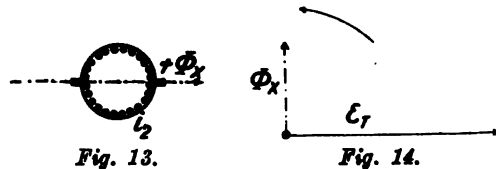
Schließt dagegen  $\Phi_y$  mit  $i_2$  einen spitzen Winkel — Fig. 12 — ein, so ergibt sich die Linksdrehung des Ankers. Da  $E_R$  wieder wesentlich dem Strome  $i_2$  entgegengerichtet sein muß, so muß  $E_R$  gegen  $\Phi_y$  um  $180^\circ$  verschoben sein.



II. Wenn der Anker nach Fig. 13 von einem Wechselstrom durchflossen wird, so bildet sich ein mit dem Ankerstrom  $i_2$  gleichphasiger Kraftfluß  $\Phi_x$  aus, der in den Ankerstäben genau so wie in der Sekundärwicklung eines Transformators ein EMK von der Größe

$$E' = \overline{\Phi}_x \cdot \frac{2\pi \sim}{\sqrt{2}} \cdot \frac{Z}{2} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$E' = \frac{\Phi_x}{\sqrt{2}} \cdot Z \cdot \sim \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$



erzeugt.

Hierin ist  $\sim$  die sekundliche Wellenzahl des Wechselstroms. Diese Spannung, die im folgenden stets als  $E_T$  bezeichnet werden soll, eilt dem Kraftfluß  $\Phi_x$  stets um  $90^\circ$  nach (Fig. 14).

Die Klemmenspannung  $e_2$ , welche einen Strom  $i_2$  in dem im Drehmomentfluß  $\Phi_y$  umlaufenden Anker erzeugt, muß also die drei Teilspannungen  $-E_R$ ,  $-E_T$  und  $+i_2 r_2$  besitzen, wobei  $r_2$  der Ankerwiderstand ist. Die Ermittlung von  $e_2$  für die beiden typischen Fälle der Links- und Rechtsdrehung des Ankers zeigen die beiden Diagramme Fig. 15 und Fig. 16.

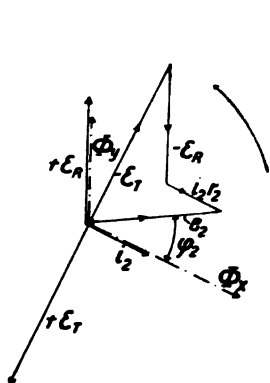


Fig. 15.

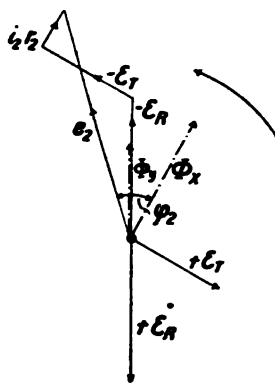


Fig. 16.

c) Die vom Anker aufgenommene Leistung.

Diese hat den Wert (vgl. die beiden letzten Diagramme)

$$[a_2 = e_2 i_2 \cos \varphi_2;$$

sie setzt sich zum Teil  $-i_2^2 r_2$  — in Joulesche Wärme um, so daß

$$a_2 - i_2^2 r_2 = A_2$$

die vom Anker erzeugte mechanische Leistung, in Watt ausgedrückt, sein muß.

Aus den Diagrammen ergibt sich nun aus geometrischen Gründen, daß  $A_2 = (-E_R) \cdot i_2 \cdot \cos(180^\circ - \gamma) = E_R' \cdot i_2 \cdot \cos(180^\circ - \gamma)$  ist, wobei  $\gamma$  der von  $+E_R$  und  $i_2$  eingeschlossene Winkel ist. Die Größe  $-E_R = E_R'$  ist hierbei Teilspannung der Klemmenspannung  $e_2$ .

Da nun  $\gamma$  stets zwischen  $90$  und  $180^\circ$  liegt, muß  $\cos(180 - \gamma)$  stets positiv sein. Diese aus der Stromquelle entnommene elektrische Leistung  $E_R' \cdot i_2 \cos(180^\circ - \gamma)$  setzt sich in die gleichgroße mechanische Leistung  $E_R \cdot i_2 \cos(180^\circ - \gamma)$  um.

Hieraus folgt weiter, daß die Bedingung für reinen Leerlauf auf zweierlei Weise erfüllt werden kann; es wird nämlich  $A_2 = 0$  sowohl für  $i_2 = 0$ , als auch für  $\cos(180 - \gamma) = 0$ . Im letzteren Falle müßte also  $\gamma = 90^\circ$  sein, d. h.  $E_R$  müßte senkrecht auf  $i_2$  stehen.

#### d) Transformatorische Wirkungen.

Die Ableitung der Gleichung für die mechanische Leistung zeigt, daß  $E_T$ , weil stets auf  $i_2$  senkrecht stehend, für die Erzeugung der mechanischen

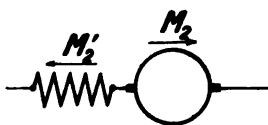


Fig. 17.

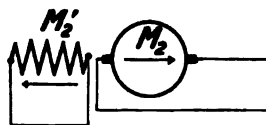


Fig. 18.

Leistung nicht in Betracht kommt; vielmehr erzeugt die durch  $\Phi_x$  hervorgerufene Selbstinduktion nur eine scheinbare Widerstandserhöhung, der eine vergrößerte

Klemmenspannung entsprechen muß; daneben wird durch die Selbstinduktion des Ankers die Phasenverschiebung  $\varphi_2$  zwischen  $e_2$  und  $i_2$  vergrößert. Diese Selbstinduktion hat ferner die Wirkung, daß bei unveränderter Ankerspannung  $e_2$  der Abfall der Drehgeschwindigkeit mit wachsender Belastung größer sein muß, als wenn  $E_T$  nicht vorhanden wäre, denn mit wachsender Stromstärke  $i_2$  muß  $E_T$  zunehmen, woraus sich eine schnelle

Abnahme von  $E_R$  und, wenn  $\Phi_y$  gleichbleibenden Höchstwert besitzt, auch der Drehzahl  $n$  ergibt. Es ist daher zum mindesten wünschenswert, ja sogar erforderlich, diese Selbstinduktion aufzuheben, mit anderen Worten, den Kraftfluß  $\Phi_x$  zu vernichten.

Dies kann erreicht werden durch eine unmittelbar oder induktiv gespeiste Ausgleichswicklung (Fig. 17 und Fig. 18), deren magnetomotorische Kraft diejenige des Ankers ganz oder doch zum größten Teil aufhebt. Bei der induktiven Speisung nach Fig. 18 muß stets eine Rest-MMK  $M_R$  bestehen bleiben, welche den Transformatorfluß  $\Phi_x$  erzeugt; dieser induziert die EMK, welche erforderlich ist, um die in der Ausgleichswirkung auftretenden Ohmschen und induktiven Spannungsabfälle zu bestreiten. Da überhaupt die Transformatorwirkungen beim Betriebe der Kommutatormotoren eine bedeutsame Rolle spielen, möge an dieser Stelle auch das Transformatordiagramm kurz behandelt werden.

Soll der in Fig. 19 durch die elektrischen Größen  $R$  und  $L$  gekennzeichnete Belastungsstromkreis des Transformators  $T$  von einem Strome  $i_2$  durchflossen

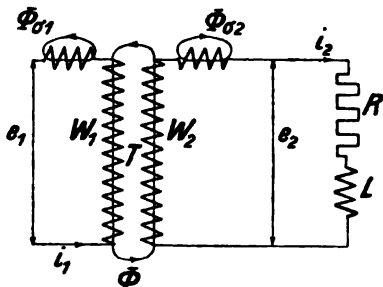


Fig. 19.

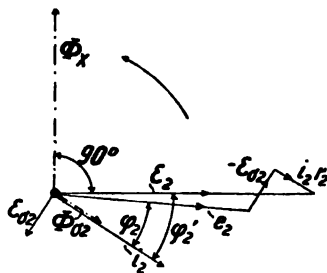


Fig. 20.

werden, so muß eine Klemmenspannung von der Größe  $e_2 = i_2 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$  erzeugt werden, die dem Strome  $i_2$  um den Winkel  $\varphi_2$  voraussieht. Dabei ist  $\text{tg } \varphi_2 = \frac{\omega L}{R}$ . Diese Klemmenspannung ist ein Teil der in der Sekundärwicklung des Transformators durch den verketteten Kraftfluß  $\Phi$  hervorgerufenen EMK, deren anderer Teil durch die Ohmschen und induktiven Spannungsabfälle in der Sekundärwicklung verbraucht wird. Ist  $r_2$  deren Ohmscher Widerstand, so ist  $\epsilon_2 = i_2 r_2$  der Ohmsche Spannungsabfall, welcher mit  $i_2$  in gleicher Phase ist.

Ist ferner  $\Phi_{\sigma_2}$  der sekundäre Streufluß, der ebenfalls mit  $i_2$  in gleicher Phase liegt, so erzeugt dieser in den sekundären Windungen  $w_2$  eine EMK der Streuung gemäß der Gleichung

$$E_{\sigma_2} = \frac{\overline{\Phi_{\sigma_2}}}{\sqrt{2}} \cdot \omega w_2 10^{-8} \text{ Volt,}$$

welche den Anteil  $E'_{\sigma_2} = -E_{\sigma_2}$  der EMK<sub>2</sub> verzehrt.  $E_2$  ist also gemäß Fig. 20 die Schlußlinie des Vielecks  $e_2, -E_{\sigma_2}, i_2 r_2$ .

**B e m e r k u n g.** Für den besonderen Fall, der hier besonders wichtig ist, daß nämlich die induzierenden Windungen nicht gleichen Durchmesser

besitzen und alle Windungen von demselben Kraftfluß  $\Phi$  durchsetzt werden, wie Fig. 21 andeutet, sondern daß die Windungsfläche  $F$  sich nach dem Gesetze

$$F = 2 \cdot \frac{F_{\max}}{l} \cdot \sqrt{h(l-h)}$$

ändert (vgl. Fig. 22), wobei  $F_{\max} = \frac{l^2 \pi}{4}$  und  $h$  die Entfernung einer Windung vom Ende der Spule, deren Länge  $l$  ist, bedeutet, geht die Spannungsgleichung in die Form

$$E = \frac{\bar{\Phi}}{\sqrt{2}} \omega w_2 10^{-8} \cdot \frac{2}{\pi}$$

über. Nun stellt der in Fig. 22 dargestellte Spulenschnitt einen Schnitt durch den Anker eines Kommutatormotors dar, auf dessen Umfang  $Z_2$  Stäbe gleichmäßig verteilt sind. Es ist also

$$Z_2 = 2 w_2$$

und dementsprechend ist

$$E = \frac{\bar{\Phi}}{\sqrt{2}} \cdot \omega \frac{Z_2}{2} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2}{\pi}$$

die Summe der in allen Stäben induzierten Spannungen. Da durch die Bürsten

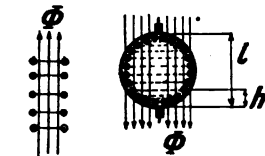


Fig. 21.

Fig. 22.

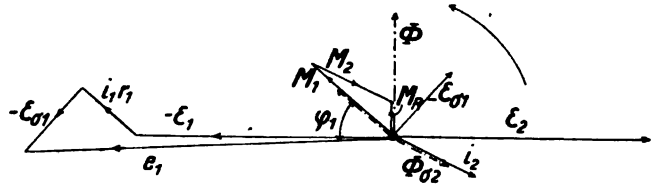


Fig. 23.

$m$  und  $n$  die Wicklung in zwei parallele Zweige zerlegt wird, muß die an den Bürsten auftretende Spannung die Größe

$$E_2 = \frac{1}{2} \frac{\bar{\Phi}}{\sqrt{2}} \omega \frac{Z_2}{2} 10^{-8} \cdot \frac{2}{\pi} = \frac{\bar{\Phi}}{\sqrt{2}} \cdot \sim \cdot Z_2 10^{-8} \text{ Volt}$$

besitzen, worin  $\sim$  die sekundliche Wellenzahl ist.

Der Kraftfluß  $\Phi$  muß  $E_2$  um  $90^\circ$  voreilen und er wird erzeugt durch eine resultierende magnetomotorische Kraft  $M_R$ , die sich nach Fig. 23 aus  $M_1$  und  $M_2$  zusammensetzt.

Hiervon sind gegeben  $M_R = \frac{\bar{\Phi}}{\sqrt{2}} \cdot R_m$ , wenn  $R_m$  der magnetische Widerstand der Kraftlinienbahn ist, ferner  $M_2 = \frac{4\pi}{10} Z_2 i_2$ ; danach läßt sich  $M_1 = \frac{4\pi}{10} Z_1 i_1$  zeichnerisch finden und daraus dann weiter  $i_1$ , wenn  $Z_1$  gegeben ist. Im allgemeinen ist  $M_R$  klein, so daß  $M_1$  ohne wesentlichen Fehler gleich  $M_2$  gesetzt werden kann. Hieraus ergibt sich die bekannte Beziehung

$$i_1 Z_1 = i_2 Z_2$$

$$i_1 = i_2 \frac{Z_2}{Z_1}$$



Ist  $Z_1 = Z_2$ , so wird  $i_1 = i_2$ . In Worten: Fließt im Sekundärstromkreis eines Transformators ein Strom  $i_2$ , so wird primär ein Strom  $i_1 = i_2 \frac{Z_2}{Z_1}$  aufgenommen, wobei  $i_2$  gegen  $i_1$  mit großer Näherung um  $180^\circ$  versetzt ist. An Stelle des Dreieckes der magnetomotorischen Kräfte  $M_1$ ,  $M_2$  und  $M_R$  kann man auch ein Stromdreieck mit den Seiten  $i_1$ ,  $i_2 \cdot \frac{Z_2}{Z_1}$  und  $i_M$  setzen, welches demjenigen der magnetomotorischen Kräfte ähnlich ist und in welchem  $i_M$  der sog. Magnetisierungsstrom ist, der als Erzeuger von  $M_R$  zu betrachten ist. In den später zu erläuternden Motordigrammen ist meistens dieses Stromdreieck gezeichnet.

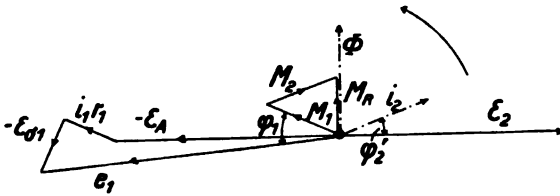


Fig. 24.

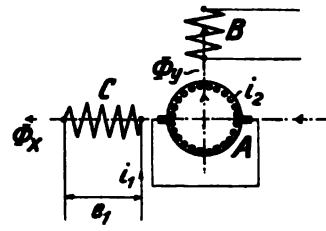


Fig. 25.

In der Primärwicklung wird durch den Kraftfluß  $\Phi$  eine EMK<sub>1</sub> von der Größe

$$E_1 = \frac{\Phi}{\sqrt{2}} \omega Z_1 10^{-8} \text{ Volt}$$

induziert, die um  $90^\circ$  hinter  $\Phi$  zurückbleibt, ferner ein EMK der Streuung, hervorgerufen durch den Streufluß  $\Phi_{\sigma 1}$ , von der Größe

$$E_{\sigma 1} = \frac{\Phi_{\sigma 1}}{\sqrt{2}} \omega Z_1 10^{-8} \text{ Volt,}$$

die hinter  $i_1$  um  $90^\circ$  zurückbleibt. Die primäre Klemmenspannung  $e_1$  muß also die Teilspannungen  $-E_1$  zur Vernichtung von  $E_1$ , ferner  $-E_{\sigma 1}$  zur Vernichtung von  $E_{\sigma 1}$  und den Ohmschen Spannungsabfall  $i_1 r_1$ , der in Phase mit  $i_1$  ist, besitzen. Fig. 23 zeigt die Ermittlung von  $e_1$ .

In dem bei den Kommutatormotoren häufig vorkommenden Fall, daß der Sekundärstrom der EMK  $E_2$  vorausseilt, erhält man das in Fig. 24 dargestellte Diagramm, das sich von dem oben besprochenen hauptsächlich dadurch unterscheidet, daß  $M_1$  infolge der Voreilung von  $i_2$  unter Umständen kleiner sein kann als  $M_2$ .

Aus geometrischen Gründen folgt, daß

$$A_2 = e_2 i_2 \cos \varphi_2 = E_2 i_2 \cos \varphi_2' - i_2^2 r_2 = e_1 i_1 \cos \varphi_1 - i_1^2 r_1 - i_2^2 r_2$$

sein muß.

Diese sekundäre Nutzleistung  $A_2$ , die dem ruhenden Transformator an dessen Sekundärklemmen entnommen wird, um in einem, mit dem Transformator nicht magnetisch verketteten Stromkreise Arbeit zu leisten, kann sich aber in der Sekundärwicklung der Transformator selbst in mechanische Drehungsarbeit umsetzen. Wenn dies der Fall sein soll, muß die Sekundärwicklung zunächst eine für die Erzeugung mechanischer Leistung geeignete Form erhalten, d. h. die des Kommutatorankers mit Gleichstromwicklung

nach Fig. 25. Sodann sind die Bürsten untereinander leitend zu verbinden, und zwar so, daß in dieser Verbindungsleitung keine Arbeit verzehrt wird: die Bürsten sind also kurz zu schließen. Außerdem muß ein Drehmomentfluß  $\Phi_y$  erzeugt werden, der im Verein mit dem durch die Transformatorwirkung erzeugten Ankerstrom  $i_2$  das Drehmoment erzeugt. Das Diagramm Fig. 26 stellt einen willkürlich herausgegriffenen Fall dar, wo der durch Drehung im Kraftfluß  $\Phi_y$  induzierten EMK  $E_R$  durch eine gleichgroße aber entgegengesetzte Teilspannung  $-E_R$  der sekundär induzierten EMK  $E_2$  (durch Transformatorwirkung) das Gleichgewicht gehalten wird. Die Teilspannung  $-E_R$  tritt hier an Stelle der Klemmenspannung  $e_2$ . Für die Phase des Drehmomentflusses  $\Phi_y$  sind nun zwei Möglichkeiten vorhanden: Entweder liegt er in Phase mit  $+E_R$  (Rechtsdrehung des Ankers) oder er liegt in Phase mit  $-E_R$  (Linksdrehung des Ankers).

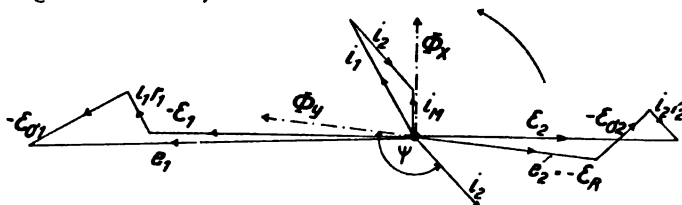


Fig. 26.

Die Ermittlung der Klemmenspannung  $e_1$ , die an Wicklung  $C$  herrschen muß, ergibt sich wieder genau wie bereits vorher beschrieben.

### 3. Die wichtigsten Gattungen der Kommutatormotoren mit Reihenschluß-eigenschaft.

Man kann sämtliche Elektromotoren nach ihrem Betriebsverhalten in zwei Gruppen einordnen, von denen die eine Nebenschluß-, die andere Reihenschluß-eigenschaft besitzt.

Das Nebenschlußverhalten eines Motors ist dadurch gekennzeichnet, daß seine Drehzahl vom wechselnden Drehmoment nur wenig beeinflusst wird, während die Drehzahl der Motoren mit Reihenschlußverhalten bei wachsendem Drehmoment stark sinkt.

Für alle Betriebe, die mit starken Belastungsschwankungen arbeiten, wie in erster Linie der Bahnbetrieb, gewährleisten die Motoren mit Reihenschluß-eigenschaft den günstigsten und für das Kraftwerk wirtschaftlichsten Betrieb, falls nicht für bestimmte Fälle trotz der schwankenden Belastung aus irgendwelchen Gründen gleichbleibende Drehzahl gefordert wird.

Der Motor mit Reihenschluß-eigenschaft kann als „elastischer“ Motor im Gegensatz zu dem „starren“ Motor mit Nebenschlußverhalten bezeichnet werden und ebenso wie beim Straßenbahnbetrieb sprechen alle Gründe für die Verwendung des Reihenschlußmotors im Vollbahnbetrieb.

Auch die Rücksicht auf die Möglichkeit der Arbeitsrückgewinnung, die sog. Nutzbremmung, die bei Gleichstrombetrieb die Verwendung von Nebenschlußmotoren verlangt, kann bei Wechselstrombetrieb nicht gegen den Reihenschlußmotor ins Feld geführt werden, da, wie in Abschnitt 15 gezeigt wird, bei Wechselstromspeisung auch der Reihenschlußmotor dieser Aufgabe gerecht wird.

Ausschlaggebend für die Wahl des Reihenschlußmotors ist neben den Eigentümlichkeiten des Vollbahnbetriebs, denen er sich am besten anpaßt, die Rücksicht auf die gleichmäßige Belastung des Kraftwerkes, da seine Leistung, also das Produkt aus Drehmoment und Geschwindigkeit, bei schwankender Beanspruchung sich viel weniger ändert als diejenige des Nebenschlußmotors. Je geringer aber die Belastungsschwankungen im Kraftwerk sind, desto wirtschaftlicher arbeitet dieses.

Aus der großen Zahl der möglichen Schaltungsanordnungen des Reihenschlußmotors haben folgende Arten Bedeutung für den Bahnbetrieb erlangt.

1. Der unmittelbar gespeiste Reihenschlußmotor nach Fig. 27; Feldwicklung  $B$ , Ausgleichwicklung  $C$  und Anker  $A$  sind hintereinander geschaltet. Nach Fig. 28 kann man die magnetomotorischen Kräfte (MMKe) der Wicklungen  $B$  und  $C$ , also  $M_B$  und  $M_C$  ersetzen durch eine einzige MMK von der Größe  $M_R$ , die durch eine Wicklung erzeugt wird, deren magnetische Achse gegen die des Ankers um den Winkel  $\alpha$  versetzt ist. Schließlich kann man den Zweck, den die Ausgleichwicklung  $C$  zu erfüllen hat, nämlich die Vernichtung des Ankerfeldes, auch dadurch — wenigstens angenähert — er-

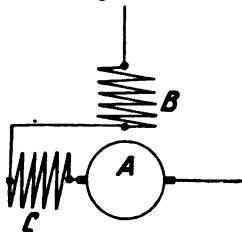


Fig. 27.

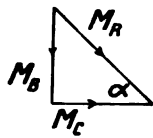


Fig. 28.

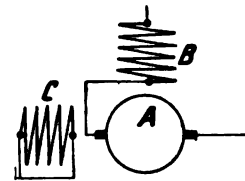
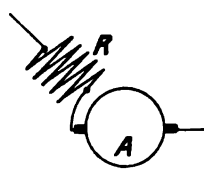


Fig. 29.

reichen, daß man diese durch das Ankerfeld induktiv erregt; sie ist dabei nach Fig. 29 kurzgeschlossen. Hierbei wird das Ankerfeld bis auf denjenigen geringen Betrag vernichtet, der erforderlich ist, um die für die Überwindung der Ohmschen und induktiven Spannungsabfälle in  $C$  erforderliche EMK zu induzieren. Aus später noch zu erörternden Gründen ist die unmittelbare Speisung der Ausgleichwicklung vorteilhafter.

2. Der induktiv gespeiste Reihenschlußmotor mit Ständererregung (Fig. 30) läßt sich aus Fig. 29 ableiten, indem man die Rolle von  $A$  und  $C$  vertauscht. Die vom primären Strom durchflossene Wicklung  $C$  ist jetzt Primärwicklung eines Transformators, dessen Sekundärwicklung der kurzgeschlossene Anker  $A$  ist.

Im Gegensatz zu den unmittelbar gespeisten Motoren wird also hier dem Anker die gesamte Leistung, die zur Deckung seiner Verluste und der von ihm erzeugten mechanischen Leistung erforderlich ist, durch Transformation aus Wicklung  $C$  zugeführt. Die Wicklung  $B$  dient lediglich zur Herstellung des Kraftflusses  $\Phi_v$ , der im Verein mit den durch Induktion entstandenen Läuferströmen  $i_2$  das Drehmoment erzeugt. Man bezeichnet zweckmäßig die Wicklung  $C$  als Ständerarbeitswicklung und Wicklung  $B$  als Ständererregungswicklung und die entsprechenden Kraftflüsse  $\Phi_v$  und  $\Phi_s$  als Drehmomentfluß und Transformatorfluß. Während beim unmittel-

bar gespeisten Motor mit kurzgeschlossener Kompensationswicklung nach Fig. 29 der Transformatorfluß bei allen Belastungen, also bei allen Stromstärken im Anker, verschwindend klein ist, ändert sich dieser Kraftfluß beim induktiv gespeisten Motor stark mit der Belastung. Er ist in diesem Falle der Träger der gesamten Ankerenergie und muß demnach stets so groß sein, daß er eine  $EMK_2$  im Anker erzeugt, welche sowohl den Ohmschen und induktiven Spannungsabfällen im Anker, als auch der durch die Drehung im Drehmomentfluß  $\Phi_v$  induzierten EMK das Gleichgewicht hält. Dementsprechend muß an der Arbeitswicklung  $C$  eine Klemmenspannung bestehen, welche der  $EMK_2$  und den Spannungsabfällen in dieser Wicklung das Gleichgewicht hält.

Aus diesem Motor, der gewöhnlich als Atkinsonscher Repulsionsmotor bezeichnet wird, entsteht durch Vereinigung der Wicklungen  $C$  und  $B$  die in Fig. 31 dargestellte Abart. Die magnetische Achse  $M_R$  ist wieder um den Winkel  $\alpha$  gegenüber der Bürstenverbindungsline verschoben. Dieser, von Arnold im Jahre 1892 entworfene Motor, der zuerst von der Maschinenfabrik Örlikon gebaut wurde, wird zumeist als Einfachbürstenrepulsionsmotor bezeichnet. Fälschlicherweise wird der Repulsionsmotor dieser Form häufig

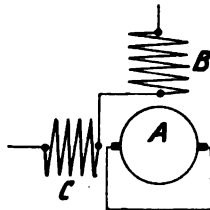


Fig. 30.

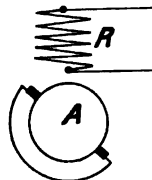


Fig. 31.

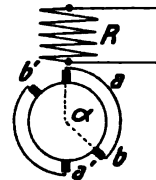


Fig. 32.

als eine Erfindung E. Thomsons bezeichnet, er hat indessen mit dem Thomson'schen Motor, der bereits 1887 bekannt wurde, nur die geneigte Stellung der Bürstenverbindungsline gegenüber der magnetischen Achse gemein. Der Anker des Thomson'schen Motors unterscheidet sich dagegen wesentlich von dem des Repulsionsmotors. Der Anker des Thomson'schen Repulsionsmotors trägt eine bestimmte Zahl offener Spulen, deren Enden mit je einer Kommutatorlamelle in Verbindung stehen. Je zwei auf einem Durchmesser gegenüberliegende Lamellen sind Anfang und Ende einer Spule. Wenn diese nun durch die kurzgeschlossenen Bürsten verbunden werden, kann in der so geschlossenen Ankerspule durch Transformation aus der primären Spule ein Strom induziert werden. Eine kurzgeschlossene Spule, deren Ebene mit der Richtung der Kraftlinien eines Wechselfeldes einen schiefen oder stumpfen Winkel einschließt, hat bekanntlich das Bestreben, ihre Ebene in die Richtung des Kraftflusses einzustellen. Infolgedessen muß sich der Anker des Repulsionsmotors drehen; die kurz geschlossene Spule kommt aus dem Bereich der Bürsten und die nächste Spule wird durch diese kurzgeschlossen; so daß eine dauernde Drehung des Ankers zustande kommt. Es läßt sich nun zeigen, daß die Drehmomentbildung am günstigsten wird, wenn die Bürstenverbindungsline um etwa  $45^\circ$  gegen die magnetische Achse der primären Wicklung geneigt ist. Die Nachteile dieses primitiven Motors liegen auf der Hand:

Hauptsächlich ist es das Bürstenfeuer, das einen einwandfreien Betrieb derartiger Motoren unmöglich macht. —

Neben dem Einfachbürstenrepulsionsmotor gibt es einen solchen mit zwei Bürstensätzen, der gegenüber dem erstgenannten schwerwiegende Vorteile besitzt, die später noch zu erläutern sind. Es ist dies der sog. Dérimotor, dessen Schaltbild in Fig. 32 dargestellt ist. Der Dérimotor besitzt die feststehenden Bürsten  $a a'$  und die beweglichen Bürsten  $b b'$ . Dabei ist je eine Bürste  $a$  mit je einer Bürste  $b$  verbunden. Die Bürsten  $b$  können um einen Winkel  $\alpha$  beiderseitig verschoben werden, der zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  liegt.

3. Aus dem Atkinsonschen Repulsionsmotor entwickelt sich der induktiv gespeiste Reihenschlußmotor mit Läufererregung, der von Latour, Winter und Eichberg durchgebildet wurde, in der Weise, daß man an Stelle der Spule  $B$  in Fig. 30, die den Drehmomentfluß zu erzeugen hat, die Ankerwicklungen selbst zur Erzeugung dieses Flusses benutzt. Man erhält auf diese Weise die in Fig. 33 dargestellte Anordnung. Die Bürstenpaare  $aa$  und  $bb$  sind um  $90^\circ$  gegeneinander verschoben; das Bürstenpaar  $aa$  ist kurzgeschlossen, so daß die Ständerarbeitswicklung  $C$  durch den Transformatorfluß  $\Phi_x$  die erforderliche Leistung auf den Anker übertragen kann. Der primäre Strom  $i_1$  fließt über die Bürsten  $bb$  durch den Anker und erzeugt einen ihm proportionalen Drehmomentenfluß  $\Phi_v$ , der in Wechselwirkung mit den durch Induktion in den Ankerwicklungen entstandenen

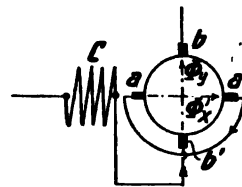


Fig. 33.

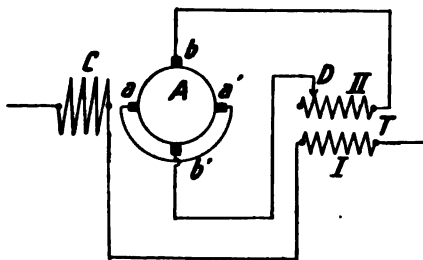


Fig. 34.

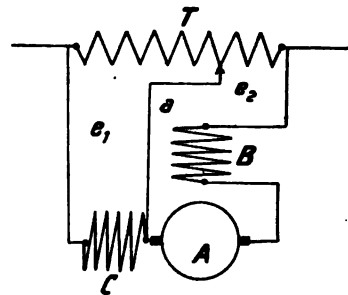


Fig. 35.

Strömen  $i_2$  das Drehmoment erzeugt. Natürlich fließen tatsächlich in den einzelnen Ankerleitern Ströme, die sich aus  $i_1$  und  $i_2$  zusammensetzen. Aber diese tatsächlich fließenden Ströme kann man wieder in die beiden Teilströme  $i_1$  und  $i_2$  zerlegen und die Arbeitsvorgänge im Anker so behandeln, als ob diese beiden Teilströme nebeneinander beständen.

Seine besondere Bedeutung erhält dieser Motor durch Vereinigung mit einem Transformator  $T$ , dessen Sekundärwicklung  $II$  durch einen Windingsschalter  $D$  das Bürstenpaar  $bb$  speist (Fig. 34). Durch die Zwischenschaltung des Transformators  $T$  wird bei passendem Anschluß der Bürsten  $bb$  die einfache Anordnung nach Fig. 33 nicht wesentlich geändert, da die Ströme im Transformator fast genau um  $180^\circ$  versetzt sind. Dagegen bietet diese Anordnung den für den Betrieb sehr wichtigen Vorteil, daß man die Größe des Drehmoment-

flusses  $\Phi_y$  durch  $D$  regeln kann. In dieser Verbindung des Motors mit einem Reguliertransformator wird der Motor als Winter-Eichberg-Motor bezeichnet.

4. Schließlich haben die Reihenschlußmotoren mit doppelter Speisung gemäß Fig. 35, welche eine von den zahlreichen Anordnungsmöglichkeiten darstellt, besondere Bedeutung für den Bahnbetrieb erlangt. Der Läufer  $A$  wird sowohl unmittelbar von der Spannung  $e_2$  des Spartransformators  $T$  als auch induktiv von der Ständerarbeitswicklung  $C$  aus gespeist. Dabei kann das Verhältnis der an  $C$  herrschenden Spannung  $e_1$  zu  $e_2$  mittels des Windingsschalters  $a$  geändert werden. Die Reihenschlußseigenschaft des Motors ist durch die Hintereinanderschaltung der Erregerwicklung  $B$  und des Ankers  $A$  gesichert. Die Bedeutung dieser Motoren beruht in ihrer großen Regulierbarkeit bei vorzüglicher Stromwendung.

#### 4. Gesichtspunkte für die Wicklungsanordnung der Wechselstromkommutatormotoren.

Der Läufer hat stets eine über den Umfang gleichmäßig verteilte Wicklung, die zumeist als Durchmesserwicklung, in besonderen Fällen auch als Sehnenwicklung, d. h. als Wicklung mit verkürztem Wicklungsschritt ausgeführt wird. Im übrigen zeigt diese Wicklung keine Merkmale, die sie grundsätzlich von derjenigen eines Gleichstromankers unterscheiden, wenn man von den Widerstandsverbindungen zwischen Wicklung und Kollektor absieht, die zur Verbesserung der Stromwendung in manchen Fällen Verwendung finden und die in Abschnitt 5 besprochen werden.

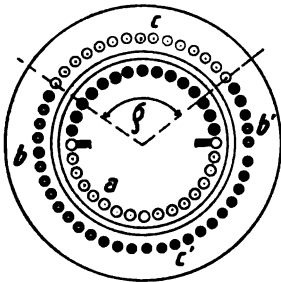


Fig. 36.

Der Aufbau des Ständers weicht dagegen von der bei Gleichstrommotoren gebräuchlichen Form insofern ab, als in Anbetracht des schwingenden Kraftflusses auch das Magnetgestell unterteilt werden muß. Sodann hat man mit der Tatsache zu rechnen, daß bei allen Wechselstrommotoren, bei denen Transformatorwirkungen zwischen Ständer- und Läuferwicklungen auftreten (kurzgeschlossene Ausgleichswicklung oder kurzgeschlossene Bürsten), die beiden Kraftflüsse  $\Phi_y$  und  $\Phi_x$  in ihrer Phase verschoben sind. Da sie außerdem räumlich verschoben sind, entsteht ein elliptisches Drehfeld, dessen reine Ausbildung nur dadurch möglich wird, daß man von der Ausbildung ausgeprägter Pole am Ständereisen absieht. Man verwendet daher die vom asynchronen Drehfeldmotor her bekannte Anordnung des genutzten Ständers, an dessen innerem Umfang die verschiedenen Wicklungen nach Fig. 36 möglichst gleichmäßig verteilt werden. Die Stäbe der Gruppen  $c$  und  $c'$  sind so hintereinandergeschaltet, daß die auf diese Art gebildete Spule  $C$  die magnetomotorische Kraft  $M_C$  entwickelt, welche derjenigen des Ankers  $M_A$  gleich aber entgegengerichtet ist. Die Wicklung  $b-b'$  besorgt die Magnetisierung in der  $y$ -Achse (Fig. 37).

Die Notwendigkeit, auf die Entstehung eines Drehfeldes durch die bauliche Anordnung des Motors Rücksicht zu nehmen, liegt bei den reinen Reihenschlußmotoren nicht vor.

Bei diesen sind die Kraftflüsse  $\Phi_y$  und  $\Phi_x$  in gleicher Phase, so daß stets nur ein resultierender Kraftfluß entsteht, der in der Richtung  $\Phi_R$  (Fig. 38) schwingt, solange die Sättigungsgrenze in Läufer- oder Ständereisen noch nicht erreicht ist. Wird die Entstehung von  $\Phi_x$  durch eine Ausgleichwicklung verhindert, so bleibt nur noch der Kraftfluß  $\Phi_y$  in gleichbleibender Lage übrig.

Deshalb ist, wie Fig. 39 andeutet, bei diesem Motor die Verwendung ausgeprägter Pole  $PP$  möglich, die durch die Wicklungen  $B$  magnetisiert

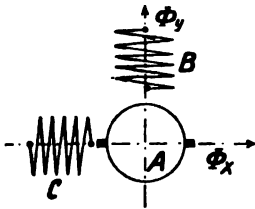


Fig. 37.

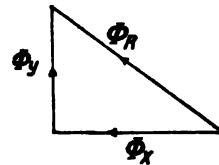
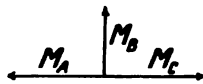


Fig. 38.

werden, während in den Polschuhen die Ausgleichwicklung  $C$  so untergebracht wird, daß ihre MMK derjenigen des Ankers entgegengerichtet ist. Eine derartige Anordnung zeigten die ersten Kommutatormotoren der Firmen Ganz & Co., Helios und Westinghouse. Aber die Ausgleichwicklung erfüllt bei dieser Bauart nicht vollkommen ihren Zweck; denn es kommt hier nicht allein darauf an, daß ihre magnetische Achse  $M_C$  derjenigen des Ankers  $M_A$  entgegengerichtet ist, vielmehr muß, wenn eine vollkommene Aufhebung des

Ankerfeldes eintreten soll, die entmagnetisierende Wicklung  $C$  das Spiegelbild der Ankerwicklung  $A$  sein. Diese Tatsache ergibt sich aus Fig. 40 folgendermaßen. Die MMK der kurzen Spule  $C$  ist derjenigen der langen Spule  $A$  entgegengerichtet. Beide Spulen sollen auf der Längeneinheit die gleiche Windungszahl  $Z$  besitzen, so daß die sog. Stromdurchflutung, d. h. das Produkt  $i \cdot Z$  auf der Strecke  $b$  in beide Spulen die gleiche ist, wenn beide Spulen vom gleichen Strom durchflossen werden. Dann wird zwar das magnetische Feld längs der

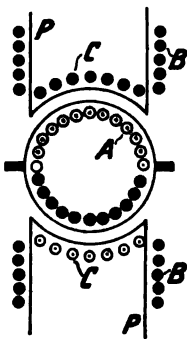


Fig. 39.

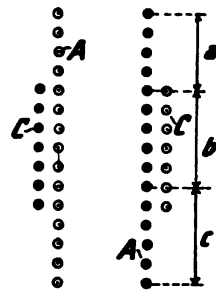


Fig. 40.

Strecke  $b$  aufgehoben, aber nicht längs der Strecke  $a$  und  $c$ . Eine vollkommene Vernichtung des Feldes wird nur dann möglich, wenn beide Spulen bei gleicher Durchflutung gleiche Länge besitzen und wenn die Windungen von  $C$  unmittelbar neben denen von  $A$  liegen. Im vorliegenden Falle bilden die Spulenabteilungen  $a$  und  $c$  unverkettete Streufelder aus, die bei Wechselstrombetrieb eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Klemmenspannung hervorrufen, eine Erscheinung, deren Beseitigung der Zweck der Ausgleichwicklung war.

Es erhellt hieraus ohne weiteres, daß eine, den Polbogen  $\rho$  umfassende Ausgleichwicklung nach Fig. 36 niemals ihren Zweck vollkommen erfüllen

kann. Vielmehr ist dem Ziel zuzustreben, die Ausgleichwicklung  $C$  über den ganzen Ständerumfang zu verteilen, wie es in Fig. 41 angedeutet ist. Um dies zu erreichen, darf aber der Ständer keine ausgeprägten Pole besitzen und dieser Forderung wird auch bei den unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotoren fast durchweg Rechnung getragen.

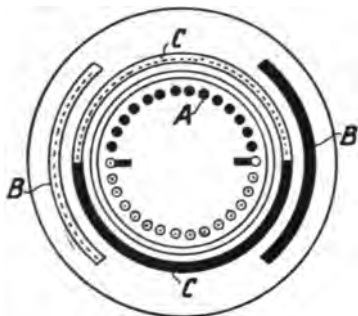


Fig. 41.

Besondere Anordnungen, die dem Zwecke möglichst vollkommener Vernichtung des Ankerfeldes dienen sollen, finden in den folgenden Abschnitten Erwähnung.

**5. Schwierigkeiten der Stromwendung und deren Bekämpfung.**

I. Der in Fig. 42 dargestellte Anker werde so vom Strome durchflossen, daß der Kraftfluß  $\Phi_x$  in der gezeichneten Richtung entsteht. Der Stab  $a$  besitzt dann die  $\odot$ -Richtung, der Stab  $b$  die  $\bullet$ -Richtung des Stroms<sup>1)</sup>. Der Anker drehe sich nun unter der Einwirkung irgendeiner Kraft gegen die Uhrzeigerrichtung. Zunächst sei ferner angenommen, daß der Anker mit Gleichstrom gespeist werde. Stab  $a$  schneidet dann nach Fig. 43 den Kraftfluß  $\Phi_x$  und die in  $a$  induzierte EMK hat bekanntlich einen Höchstwert, wenn  $a$  unter der Bürste  $m$  steht. Durch die Bürsten  $m n$  werden aber induzierte Windungen kurzgeschlossen und es entsteht ein Kurzschlußstrom, der sowohl zu dem Kraftfluß  $\Phi_x$  als auch zu der Geschwindigkeit der Drehung in bestimmten Verhältnis steht. Die Rechte-handregel ergibt, daß diese EMK der Drehung die Richtung hat, daß das Verschwinden des  $\odot$ -Stromes und das Entstehen des  $\bullet$ -Stromes bei der Stromwendung beim Vor-

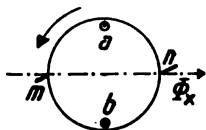


Fig. 42.



Fig. 43.

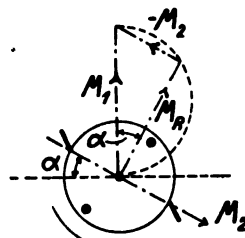


Fig. 44.

übergang des Stabes  $a$  unter der Bürste  $m$  verzögert wird. Um diese Kurzschlußströme, deren Unterbrechung bei der Stromwendung Funkenbildung verursacht, zu vermeiden, muß man den Kraftfluß  $\Phi_x$  vernichten. Man erreicht dies

1. durch Bürstenverschiebung
2. durch Anordnung von Wendepolen
3. durch Ausgleichwicklungen.

Zu 1. Wenn die in Fig. 44 skizzierte Maschine ein Motor ist, so muß ein Drehmomentfluß vorhanden sein, der von einer magnetomotorischen Kraft  $M_1$  erzeugt wird. Durch Verschiebung der Bürsten in dem der Drehrichtung des Ankers entgegengesetzten Sinne um einen Winkel  $\alpha$  kann man

<sup>1)</sup>  $\odot$ -Ströme fließen auf den Beschauer hin;  $\bullet$ -Ströme fließen vom Beschauer weg.



es erreichen, daß der Anteil  $M_1 \cdot \sin \alpha = -M_2$  die magnetomotorische Kraft  $M_2$  des Ankers vernichtet. Der Drehmomentfluß wird jetzt allein von dem Anteil  $M_1 \cos \alpha = M_R$  erzeugt und ist mit  $M_R$  im Raume gleichgerichtet. Ändert sich  $M_1$  und  $M_2$  in gleichbleibendem Verhältnis, wie beim Reihenschlußmotor, so behält  $M_R$  stets die gleiche Richtung bei allen Belastungen. Die Bürsten können dann in der ein für allemal ermittelten Stellung stehen bleiben. Das Gleiche gilt für Wechselstrombetrieb des unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotors, da  $M_1$  mit  $M_2$  stets gleiche Phase besitzt.

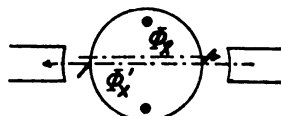


Fig. 45.

Zu 2. Durch besondere Wendepole, deren magnetische Achse nach Fig. 45 in der Bürstenverbindungsline liegt, kann man einen Kraftfluß  $\Phi'_x$  erzeugen, der den die kurzgeschlossenen Windungen unter den Bürsten durchsetzenden Anteil des Kraftflusses  $\Phi_x$  vernichtet; es muß also  $\Phi'_x$  dem Kraftfluß  $\Phi_x$  entgegengerichtet sein. Bei Wechselstrombetrieb müßte  $\Phi'_x$  gegenüber  $\Phi_x$  um  $180^\circ$  zeitlich verschoben sein. Die Wendepolwicklung muß also vom Ankerstrom durchflossen werden.

Zu 3. Die Wendepolwicklung kann nur eine örtliche Beseitigung des Kraftflusses  $\Phi_x$  bewirken. Da dieser aber bei Wechselstrombetrieb unbedingt vollständig vernichtet werden muß, um die Phasenverschiebung zu verkleinern, verwendet man fast ausnahmslos die viel wirksamere Ausgleichwicklung, die nach dem früher gesagten (vgl. S. 22) möglichst auf den ganzen Ständerumfang zu verteilen ist. Diese Ausgleichwicklung muß vom Ankerstrom durchflossen oder induktiv erregt werden.

II. Wenn nun eine derartige Ausgleichwicklung auch den Kraftfluß  $\Phi_x$  vernichten kann, so bleiben doch noch die Streufelder bestehen, deren Einfluß auf die Stromwendung zunächst wieder an einem Gleichstrommotor erläutert werden möge. Gelangt z. B. in Fig. 46 die Windung  $c$  in die Stellung  $c'$ , so hat das Streufeld  $\Phi_\sigma$  seine Richtung gewechselt. Der  $\odot$ -Strom in Stab  $a$  ist verschwunden und dafür ist in ihm ein  $\bullet$ -Strom entstanden. Dadurch entsteht wieder ein EMK der Stromwendung, die sog. Wendespannung, die das Verschwinden des  $\odot$ -Stromes und das Anwachsen des  $\bullet$ -Stromes verzögert und die eine weitere Quelle der Funkenbildung an den Bürsten darstellt. Der Stab  $a$  schneidet nach Fig. 47 einen Kraftfluß  $\Phi_\sigma$ , dessen induzierende Wirkung man durch einen gleich großen, aber entgegengerichteten Kraftfluß  $\Phi'_\sigma = -\Phi_\sigma$  aufheben kann.

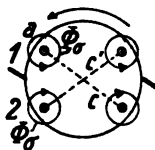


Fig. 46.

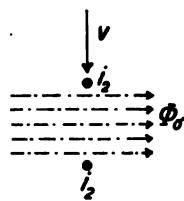


Fig. 47.

Diesen Wendefluß  $\Phi'_\sigma$  kann man wieder erzeugen

1. durch Bürstenverschiebung
2. durch Wendepole
3. durch eine Ausgleichwicklung.

Zu 1. Verschiebt man die Bürsten gegen die Drehrichtung um einen Winkel  $\beta$ , der größer ist als der früher gekennzeichnete Winkel  $\alpha$  (vgl. Fig. 48), so schließt der Anteil  $-M_2$  mit dem Anteil  $M_R$  einen stumpfen Winkel ein.

Der Fluß  $\Phi_v$  (Drehmomentfluß) wird durch  $M_R$  erzeugt und läßt sich in die Anteile  $\Phi'_\sigma$  und  $\Phi_R$  zerlegen. Durch richtige Einstellung des Winkels  $\beta$  kann  $\Phi'_\sigma = -\Phi_\sigma$  gemacht werden, so daß durch  $\Phi'_\sigma$  eine der Wendespannung genau gleiche und entgegengesetzte EMK in den kurzgeschlossenen Ankerspulen induziert wird. Das vom Anker erzeugte Drehmoment steht in bestimmtem Verhältnis zu dem Produkt  $\Phi_R \cdot i_2$ .

Diese Art der Vernichtung der Wendespannung läßt sich auch auf den Wechselstrom-Reihenschlußmotor mit unmittelbarer Speisung übertragen, da sämtliche  $M$ - und  $\Phi$ -Größen zu dem Ankerstrom in festem Verhältnis stehen und mit ihm gleiche Phase besitzen.

Zu 2. Da  $\Phi_\sigma$  mit  $\Phi_x$  gleiche Richtung und Phase besitzt, kann die Erzeugung des Flusses  $\Phi'_\sigma$  den Wendepolen übertragen werden, deren MMK dann größer gewählt werden muß, als wenn nur die örtliche Beseitigung von  $\Phi_x$  erforderlich wäre.

Zu 3. Die Ausgleichwicklung kann ebenfalls so bemessen werden, daß ihre MMK nicht nur  $\Phi_x$  aufhebt, vielmehr noch einen Fluß  $\Phi'_\sigma$  erzeugt.

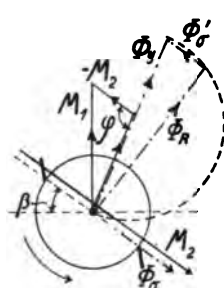


Fig. 48.

III. Bei Wechselstrombetrieb der Kommutatormotoren tritt in den kurzgeschlossenen Ankerspulen noch eine EMK auf, welche darauf zurückzuführen ist, daß in ihnen der Drehmomentfluß  $\Phi_v$  schwingt. Die kurzgeschlossenen Windungen  $W_K$  stellen die Sekundärwicklung eines Transformators dar und die in ihnen induzierte EMK hat den Wert

$$E_{TK} = \frac{\overline{\Phi_v}}{\sqrt{2}} \cdot W_K \cdot 2\pi \sim 10^{-8} \text{ Volt}$$

und bleibt um  $90^\circ$  hinter der Phase des Kraftflusses  $\Phi_v$  zurück. Der Kraftfluß  $\Phi_v$  kann nicht vernichtet werden, da er für die Bildung des Drehmomentes erforderlich ist; dagegen kann  $E_{TK}$  durch eine EMK unwirksam gemacht werden, die durch Drehung der kurzgeschlossenen Windungen in einem Kraftfluß  $\Phi_K$  induziert wird, dessen Größe sich aus der Gleichung

$$\frac{\overline{\Phi_v}}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi \sim W_K \cdot 10^{-8} = \frac{\overline{\Phi_K}}{\sqrt{2}} 2\pi \frac{n}{60} W_K \cdot 10^{-8}$$

$$\frac{\overline{\Phi_K}}{\overline{\Phi_v}} = \frac{60}{n} \sim; \overline{\Phi_K} = \overline{\Phi_v} \cdot \frac{60}{n}$$

ergibt.

Dieser Kraftfluß müßte sich also wie  $\Phi_v$  und umgekehrt wie  $n$  ändern. Außerdem muß er um  $180^\circ$  gegen  $E_{TK}$  also um  $90^\circ$  gegenüber  $\Phi_v$  (wobei  $\Phi_K$  voreilt) verschoben sein. Bei Anlauf müßte, da  $n = 0$  ist,  $\Phi_K$  unendlich groß sein; da das aber unmöglich ist, wird bei Anlauf stets eine mehr oder minder starke Funkenbildung am Kommutator auftreten.

#### Zusammenfassung.

Unter der Voraussetzung, daß durch eine Ausgleichwicklung der größte Teil der MMK des Ankers aufgehoben ist, hätte ein besonderer Wendepol folgende Aufgaben zu erfüllen.

Seine magnetomotorische Kraft muß

- I. den durch die Ausgleichswicklung nicht aufgehobenen Anteil  $M_2'$  der MMK des Ankers ausgleichen;
- II. sie muß einen Wendefluß  $\Phi'_\sigma$  erzeugen;
- III. sie muß den Kraftfluß  $\Phi_K$  erzeugen.

Die drei Anteile  $M_2'$ ,  $M'_\sigma$ ,  $M_K$  sind in ihrer Lage zum Ankerstrom  $i_2$  und zum Drehmomentfluß  $\Phi_v$ , dessen Stellung beliebig angenommen ist, in Fig. 49 dargestellt. Die sich daraus ergebende MMK des Wendepols hat die Größe  $M'_W$  und die magnetomotorische Kraft  $M_W$  erzeugt den eigentlichen Wendefluß  $\Phi_W$ . Das Diagramm läßt die Tatsache erkennen, daß nur zur Erzeugung von  $-M_2'$  und  $M'_\sigma$  der Ankerstrom  $i_2$  Verwendung finden kann, während  $M_K$  durch eine besondere Spannung geeigneter Phase erzeugt werden muß.

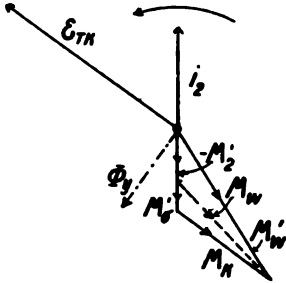


Fig. 49.

Das Diagramm läßt weiter erkennen, daß für jeden Betriebszustand des Motors die Größe und Richtung von  $M'_W$  sich ändern muß.

Es ist auch einleuchtend, daß die richtige Einstellung von  $M_K$  nicht einfach zu erreichen sein wird, weshalb es erwünscht erscheint, diese Größe möglichst klein zu halten, mit anderen Worten die EMK  $E_{TK}$  nach Möglichkeit zu vermindern. Aus der Gleichung

$$E_{TK} = \frac{\bar{\Phi}_v}{\sqrt{2}} W_K \cdot 2\pi \sim 10^{-8} \text{ Volt}$$

folgt, daß man sich diesem Ziele nähert, wenn man  $\Phi_v$  verkleinert, wenn man ferner die Zahl der kurz geschlossenen Windungen  $W_K$  verkleinert, wenn man also mit anderen Worten die Zahl der Kommutatorlamellen erhöht und wenn man schließlich — und das ist das wichtigste Mittel — die Schwingungszahl  $\sim$  möglichst niedrig wählt. Sowohl die Herabsetzung von  $\Phi_v$  als auch von  $\sim$  ist auch mit Rücksicht auf die Verkleinerung der Phasenverschiebung im Erregerstromkreis geboten.

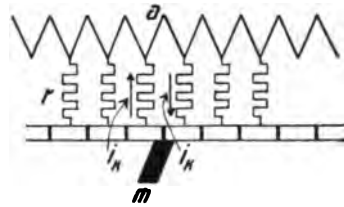


Fig. 50.

Schließlich möge noch auf ein Mittel zur Verbesserung der Stromwendung hingewiesen werden, das hin und wieder Verwendung findet, nämlich auf die Einschaltung von Widerständen zwischen Ankerwicklung und Kommutator nach Fig. 50. Hierdurch wird der in der Wicklungsabteilung  $a$  auftretende Kurzschlußstrom geschwächt und die Funkenbildung am Kommutator vermindert. Der Nachteil derartiger Anordnungen liegt auf der Hand: der Betriebsstrom muß auch durch die Widerstände  $r$  fließen, wodurch Verluste entstehen; die Ankerwicklung erhitzt sich ferner stark und die Lötstellen sind gefährdet. Auch können bei länger dauernden Überströmen die Widerstandsverbindungen durchbrennen. Diese Widerstände werden in den Wicklungsnuten untergebracht. Die Siemens-Schuckertwerke führen diese Widerstandsverbindungen nach einem Vorschlag von R. Richter so, daß der in ihnen fließende Strom stets das Drehmoment unterstützt. Durch diese Füh-

rung wird die Länge der Verbindungsleiter so groß, daß sie aus Kupferdrähten hergestellt werden können, deren Widerstand genügt.

Wie im einzelnen bei den verschiedenen Motorengattungen die Schwierigkeiten der Stromwendung umgangen werden, wird in den folgenden Abschnitten gezeigt.

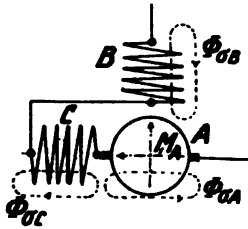


Fig. 51.

### 6. Der unmittelbar gespeiste Reihenschlußmotor.

1. Durch die Ausgleichswicklung *C* in Fig. 51 ist das Ankerfeld bis auf ein Streufeld aufgehoben, dessen Sitz hauptsächlich in den Stirnverbindungen der Ankerwicklung zu suchen ist und welches den Streufluß  $\Phi_{\sigma A}$  erzeugt. Ebenso erzeugt Wicklung *C* den Streufluß  $\Phi_{\sigma C}$  und der von *B* erzeugte Gesamtfluß zerlegt sich in den Drehmomentfluß  $\Phi_y$  und in den Streufluß  $\Phi_{\sigma B}$ .

Sämtliche Kraftflüsse sind mit  $i$  in gleicher Phase, wenn man von hysteretischen und Wirbelstromeinflüssen absieht. Es induziert

$$\Phi_y \text{ die EMK } E_{Ty} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} 2\pi \sim \cdot W_B 10^{-8} \text{ Volt in Wicklung } B$$

$$\Phi_{\sigma B} \text{ die EMK } E_{\sigma B} = \frac{\bar{\Phi}_{\sigma B}}{\sqrt{2}} 2\pi \sim \cdot W_B 10^{-8} \text{ Volt in Wicklung } B$$

$$\Phi_{\sigma C} \text{ die EMK } E_{\sigma C} = \frac{\bar{\Phi}_{\sigma C}}{\sqrt{2}} 2\pi \sim \cdot W_C 10^{-8} \text{ Volt in Wicklung } C$$

$$\Phi_{\sigma A} \text{ die EMK } E_{\sigma A} = \frac{\bar{\Phi}_{\sigma A}}{\sqrt{2}} \cdot \sim \cdot Z_A 10^{-8} \text{ Volt im Anker } A.$$

In diesen Ausdrücken ist  $W_B$  die Windungszahl der Spule *B*,  $W_C$  diejenige von *C* und  $Z_A$  ist die Stabzahl des Ankers.  $\sim$  ist die Zahl der sekundlichen Schwingungen.



Fig. 52.

Ferner wird durch Drehung in  $\Phi_y$  in den Ankerwicklungen die EMK

$$E_R = \frac{\Phi_y}{\sqrt{2}} \cdot \frac{n}{60} \cdot Z_A \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

induziert.

Während die vier zuerst genannten, durch ruhende Induktion erzeugten EMKe hinter dem Strome um  $90^\circ$  zurückbleiben, besitzt  $E_R$  eine Verschiebung von  $180^\circ$  gegenüber dem Strome. Die Klemmenspannung muß die Teilspannungen  $-E_{Ty}$ ,  $-E_{\sigma B}$ ,  $-E_{\sigma C}$ ,  $-E_{\sigma A}$ ,  $-E_R$  besitzen und außerdem den Anteil  $i \cdot r$  zur Bestreitung des Ohmschen Spannungsabfalles im ganzen Stromkreise. Dem entspricht das Vektordiagramm in Fig. 52, aus dem sich folgendes ergibt.

Es ist

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_{\sigma A} + E_{\sigma C} + E_{\sigma B} + E_{Ty}}{E_R + i \cdot r};$$

vernachlässigt man die an und für sich kleineren Streuspannungen und den Ohmschen Spannungsabfall, so erhält man die vereinfachte Gleichung

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_{T_V}}{E_R} = \frac{\bar{\Phi}_V \cdot 2\pi \sim W_B 10^{-8}}{\bar{\Phi}_V \frac{n}{60} Z_A 10^{-8}} = 2\pi \cdot 60 \cdot \frac{\sim}{n} \cdot \frac{W_B}{Z_A}.$$

Diese Gleichung lehrt, daß  $W_B$  klein gegen  $Z_A$  sein soll, d. h. also: Geringe Zahl von Erregerwindungen bei großer Zahl der Ankerleiter verringert die Phasenverschiebung. Man wählt daher die Zahl der Amperewindungen des Ankers 3 bis 4 mal so groß als die des Feldes, oder die Stabzahl des Ankers 6 bis 8 mal so groß. Um  $W_B$  möglichst klein halten zu können, muß der magnetische Widerstand möglichst herabgesetzt werden, was in erster Linie durch Verkleinerung des Luftspaltes erreicht wird. Ebenso wird  $\varphi$  bei gegebenem  $n$  um so kleiner, je kleiner die Zahl der sekundlichen Schwingungen ist. Die Gleichung lehrt ferner, daß  $\varphi$  nur dann gleich Null werden kann, wenn  $n = \infty$  ist.

Würde nach obiger Gleichung ein Reihenschlußmotor bei  $\sim = 25$  mit  $n = 3000$  Umdrehungen pro Minute laufen, so wäre bei  $\frac{W_B}{Z_A} = 8$

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,3925$$

$$\varphi = \text{rd } 21,5^\circ.$$

Die Phasenverschiebung wird verringert durch die Kupfer- und Eisenverluste im Motor, also auf Kosten des Wirkungsgrades.

Da der Drehmomentfluß  $\Phi_V$  mit  $i_2$  in gleicher Phase ist, ist

$$D = C \cdot \frac{\bar{\Phi}_V}{\sqrt{2}} \cdot i_2 \cos 0^\circ$$

$$D = C_1 \cdot i_2^2.$$

Unter Vernachlässigung von  $i \cdot r$  ist

$$e \cos \varphi = \frac{\bar{\Phi}_V n}{\sqrt{2} 60} Z_A 10^{-8}$$

$$n = 60 \sqrt{\left( \frac{e \sqrt{2} 10^{-8}}{\bar{\Phi}_V \cdot Z_A} \right)^2 - \left( 2\pi \sim \frac{W_B}{Z_A} \right)^2}.$$

Mit wachsendem Drehmoment  $D$  nimmt  $i$  und  $\Phi_V$  zu, daher nimmt  $n$  mit wachsender Belastung ab.

Bei Synchronismus  $\left( \frac{n}{60} = \sim \right)$  ist  $E_{T_V} = E_R$ , also

$$\operatorname{tg} \varphi = 1$$

$$\varphi = 45^\circ$$

Bei Stillstand ist  $e = E_{T_V}$  und  $\varphi = 90^\circ$ .

Die mechanische Leistung des Motors ergibt sich aus der Gleichung

$$A_2 = \frac{E_R \cdot i_2}{736} \text{ PS.}$$

Die magnetomotorische Kraft  $M'_W$  der Wendepolwicklung ergibt sich an Hand der Fig. 53; deren Anteile —  $M'_2$  und  $M'_\sigma$  sind von der Geschwindigkeit unabhängig, während  $M_K$  um so kleiner sein muß, je größer die Geschwindigkeit ist.

Die gesamte MMK dieser Wicklung, also  $M'_W$  kann demnach nur für eine bestimmte Geschwindigkeit eingestellt werden. Diese Einstellung kann auf verschiedene Arten erreicht werden, die im folgenden kurz erläutert werden sollen.

1. Parallelschaltung eines Ohmschen Widerstandes zur Wendepolwicklung. Schaltet man nach dem Vorschlag von Behn-Eschenburg gemäß Fig. 54 einen Widerstand  $\rho$  parallel zur Wendepolwicklung, so erzeugt die Klemmenspannung  $e_W$  in der Wicklung den Strom  $i_W$ , der beinahe um  $90^\circ$  hinter  $e_W$  zurückbleibt, während der Strom  $i_\rho$  in  $\rho$  mit  $e_W$  in Phase ist. Der Gesamtstrom  $i_2$  durchfließt dann Anker  $A$  und Ausgleichwicklung  $C$ . Der Strom  $i_W$  erzeugt die MMK

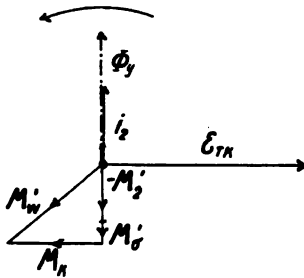


Fig. 53.

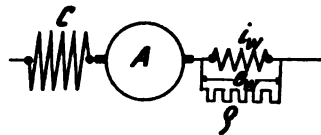


Fig. 54a.

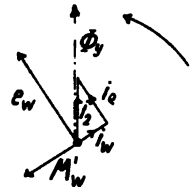


Fig. 54b.

der Wendepolwicklung  $M'_W$ , deren Richtung je nach dem Windungssinn in Phase mit  $i_W$  oder um  $180^\circ$  gegen  $i_W$  versetzt ist. Die letztere Lage ist die gewünschte. Durch Veränderung von  $\rho$  kann die Einstellung für verschiedene Geschwindigkeiten geschaffen werden.

2. Parallelschaltung der Wendepolwicklung zum Motor.

Schaltet man nach Fig. 55 die Wendepolwicklung  $W$  parallel zum Motor, so entsteht in  $W$  ein Strom  $i_W$ , der fast um  $90^\circ$  hinter  $e$  zurückbleibt. (Das Diagramm ist durch Vernachlässigung der Streuspannungen und Ohmschen

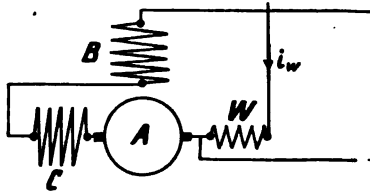


Fig. 55a.

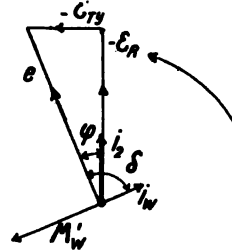


Fig. 55b.

Spannungsverluste vereinfacht.) Es kann eine geeignete Lage und Größe von  $i_W$  gefunden werden, um den passenden Wert von  $M'_W$  zu erzeugen.

3. Diesen beiden Wendepolschaltungen haftet der Übelstand an, daß man die beiden Anteile

der magnetomotorischen Kraft  $M'_W$  nicht unabhängig voneinander regeln und einstellen kann. Es erscheint daher zweckmäßig, die Hauptschluß- und Nebenschlußerregung der Wendepole gleichzeitig zu verwenden, wobei zu beachten ist, daß die Hauptstromwicklung  $W_h$  stets den in Richtung des Stromes  $i_2$  liegenden Anteil —  $M'_2$  und  $M'_\sigma$ , dagegen die Nebenschlußwicklung  $W_n$  den um  $90^\circ$  gegen  $i_2$  versetzten Anteil  $M'_K$  liefert.

Eine derartige Schaltung zeigt Fig. 56, deren Diagramm sich nach Fig. 57 folgendermaßen gestaltet. Es sei  $og$  die gewünschte Größe von  $M'_w$ ; dann sind die beiden Anteile  $od$  und  $oc$  zu erzeugen. Der Kraftfluß  $\Phi_w$  des Wendepols hat die Phase von  $of$ , so daß unter Vernachlässigung der Spannungsverluste

an  $W_n$  die um  $90^\circ$  voreilende Klemmenspannung  $oa = \frac{\overline{\Phi_w}}{\sqrt{2}} 2\pi \sim W_n \cdot 10^{-8}$

Volt herrschen muß. Die vorgeschaltete Drosselspule besitzt eine Induktivität  $\lambda$  und erzeugt einen Kraftfluß, der zu dem Strom  $od$  im Nebenschlußkreise in festem Verhältnis steht. An der Drosselspule muß also eine Spannung  $ab$  von der Größe  $i_n \cdot 2\pi \sim \lambda$  Volt herrschen, die dem Strome  $i_n$  um  $90^\circ$  voreilt. Die geometrische Summe von  $oa$  und  $ab$  muß gleich der Klemmenspannung  $ob$  des Motors sein, die dem Hauptstrom um  $\varphi^0$  voraussieht. Wäre die Drosselspule nicht vorhanden, so würde die magnetomotorische Kraft  $oc$  von  $W_h$ , die sich mit der Belastung ändert, durch Transformatorwirkung den Nebenschlußstromkreis zwingen, einen zur Vernichtung von  $oc$  dienenden Stromanteil aufzunehmen. —

Man kann mit einer einzigen Wendepolwicklung auskommen, wenn man

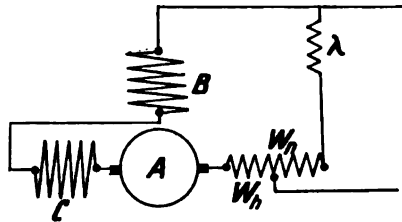


Fig. 56.

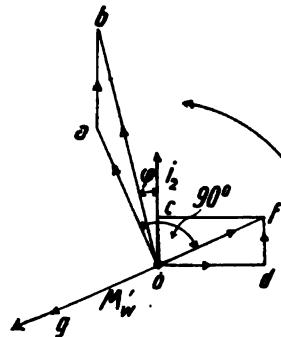


Fig. 57.

die in Fig. 58 dargestellte Schaltung verwendet;  $T$  ist ein von der Klemmenspannung  $e$  gespeister Transformator, dessen Sekundärwicklung an den Klemmen von  $W$  liegt. Die Wendepolwicklung  $W$  wird dabei von einem Gesamtstrom durchflossen, der sich aus dem Hauptstrom- und Nebenschlußstromanteil zusammensetzt.

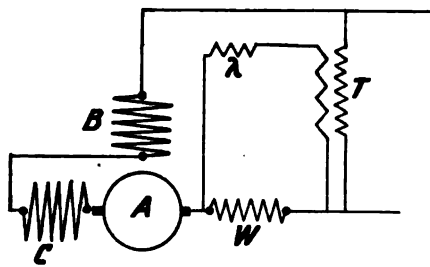


Fig. 58.

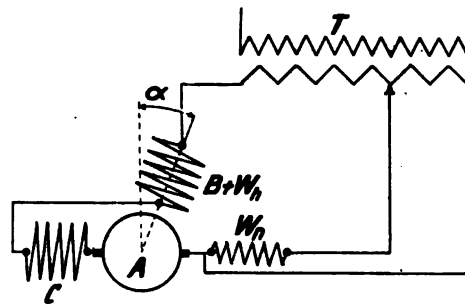


Fig. 59.

Eine Vereinfachung dieser Schaltung stellt die Verwendung eines Spartransformators  $T$  dar; durch Änderung des Übersetzungsverhältnisses kann der Nebenschlußanteil des Wendepolstromes in weitgehendem Maße geändert werden, wodurch eine vorzügliche Anpassung des Wendefeldes an die schwankenden Betriebsbedingungen ermöglicht wird. —

Die Verwendung von Drosselspulen oder Transformatoren im Nebenschlußkreise des Wendepolstromkreises stellt immerhin eine Verwicklung der Betriebseinrichtungen dar, deren Vermeidung erwünscht erscheint. Dies läßt sich, wie R. Richter gezeigt hat, erreichen, wenn man Hauptstrom- und Nebenschlußwicklung des Wendepolkreises so anordnet, daß eine gegenseitige transformatorische Wirkung vermieden wird.

Die Erregerwicklung  $B$  ist mit  $W_h$  vereinigt, so daß die magnetische Achse dieser gemeinsamen Wicklung nach Fig. 59 um  $\alpha^0$  gegen die  $y$ -Achse geneigt ist. Die Bürsten stehen daher in einem Hauptstrom-Wendekraftfluß von der Größe  $\Phi_y \cdot \sin \alpha$ . In der  $x$ -Achse kann nur das durch  $W_n$  erzeugte Nebenschlußfeld entstehen, da die magnetisierende Wirkung von  $A$  durch  $C$  aufgehoben ist. Wenn die Wicklungen  $B + W_h$  und  $W_n$  als verteilte Wicklungen ausgeführt werden, so wird die transformatorische Verkettung dieser beiden Wicklungen fast vollständig vermieden, so daß also der Kraftfluß, den  $W_n$  zu erzeugen hat, unabhängig vom Hauptkraftfluß ist.

Das Schaltbild zeigt, wie  $W_n$  von einer passenden Stelle der Sekundärwicklung des Haupttransformators  $T$ , der im Bahnbetrieb stets vorhanden ist, weil die Hochspannung auf die Betriebsspannung des Motors herabgesetzt werden muß, abgezweigt wird.

### 7. Der induktiv gespeiste Reihenschlußmotor mit Ständererregung in der Schaltung von Atkinson.

Nach Fig. 60 ist der kurzgeschlossene Anker  $A$  die Sekundärwicklung eines Transformators mit der primären Wicklung  $C$ . Beide Wicklungen sind durch den Kraftfluß  $\Phi_x$  verkettet. Die beiden Ankerhälften sind parallelgeschaltet und in jedem der beiden Zweige entsteht eine Spannung

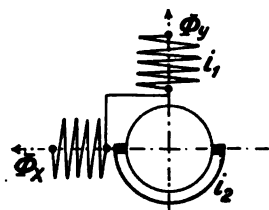


Fig. 60.

$$E_{Tx_2} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \cdot \sim \cdot Z_A 10^{-8} \text{ Volt.}$$

( $Z_A$  = Gesamtzahl der Stäbe auf dem Ankerumfang.)

Zunächst möge nun der Anker stillstehen; dann ergibt sich ein Diagramm nach Fig. 61. Der Strom  $i_2$  ist wegen der Ankerstreuung gegenüber  $E_{Tx_2}$  verschoben und der Strom  $i_1$  setzt sich zusammen aus dem auf die primäre Windungszahl der Spule  $C$  bezogenen Strome  $i_2$  und dem Magnetisierungsstrome  $i_M$ ;  $i_2$  ist gegen  $i_1$  um fast  $180^0$  verschoben, und da die Windungszahl des Ankers gleich derjenigen der Wicklung  $C$  ist, ist  $i_2$  fast genau gleich  $i_1$ . Der Strom  $i_1$  erzeugt nun in Wicklung  $B$  den Drehmomentfluß  $\Phi_y$ , der mit  $i_1$  in gleicher Phase ist. Wenn  $\psi$  der von  $i_2$  und  $i_1$  resp.  $\Phi_y$  eingeschlossene Winkel ist, so lautet die Drehmomentgleichung

$$D = c \cdot \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot i_2 \cdot \cos \psi,$$

oder, da  $\psi \cong 180^0$  ist,

$$D = c \cdot \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot i_2.$$

Die Drehmomentbildung ist also bei Anlauf sehr günstig. Der Anker läuft in der Uhrzeigerichtung an. Zur Ermittlung der Drehrichtung ist folgendes zu bemerken.

Gemäß dem Diagramm Fig. 61 für den stillstehenden Motor ist  $i_2$  um mehr als  $90^0$  gegen  $\Phi_x$  versetzt, d. h.  $i_2$  und  $\Phi_x$  sind „im wesentlichen“ entgegengerichtet. Bezeichnet man nun die  $\rightarrow$ -Richtung von  $\Phi_x$  als die



positive, so ist dieser Kraftflußrichtung die in Fig. 62 dargestellte Stromrichtung im Anker zugeordnet.

Wäre die Phasenverschiebung zwischen  $\Phi_v$  und  $i_2$  kleiner als  $90^\circ$ , so wären beide Vektoren „im wesentlichen“ in gleicher Phase und dem würde die Darstellung nach Fig. 63 entsprechen, die sich aus der bekannten Korkzieherregel ergibt.

Nennt man ferner die  $\uparrow$ -Richtung von  $\Phi_v$  die positive und bedenkt man, daß nach dem Stillstandsdiagramm Fig. 61  $\Phi_v$  und  $\Phi_x$  „im wesentlichen“ in gleicher Phase sind, so erscheint die positive Richtung beider Kraftflüsse „gleichzeitig“ und daraus folgt für Fig. 62 entsprechend dem Stillstandsdiagramm eine Drehung des Ankers in der Uhrzeigerrichtung, während sich nach Fig. 63 der Anker gegen die Uhrzeigerrichtung dreht.

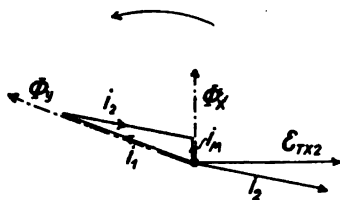


Fig. 61.

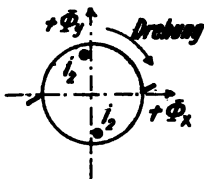


Fig. 62.

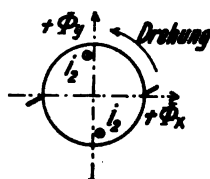


Fig. 63.

Die bei dieser Drehung in den Ankerwindungen induzierte EMK hat gemäß der Rechte-Hand-Regel in beiden Fällen die dem Strome  $i_2$  entgegengesetzte Richtung; sie muß daher im ersten Falle nach Fig. 62 in gleicher Phase mit  $\Phi_v$  liegen, während sie im zweiten Falle nach Fig. 63 gegen  $\Phi_v$  um  $180^\circ$  verschoben ist.

Die durch Drehung in  $\Phi_v$  entstandene EMK hat die Größe

$$E_{Rv} = \frac{\overline{\Phi_v}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{n}{60} \cdot Z_A \cdot 10^{-8},$$

und ist mit  $\Phi_v$ , also mit  $i_1$  in gleicher Phase. Bei Berücksichtigung der ohmschen und induktiven Spannungsabfälle im Anker kommt man zu dem in Fig. 64 darge-

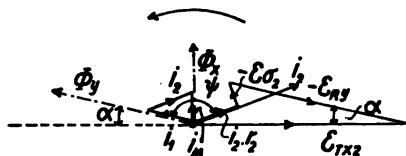


Fig. 64.

gestellten Diagramm;  $E_{Tx2}$  hält den Spannungsabfällen  $i_2 r_2$  und  $-E_{\sigma 2}$ , ferner  $-E_{Rv}$  das Gleichgewicht. Der Anker läuft in der Uhrzeigerrichtung mit der minutlichen Drehzahl

$$n = \frac{60 \cdot E_{Rv} \cdot \sqrt{2}}{\overline{\Phi_v} \cdot Z_A} \cdot 10^8$$

um, entwickelt das Drehmoment

$$D = c \cdot \frac{\overline{\Phi_v}}{\sqrt{2}} \cdot i_2 \cos \psi$$

und erzeugt eine mechanische Leistung

$$A_2 = E_{Rv} \cdot i_2 \cos \psi.$$

Vernachlässigt man die Spannungsabfälle im Anker und den Magnetisierungsstrom  $i_M$ , der im allgemeinen gegen  $i_2$  sehr klein sein wird, so erhält

man das vereinfachte Diagramm der Fig. 65. Mit  $E_{Tx_2}$  in gleicher Phase ist  $i_2$  und es ist unter allen Betriebsbedingungen  $E_{Tx_2} = -E_{Ry}$ . Der Strom  $i_1$  eilt  $i_2$  um  $180^\circ$  voraus, so daß  $\Phi_y$  mit  $\Phi_x$  einen rechten Winkel einschließt. Die Kraftflüsse  $\Phi_y$  und  $\Phi_x$  sind im allgemeinen voneinander verschieden; sie sind räumlich und zeitlich um  $90^\circ$  versetzt und bilden ein elliptisches Drehfeld aus, das mit der Geschwindigkeit  $\sim$  in der Sekunde umläuft, während der Anker mit  $\frac{n}{60}$  Umdrehungen arbeitet.

Da  $E_{Tx_2} = E_{Ry}$  ist, folgt, daß

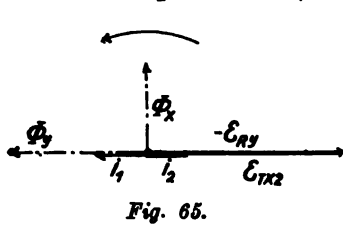


Fig. 65.

$$\frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \cdot \sim Z_2 10^{-8} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot \frac{n}{60} Z_2 \cdot 10^{-8}$$

ist. Setzt man  $\frac{n}{60 \cdot \sim} = v$ , so ist  $\frac{n}{60} = \sim \cdot v$

und

$$\frac{\bar{\Phi}_x}{\bar{\Phi}_y} = v.$$

Für  $v = 1$ , d. h. also, wenn die sekundliche Drehzahl  $\frac{n}{60}$  des Ankers gleich der Wellenzahl  $\sim$  ist, wenn also der Anker synchron mit dem Drehfeld läuft, ist

$$\bar{\Phi}_y = \bar{\Phi}_x.$$

Bei Synchronismus bildet sich also ein kreisförmiges Drehfeld aus mit dem gleichbleibenden Wert  $\bar{\Phi}_y$  resp.  $\bar{\Phi}_x$ . Diese Tatsache ist wichtig für die spätere Beurteilung der Stromwendung.

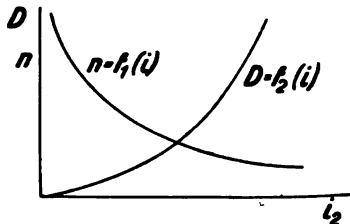


Fig. 66.

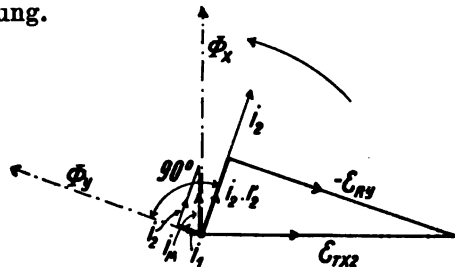


Fig. 67.

Das Betriebsverhalten des Motors ergibt sich aus folgendem. Da  $\Phi_y$  sich stets wie  $i_1$  ändert, und da ferner  $i_2$  ohne wesentlichen Fehler gleich  $i_1$  gesetzt werden kann, wird

$$D = c \cdot \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot i_2 = c_1 \cdot i_1^2.$$

Des weiteren ist

$$n = \frac{60 \cdot E_{Ry} \cdot \sqrt{2}}{\bar{\Phi}_y Z_2} 10^8 = c_2 \cdot \frac{E_{Ry}}{i_1}.$$

Diese letzte Gleichung zeigt, daß für  $D = 0$  entsprechend  $i_1 = 0$  die Drehzahl  $n$  unendlich groß ist. Mit wachsendem  $i_1$  nimmt  $n$  ab. Die zeichnerische Darstellung der Abhängigkeit  $n = f_1(i)$  und  $D = f_2(i)$  ergibt nach Fig. 66 die das Reihenschlußverhalten dieses Motors kennzeichnenden Schaulinien.

Gegenüber dem unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotor ist indessen folgender Unterschied festzustellen, der sich ergibt, wenn man dem Spannungsverluste im Anker Rechnung trägt. Um das Diagramm möglichst einfach zu gestalten, ist in Fig. 67 nur der Ohmsche Spannungsverbrauch  $i_2 r_2$  berücksichtigt. Es ist der Fall denkbar, daß die Teilspannung  $-E_{R2}$  mit  $i_2$  einen rechten Winkel einschließt; dann steht auch  $i_1$  resp.  $\Phi_y$  senkrecht auf  $i_2$ . Für diesen Fall ist

$$D = c \cdot \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot i_2 \cos 90^\circ = 0$$

$$A_2 = E_{R2} \cdot i_2 \cos \psi = 0,$$

d. h. also, der dargestellte Betriebszustand entspricht dem Leerlauf mit der endlichen Drehzahl  $n = \frac{60 E_{R2} \cdot \sqrt{2}}{\bar{\Phi}_y \cdot z_2} 10^{-8}$ .

Während also beim unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotor die Drehzahl bei reinem Leerlauf unendlich groß ist, nimmt sie bei dem Atkinson-

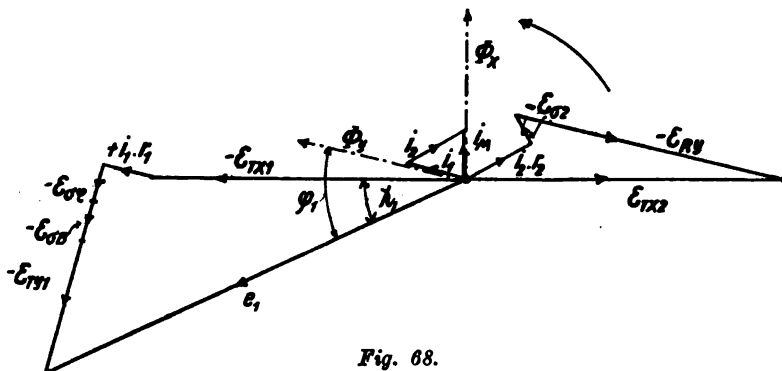


Fig. 68.

Motor einen um so geringeren Wert an, je größer der Ankerwiderstand  $r_2$  ist. Da man aber aus wirtschaftlichen Gründen  $r_2$  stets möglichst klein halten wird, weicht der Verlauf der  $n$ -Linie bei beiden Motoren nur sehr wenig voneinander ab. Das Spannungsdiagramm für die Ständerwicklungen ist in Fig. 68 gegeben.

Der Kraftfluß  $\Phi_x$  induziert in der Wicklung  $C$  die EMK

$$E_{Tx1} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \cdot 2 \pi \sim \cdot W_C \cdot 10^{-8} \text{ Volt, } \Phi_x \text{ um } 90^\circ \text{ nacheilend;}$$

der Streufluß  $\Phi_{\sigma C}$  induziert in  $C$  die EMK

$$E_{\sigma C} = \frac{\bar{\Phi}_{\sigma C}}{\sqrt{2}} \cdot 2 \pi \sim \cdot W_C \cdot 10^{-8} \text{ Volt, } i_1 \text{ um } 90^\circ \text{ nacheilend;}$$

der Kraftfluß  $\bar{\Phi}_y$  erzeugt in  $B$  eine EMK

$$E_{Ty1} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot 2 \pi \sim \cdot W_B \cdot 10^{-8} \text{ Volt, } i_1 \text{ resp. } \Phi_y \text{ um } 90^\circ \text{ nacheilend;}$$

der Streufluß  $\Phi_{\sigma B}$  induziert in  $B$  die EMK

$$E_{\sigma B} = \frac{\bar{\Phi}_{\sigma B}}{\sqrt{2}} \cdot 2 \pi \sim \cdot W_B \cdot 10^{-8} \text{ Volt, } i_1 \text{ um } 90^\circ \text{ nacheilend.}$$

Die primäre Klemmenspannung  $e$  muß also die Teilspannungen  $+i_1 r_1$ ,  $-E_{Tx1}$ ,  $-E_{oC}$ ,  $-E_{Tv1}$ ,  $-E_{oB}$  enthalten; sie eilt dem Strome  $i_1$  um  $\varphi_1^0$  voraus.

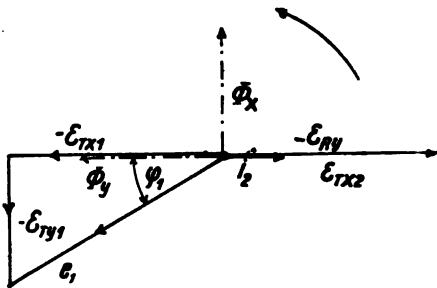


Fig. 69.

Vernachlässigt man wieder sämtliche Spannungsabfälle infolge Ohmschen Widerstandes und infolge Streuung, sowohl primär, wie sekundär, so ergibt sich das vereinfachte Diagramm gemäß Fig. 69, nach welchem  $\text{tg } \varphi_1 = \frac{E_{Tv1}}{E_{Tx1}}$  ist. Besitzt der Transformator C—A das Übersetzungsverhältnis 1, so ist  $E_{Tx1} = E_{Tx2} = E_{Rv}$  und es ist

$$\text{tg } \varphi_1 = \frac{E_{Tv1}}{E_{Rv}} = \frac{\bar{\Phi}_y 2\pi \sim W_B 10^{-8} \cdot \sqrt{2} 60}{\sqrt{2} \bar{\Phi}_y n Z_A 10^{-8}} = 2\pi \cdot 60 \cdot \frac{\sim}{n} \cdot \frac{W_B}{Z_A}.$$

Dieser Ausdruck ist mit dem für den unmittelbar gespeisten Motor gefundenen gleichlautend. Die Phasenverschiebung nimmt also mit abnehmendem Werte von  $n$ , d. h. mit zunehmender Belastung, zu.

### 8. Der induktiv gespeiste Reihenschlußmotor mit Läufererregung (Repulsionsmotor nach Arnold).

Wenn man in Fig. 31 die Ständerwicklungen C und B des Atkinson'schen Repulsionsmotors durch eine einzige Wicklung ersetzt, so stehen die kurzgeschlossenen Bürsten des Ankers in einer Linie, die gegen die magnetische Achse der Ständerwicklung um einen Winkel  $\alpha < 90^\circ$  verschoben ist. Durch

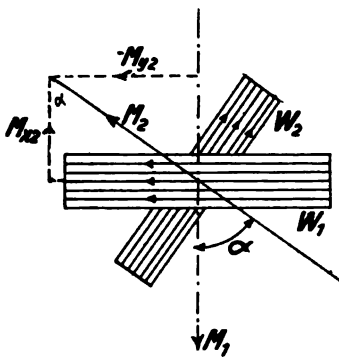


Fig. 70.

die Vereinigung der beiden Ständerwicklungen wird indessen die Wirkungsweise des Motors gegenüber derjenigen des Atkinson-Motors wesentlich geändert; denn es wird jetzt, wie die nachfolgenden Betrachtungen ergeben werden, der Drehmomentfluß  $\Phi_y$  durch die vom Transformatorfluß  $\Phi_x$  induzierten Ankerströme  $i_2$  erzeugt, mit welchen  $\Phi_y$  in gleicher Phase ist, während beim Atkinson-Motor  $\Phi_y$  von dem mit ihm gleichphasigen Ständerstrom  $i_1$  erzeugt wird.

Die induktiven Vorgänge im Anker eines derartigen Motors sind die gleichen, wie in einem Transformator mit drehbarer Sekundärspule, wie er in der Form des sog. Induktionsreglers bekannt ist. Es sei nach Fig. 70  $W_1$  die primäre und  $W_2$  die sekundäre Wicklung eines Transformators, deren magnetische Achsen  $M_1$  und  $M_2$  um den Winkel  $\alpha$  versetzt sind und die gleiche Windungszahlen besitzen. Fließt durch  $W_1$  ein Wechselstrom  $i_1$ , so entsteht induktiv in  $W_2$  ein Wechselstrom  $i_2$ . Die MMK  $M_2$  zerlegt sich nun in die beiden Anteile

$$\begin{aligned} M_{x2} &= M_2 \cos \alpha \\ M_{y2} &= M_2 \sin \alpha. \end{aligned}$$

Von diesen verkettet sich  $M_{x2}$  mit  $M_1$  zu  $M_R$ , welche den Transformatorfluß  $\Phi_x$  erzeugt, während  $M_{y2}$  den Drehmomentfluß  $\Phi_y$  erzeugt. Eine Verkettung von  $M_{y2}$  mit  $M_1$  ist unmöglich, da beide senkrecht aufeinander stehen.

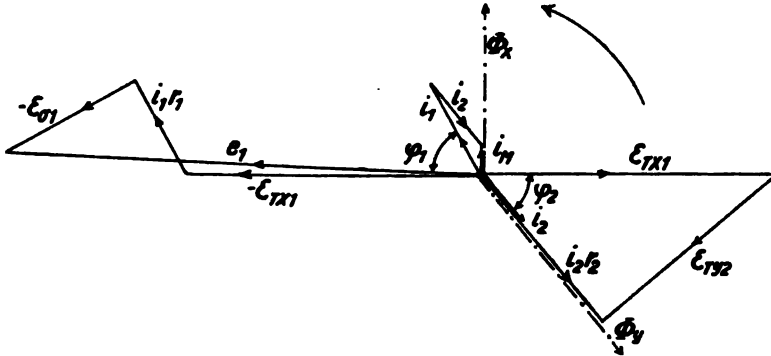


Fig. 71.

Hieraus ergibt sich nun die Lage der Spannungsvektoren, der Strom- und Feldvektoren folgendermaßen (vgl. Fig. 71).

Der Transformatorfluß  $\Phi_x$  induziert in der Spule  $W_2$  die EMK

$$E_{Tx2} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi \sim W_2 \cos \alpha \cdot 10^{-8}$$

und in  $W_1$  die EMK

$$E_{Tx1} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} 2\pi \sim W_1 \cdot 10^{-8}.$$

$\Phi_x$  ist in gleicher Phase mit dem Magnetisierungsstrom  $i_M$ , der sich aus  $i_1$  und  $i_2 \cos \alpha$  zusammensetzt.

Durch  $\Phi_y$  wird

$$E_{Ty2} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} 2\pi \sim W_2 \sin \alpha \cdot 10^{-8}$$

induziert. Die Resultierende aus  $E_{Tx2}$  und  $E_{Ty2}$  ist  $i_2 r_2$ . Die primäre Klemmenspannung besitzt die Teilspannungen  $-E_{Tx1}$ ,  $+i_1 r_1$ ,  $-E_{\sigma 1}$  und sie schließt mit  $i_1$  den Winkel  $\varphi_1$  ein. Bei dem Übersetzungsverhältnis 1 ist ferner  $i_1 = i_2 \cos \alpha$ . Es ist

$$\begin{aligned} a_1 &= e_1 \cdot i_1 \cos \varphi_1 \\ a_2 &= E_{Tx2} \cdot i_2 \cos \varphi_2; \end{aligned}$$

vernachlässigt man  $i_1 r_1$  und  $E_{\sigma 1}$  gegenüber  $E_{Tx1}$ , so muß

$$E_{Tx1} \cdot i_1 \cos \varphi_1 = E_{Tx2} \cdot i_2 \cdot \cos \varphi_2$$

sein; das ist auch der Fall, da  $E_{Tx2} = E_{Tx1} \cdot \cos \alpha$  und  $i_1 = i_2 \cos \alpha$  ist.

Die drehbare Sekundärspule entwickelt ein Gesamtdrehmoment  $D$ , das sich aus den Anteilen  $D_y$  und  $D_x$  zusammensetzt; dabei ist

$$\begin{aligned} D_x &= c \cdot \Phi_x \cdot i_2 \cos (90 + \varphi_2) \cdot \sin \alpha \\ D_y &= c \cdot \Phi_y \cdot i_2 \cos \alpha. \end{aligned}$$

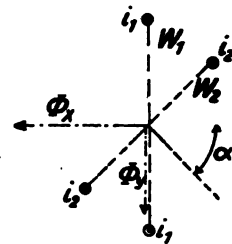


Fig. 72.

Wie Fig. 72 zeigt, wirken beide Drehmomente in der Uhrzeigerichtung ( $\Phi_y$  liegt mit  $M_2$  wesentlich in gleicher Richtung, während  $\Phi_x$  wesentlich  $M_2$  entgegengerichtet ist). Es ist also

$$D = c \cdot i_2 [\Phi_x \cos (90 + \varphi_2) \cdot \sin \alpha + \Phi_y \cos \alpha].$$

Im allgemeinen wird nun bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung  $i_2 r_2$  sehr klein sein, so daß  $\varphi_2$  nur unwesentlich von  $90^\circ$  abweicht. Dann gilt angenähert die Gleichung

$$D = c \cdot i_2 (\Phi_x \sin \alpha + \Phi_y \cos \alpha).$$

Aus dem Spannungsdiagramm folgt weiter:

$$\sin \varphi_2 = \frac{E_{T_{V_2}}}{E_{T_{x_2}}} = \frac{\Phi_y \sin \alpha}{\Phi_x \cos \alpha} = \frac{\Phi_y}{\Phi_x} \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Für  $\varphi_2 \cong 90^\circ$  wird  $\Phi_x = \Phi_y \cdot \operatorname{tg} \alpha$ .

Es ist also

$$D \cong c \cdot i_2 (\Phi_x \sin \alpha + \Phi_x \cotg \alpha \cos \alpha) = c \cdot i_2 \Phi_x \left( \sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right).$$

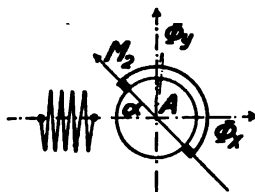


Fig. 73.

$D$  ist sowohl für  $\alpha = 90^\circ$ , als auch für  $\alpha = 0^\circ$  gleich Null, denn für  $\alpha = 90^\circ$  wird überhaupt kein sekundärer Strom erzeugt und für  $\alpha = 0$  ist unter den vorliegenden vereinfachenden Annahmen  $\Phi_x = 0$ .

Überträgt man nun diese Ergebnisse auf den in Fig. 73 skizzierten Motor, so erhält man folgende im Anker  $A$  induzierten EMKe

$\Phi_x$  induziert transformatorisch

$$E_{T_{x_2}} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \sim Z_2 10^{-8} \cdot \cos \alpha, \text{ um } 90^\circ \text{ hinter } \Phi_x \text{ bleibend.}$$

$\Phi_x$  induziert durch Drehung

$$E_{R_{x_2}} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \frac{n}{60} Z_2 10^{-8} \cdot \sin \alpha, \text{ in Phase mit } \Phi_x.$$

$\Phi_y$  induziert transformatorisch

$$E_{T_{y_2}} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \sim Z_2 10^{-8} \sin \alpha, \text{ um } 90^\circ \text{ hinter } \Phi_y \text{ bleibend.}$$

$\Phi_y$  induziert durch Drehung

$$E_{R_{y_2}} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot \frac{n}{60} Z_2 10^{-8} \cos \alpha, \text{ um } 180^\circ \text{ gegen } \Phi_y \text{ versetzt.}$$

Nach Fig. 74 ist  $i_2 r_2$  die Schlußlinie zu allen diesen Spannungsgrößen. Die Eckpunkte  $B$  und  $C$  müssen auf dem über der Hilfslinie  $O A$  beschriebenen Halbkreis liegen und es ist unter Vernachlässigung von  $i_2 r_2$

$$\sqrt{E_{T_{y_2}}^2 + E_{R_{y_2}}^2} = \sqrt{E_{T_{x_2}}^2 + E_{R_{x_2}}^2}.$$

Setzt man  $\frac{n}{60 \cdot \sim} = v$ , so erhält man

$$\frac{\Phi_y}{\Phi_x} \sqrt{\frac{\sim^2 \cos^2 \alpha + \sim^2 v^2 \sin^2 \alpha}{\sim^2 \sin^2 \alpha + \sim^2 v^2 \cos^2 \alpha}} = \sqrt{\frac{1 + v^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg}^2 \alpha + v^2}};$$

für  $v = 0$  (Stillstand) ist genau wie beim Drehtransformator

$$\Phi_y = \Phi_x \cdot \cotg \alpha,$$

für  $v = 1$  (Synchronismus) wird  $\Phi_y = \Phi_x,$

d. h. es bildet sich ein kreisförmiges Drehfeld aus, das mit der Synchrongeschwindigkeit umläuft.

Der Strom  $i_2$  ist gegen  $E_{Tx_2}$  um  $\varphi_2^0$  verzögert; es ist

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \chi - \psi \\ \operatorname{tg} \varphi_2 &= \frac{\operatorname{tg} \chi - \operatorname{tg} \psi}{1 + \operatorname{tg} \chi \cdot \operatorname{tg} \psi} = \frac{\frac{E_{Tv_2}}{E_{Rv_2}} - \frac{E_{Rx_2}}{E_{Tx_2}}}{1 + \frac{E_{Tv_2}}{E_{Rv_2}} \cdot \frac{E_{Rx_2}}{E_{Tx_2}}} \\ \operatorname{tg} \varphi_2 &= \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \cdot \left( \frac{1}{v} - v \right). \end{aligned}$$

Für  $v = 0$  ist, wie beim Drehtransformator

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \infty, \quad \varphi_2 = 90^\circ;$$

für  $v = 1$  ist  $\varphi_2 = 0$ , d. h.  $E_{Rv_2}$  fällt in die Phase von  $E_{Tx_2}$ , so daß  $\Phi_y \perp \Phi_x$  steht; dabei muß dann  $E_{Rv_2} = E_{Tx_2}$  und  $E_{Rx_2} = E_{Tv_2}$  sein.

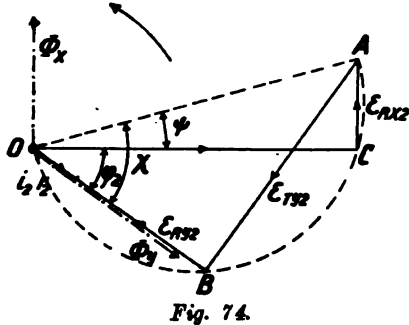


Fig. 74.

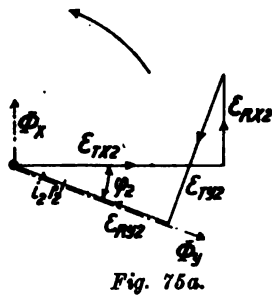


Fig. 75a.

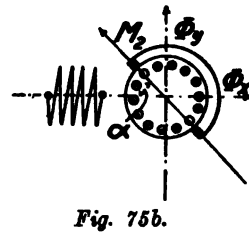


Fig. 75b.

Die mechanische Leistung und das Drehmoment ergeben sich folgendermaßen.

a) Untersynchronismus.  $\Phi_y > \Phi_x$  (vgl. Fig. 75a und b).

Der Vektor  $i_2$  schließt mit  $E_{Rv_2}$  einen Winkel von  $180^\circ$ , mit  $E_{Rx_2}$  einen Winkel  $90 + \varphi_2$  ein. Die mechanische Leistung  $A_2$  setzt sich aus den beiden Anteilen

$$\begin{aligned} A'_2 &= i_2 \cdot E_{Rv_2} \cdot \cos 180^\circ \\ A''_2 &= i_2 \cdot E_{Rx_2} \cdot \cos (90 + \varphi_2)^\circ \end{aligned}$$

zusammen; beide haben gleiches Vorzeichen, sind also zu summieren.

Ebenso summieren sich die beiden Drehmomente

$$\begin{aligned} D_y &= c \cdot \Phi_y \cdot i_2 \cos \alpha^\circ \text{ (rechts drehend),} \\ D_x &= c \cdot \Phi_x \cdot i_2 \sin \alpha \cdot \cos (90 + \varphi_2)^\circ \text{ (rechts drehend).} \end{aligned}$$

b) Synchronismus.  $\Phi_y = \Phi_x$  (vgl. Fig. 76).

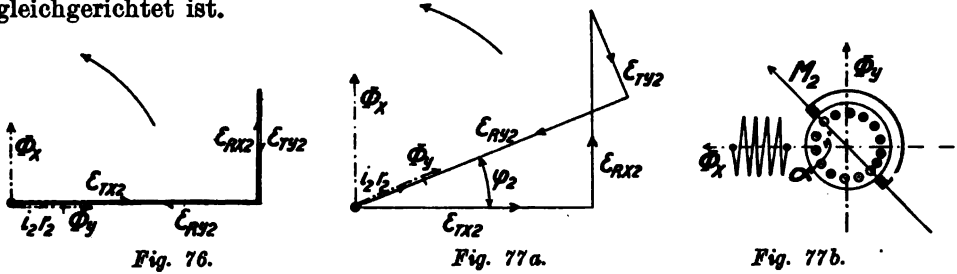
$$\begin{aligned} A'_2 &= i_2 \cdot E_{Rv_2} \cdot \cos 180^\circ = -i_2 E_{Rv_2} \\ A''_2 &= i_2 \cdot E_{Rx_2} \cdot \cos 90^\circ = 0 \\ D_y &= c \cdot \Phi_y \cdot i_2 \cos \alpha \text{ (rechtsdrehend)} \\ D_x &= c \cdot \Phi_x \cdot i_2 \sin \alpha \cdot \cos (90 + 0) = 0. \end{aligned}$$

c) Übersynchronismus.  $\Phi_y < \Phi_x$  (vgl. Fig. 77a und b).

Der Strom  $i_2$  eilt  $E_{Tx2}$  voraus; er schließt mit  $E_{Rv2}$  wieder den Winkel  $180^\circ$  ein, dagegen mit  $E_{Rx2}$  den spitzen Winkel  $90 - \varphi_2$ . Die Leistung  $A_2'$  wird jetzt negativ, so daß bei Übersynchronismus

$$A_2 = i_2 \cdot E_{Rv2} \cdot \cos 180^\circ - i_2 \cdot E_{Rx2} \cdot \cos 90 - \varphi_2$$

ist. Dementsprechend wird auch  $D_x$  negativ, da  $\Phi_x$  jetzt wesentlich mit  $i_2$  gleichgerichtet ist.



Es ist  $D_y = c \cdot \Phi_y \cdot i_2 \cos \alpha$  rechtsdrehend,  
 $D_x = c \cdot \Phi_x \cdot i_2 \sin \alpha \cdot \cos 90 - \varphi_2$  linksdrehend;  
 also  $D = c i_2 \cdot [\Phi_y \cos \alpha - \Phi_x \sin \alpha \cdot \cos (90 - \varphi_2)]$ .

Leerlauf ist vorhanden, wenn der Klammerausdruck den Wert Null erreicht, was nur möglich wird, wenn  $\varphi_2 = 90^\circ$  ist. Dann ist aber auch  $i_2 = 0$ .

Wenn aber  $\varphi_2 = 90^\circ$  ist, folgt aus der für Übersynchronismus gültigen Gleichung

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_2 &= \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \left( v - \frac{1}{v} \right) = \operatorname{tg} 90^\circ \\ \infty &= \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \left( v - \frac{1}{v} \right), \end{aligned}$$

daß für  $\varphi_2 = 90^\circ$  (Leerlauf)  $v = \infty$  sein muß.

Die das Reihenschlußverhalten des Motors kennzeichnenden Merkmale: unendlich große Drehzahl bei Leerlauf, dem Quadrate des Stromes  $i_2$  entsprechendes Drehmoment, Abhängigkeit des Drehmomentflusses  $\Phi_y$  vom Strome  $i_2$ , sind also vorhanden.

Der Primärstrom  $i_1$  und die Spannung  $e_1$  ergeben sich wieder genau wie beim Drehtransformator gemäß Fig. 78. Es ist

$$E_{Tx1} = \frac{\overline{\Phi_x}}{\sqrt{2}} 2 \pi \sim W_1 10^{-8} \text{ Volt}$$

und unter Vernachlässigung von  $i_M$  ist  $i_1 = i_2 \cos \alpha$ .

Bei Vernachlässigung von  $i_1 \cdot r_1$  und  $E_{\sigma 1}$  wäre  $\varphi_1 = \varphi_2$ , so daß also bei Stillstand  $\varphi_1 = 90^\circ$ , bei Synchronismus  $0^\circ$  und bei reinem Leerlauf wieder  $90^\circ$  wäre. Dabei würde bei Untersynchronismus  $i_1$  der Spannung  $e_1$  nacheilen, bei Übersynchronismus dagegen voreilen. Tatsächlich kann  $\varphi_1$  niemals zu



Null werden, weil  $\varphi_1$  stets um den durch  $i_1 r_1$  und  $E_{\sigma_1}$  bedingten Verschiebungswinkel größer ist als  $\varphi_2$ .

### 9. Der Repulsionsmotor mit 2 Bürstenpaaren (Déri-Motor).

Eine Verbesserung des Einfachbürstenmotors ist der Doppelbürstenmotor nach Déri (Dérischer Repulsionsmotor). Nach Fig. 79 bleiben die Bürsten  $a a'$  fest in der  $x$ -Achse stehen, während die beweglichen Bürsten  $b b'$  in den Grenzen  $\alpha = 0$  bis  $\alpha = 180^\circ$  verschoben werden können; dabei ist  $a$  mit  $b$  und  $a'$  mit  $b'$  kurzgeschlossen. Die Folge davon ist, daß nur die zwischen  $a b$  und  $a' b'$  liegenden Ankerdrähte Strom führen, also wirksam sind. Diese Zahl der wirksamen Ankerleiter  $Z'_2$  findet sich folgendermaßen.

Wenn die Leiter des in Fig. 80 dargestellten Ankers sämtlich von gleichem Strom durchflossen sind, so liegt die MMK in der Richtung  $a' a$  und hat die Größe  $M_2$ . Diese läßt sich unter beliebigem Winkel  $\beta$  zerlegen in die beiden Anteile  $M_2 \cos \beta$  und  $M_2 \sin \beta$ . Liegen nun die Bürsten des Déri-Motors in der Richtung  $a' b'$ , so kann bei unverändertem Strom in den Ankerdrähten nur die MMK  $M_2 \cos \beta$  entstehen oder mit anderen Worten: Die Zahl  $Z'_2$  der

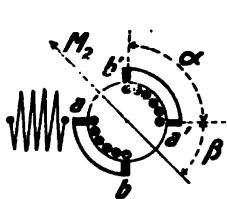


Fig. 79.

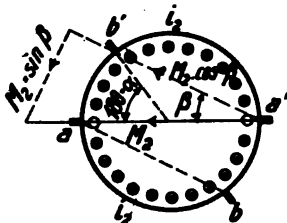


Fig. 80.

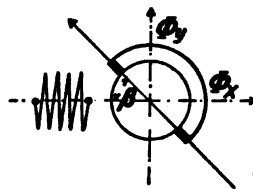


Fig. 81.

wirksamen Ankerleiter, also derjenigen, die zwischen  $a' b'$  und  $a b$  liegen, ist gleich  $Z_2 \cdot \cos \beta$ . Nun ergibt sich weiter, daß, wenn  $\alpha$  derjenige Zentrwinkel ist, der von den durch  $a'$  und  $b'$  gehenden Radien eingeschlossen wird,

$$\beta = 90 - \frac{\alpha}{2}$$

sein muß. Werden die Bürsten  $b b'$  also nach Fig. 79 z. B. um  $\alpha = 90^\circ$  aus der Nullage  $a a'$  verschoben, so ist der von der  $x$ -Achse und von  $M_2$  eingeschlossene Winkel  $\beta$  gleich  $45^\circ$  und es ist  $Z'_2 = Z_2 \cdot \cos \beta$ .

Man kann sich nun gemäß Fig. 81 den Anker des Déri-Motors ersetzt denken durch den Anker eines Zweibürsten-Repulsionsmotors, dessen Stabzahl  $Z'_2$  ist und dessen magnetische Achse um den Winkel  $\beta$  gegen die  $x$ -Achse geneigt ist. Es bilden sich dann wieder die beiden Kraftflüsse  $\Phi_x$  und  $\Phi_y$  aus, welche folgende EMKE induzieren:

$\Phi_x$  induziert transformatorisch

$$E_{Tx_2} = \frac{\Phi_x}{\sqrt{2}} \sim Z'_2 \cos \beta 10^{-8} \text{ Volt, um } 90^\circ \text{ hinter } \Phi_x \text{ bleibend,}$$

$\Phi_x$  induziert durch Drehung

$$E_{Rx_2} = \frac{\Phi_x}{\sqrt{2}} \frac{n}{60} Z'_2 \sin \beta 10^{-8} \text{ Volt, in Phase mit } \Phi_x,$$

$\Phi_y$  induziert transformatorisch

$$E_{T_{y2}} = \frac{\overline{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \sim Z'_2 \sin \beta 10^{-8} \text{ Volt, um } 90^\circ \text{ hinter } \Phi_y \text{ bleibend,}$$

$\Phi_y$  induziert durch Drehung

$$E_{R_{y2}} = \frac{\overline{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \frac{n}{60} Z'_2 \cos \beta 10^{-8} \text{ Volt, um } 180^\circ \text{ gegen } \Phi_y \text{ versetzt.}$$

Diese EMKE haben im Diagramm genau die gleiche Lage, wie es in Fig. 74 für den Einfachbürsten-Repulsionsmotor dargestellt wurde. Unter Vernachlässigung von  $i_2 r_2$  ergibt sich auch hier die Beziehung

$$\frac{\Phi_y}{\Phi_x} = \sqrt{\frac{1 + v^2 \operatorname{tg}^2 \beta}{\operatorname{tg}^2 \beta + v^2}} = \sqrt{\frac{1 + v^2 \operatorname{tg}^2 \left(90 - \frac{\alpha}{2}\right)}{\operatorname{tg}^2 \left(90 - \frac{\alpha}{2}\right) + v^2}}.$$

Bei Stillstand ist also  $\frac{\Phi_y}{\Phi_x} = \sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta}}$  resp.  $\Phi_y = \Phi_x \cdot \cotg \beta$ .

Bei Synchronismus ist  $\Phi_y = \Phi_x$  bei allen Werten von  $\beta$ .

Ist ferner  $\beta = 45^\circ$ , so sind bei allen Werten von  $v$  die Kraftflüsse  $\Phi_y$  und  $\Phi_x$  gleich.

Gemäß den früheren Ableitungen wird ferner

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta} \left( \frac{1}{v} - v \right) \text{ unter Synchronismus,}$$

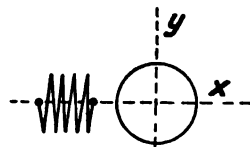


Fig. 82.

d. h. also, der Strom  $i_2$  eilt  $E_{T_{x2}}$  um  $\varphi_2^\circ$  nach.

Bei Synchronismus ist für alle Werte von  $\beta$ , also für alle Bürstenstellungen  $\varphi_2 = 0$ . Bei Synchronismus steht also  $\Phi_y$  senkrecht auf  $\Phi_x$  und da außerdem  $\Phi_y = \Phi_x$  ist, bildet sich bei Synchronismus ein symmetrisches, kreisförmiges Drehfeld aus, das mit dem Anker synchron umläuft.

Bei Übersynchronismus ist

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta} \left( v - \frac{1}{v} \right),$$

wobei der Strom  $i_2$  der EMK  $E_{T_{x2}}$  um  $\varphi_2^\circ$  vorausleitet.

Auch die Drehmomentenbildung entspricht vollkommen den Vorgängen im Einfachbürstenmotor. Auch hier besteht das gesamte Drehmoment aus den beiden Anteilen  $D_y$  und  $D_x$ , von denen  $D_y$  stets rechtsdrehend,  $D_x$  unter Synchronismus ebenfalls rechtsdrehend, bei Synchronismus gleich Null und über Synchronismus linksdrehend ist.

Die Vorzüge des Déri-Motors vor dem Einfachbürstenmotor ergeben sich aus folgenden Betrachtungen. Beim Einfachbürstenmotor gibt es zwei Bürstenstellungen, bei welchen das Drehmoment Null ist, nämlich wenn die Bürsten nach Fig. 82 entweder in der  $x$ -Achse oder in der  $y$ -Achse stehen. Die Stellung in der  $x$ -Achse ist indessen unzulässig, weil dadurch einfach der stillstehende Anker kurzgeschlossen wird, so daß übermäßige Ankerströme entstehen. Deshalb wird man beim Anlassen des Motors von der  $y$ -Stellung der Bürsten

ausgehen müssen. Zwar ist in dieser Anfangsstellung  $i_2 = 0$ , aber es entsteht in den unter den Bürsten liegenden Ankerspulen eine große Transformator-Kurzschlußspannung  $E_{TKx}$ , die einen Strom  $i_K$  erzeugt, welcher auf  $\Phi_x$  zurückwirkt und zu starker Funkenbildung bei Anlauf Veranlassung gibt. Dieser Übelstand wird beim Déri-Motor vermieden. Hier kann  $i_2$  nur dann verschwinden, wenn nach Fig. 83 einerseits die Bürsten  $a b$ , andererseits die Bürsten  $a' b'$  gleiche Lamellen überbrücken. In dieser Lage ist aber nur der Transformatorfluß  $\Phi_x$  vorhanden, der in den unter den Bürsten liegenden Spulen, die mit  $\Phi_x$  nicht verkettet sind, auch keine Kurzschlußspannung induzieren kann. Beim Anlassen wird man also die beweglichen Bürsten  $b b'$  zunächst in die Stellung der festen Bürsten  $a a'$  bringen.

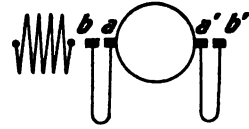


Fig. 83.

Ein weiterer Vorteil des Déri-Motors ergibt sich aus einem Vergleich der Drehmomente. Es sei

- $D_R$  das Drehmoment des Einfachbürstenmotors,
- $D_D$  das Drehmoment des Déri-Motors,
- $i_2$  die Ankerstromstärke in den Wicklungsstäben,
- $Z_2$  die Zahl der Wicklungsstäbe,
- $Z'_2$  die wirksamen Wicklungsstäbe,
- $\Phi_{vR}$  der Drehmomentfluß des Einfachbürstenmotors,
- $\Phi_{vD}$  der Drehmomentfluß des Déri-Motors,
- $R_m$  der magnetische Widerstand in der Achse von  $\Phi_v$ ,

dann ist

$$\Phi_{vR} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{Z_2 \bar{i}_2}{2 R_m} \sin \alpha = c_1 i_2 Z_2 \cdot \sin \alpha$$

$$\Phi_{vD} = \frac{4\pi}{10} \frac{Z'_2}{2} \cdot \frac{i_2 \cdot \sin \beta}{R_m} = c_1 \cdot i_2 Z_2 \cos \beta \sin \beta.$$

Es ist ferner

$$D_R = D_{Rx} + D_{Rv}$$

$$D_D = D_{Dx} + D_{Dv};$$

hierin ist

$$D_{Rx} = c_2 \Phi_{Rx} \cdot i_2 Z_2 \sin \alpha,$$

$$D_{Rv} = c_2 \Phi_{Rv} \cdot i_2 Z_2 \cos \alpha = c_2 \Phi_{Rx} \operatorname{ctg} \alpha \cdot i_2 Z_2 \cos \alpha,$$

$$D_{Dx} = c_2 \Phi_{Dx} \cdot i_2 Z_2 \cos \beta \sin \beta,$$

$$D_{Dv} = c_2 \Phi_{Dv} \cdot i_2 Z_2 \cos^2 \beta = c_2 \Phi_{Dx} \cdot \operatorname{ctg} \beta \cdot i_2 Z_2 \cos^2 \beta.$$

Wenn nun bei Anlauf  $D_R = D_D$  sein soll und zwar bei gleichen Werten von  $\Phi_x$ ,  $i_1$  und  $Z_2$ , so ergibt sich unter Berücksichtigung der Tatsache, daß bei Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes  $i_M$  der Ständerstrom

$$i_{1R} = i_2 \cdot \cos \alpha,$$

$$i_{1D} = i_2 \cdot \cos^2 \beta$$

ist, die Gleichung

$$\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{tg} \beta + \operatorname{ctg} \beta,$$

oder in Worten: bei gleichen Winkeln  $\alpha$  und  $\beta$  sind die Anlaufmomente beider Motorengattungen gleich, wenn  $\Phi_x$  resp.  $e_1$  gleichen Wert besitzt. Bei gleichen Winkeln  $\alpha$  und  $\beta$  ergibt sich auch gleiches Drehmoment beim Synchronismus.

Allgemein: ist  $\alpha = \beta$ , so sind beide Motorgattungen inbezug auf ihre Leistung gleichwertig.

Berücksichtigt man aber den Ankerwiderstand, so ist dieser beim Déri-Motor kleiner, weil nur  $Z_2 \cdot \frac{180 - 2\beta}{180}$  Stäbe Strom führen; dementsprechend

$$\text{ist} \quad r_{2D} = r_{2R} \cdot \frac{180 - 2\beta}{180}.$$

$$\text{Nun ist} \quad i_{2R} = \frac{i_{1R}}{\cos \alpha}$$

$$i_{2D} = \frac{i_{1D}}{\cos^2 \beta},$$

so daß bei Gleichheit der Ströme  $i_{1R}$  und  $i_{1D}$

$$i_{2D} = i_{2R} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos^2 \beta} = \frac{i_{2R}}{\cos \beta} \quad (\alpha = \beta)$$

ist. Demnach läßt sich der Joulesche Ankerverlust  $\Delta_a$  in beiden Fällen folgendermaßen ausdrücken:

$$\Delta_{aR} = i_{2R}^2 \cdot r_2$$

$$\Delta_{aD} = \frac{i_{2R}^2}{\cos^2 \beta} \cdot r_2 \cdot \frac{180 - 2\beta}{180}.$$

Daher ist

$$\Delta_{aD} = \Delta_{aR} \cdot \frac{1}{\cos^2 \beta} \cdot \frac{180 - 2\beta}{180}.$$

Für  $\beta = 0$  ist  $\Delta_{aD} = \Delta_{aR}$ .

Ebenso ist für  $\beta = 45^\circ$   $\Delta_{aD} = \Delta_{aR}$ .

Für sämtliche Winkel innerhalb dieser Grenzen ist

$$\Delta_{aR} > \Delta_{aD},$$

während für Winkel  $\beta > 45^\circ$   $\Delta_{aD} > \Delta_{aR}$

wird. Im regelrechten Betrieb wird  $\beta$  stets  $< 45^\circ$  sein, so daß hieraus folgt, daß der Déri-Motor einen höheren Wirkungsgrad besitzt als der Einfachbürstenmotor, da seine Kupferverluste im Anker um etwa 12 bis 13% geringer sein können.

### 10. Stromwendung der induktiv gespelsten Reihenschlußmotoren.

Kennzeichnend für alle diese Motoren ist das Drehfeld, das bei Synchronismus kreisförmig-symmetrisch wird. Da der Anker in diesem Zustand mit der Geschwindigkeit des Drehfeldes umläuft, wird in seinen Wicklungen keine EMK induziert oder mit anderen Worten: die durch  $\Phi_x$  und  $\Phi_y$  induzierten transformatorischen und Drehungs-EMKe müssen sich gegenseitig aufheben. Dies kann allerdings streng genommen nur in dem Falle möglich sein, daß  $r_2 = 0$  ist. In Wirklichkeit wird das Drehfeld sich niemals rein ausbilden können, da stets die Spannung  $i_2 r_2$  als Rest der induzierten EMKe vorhanden sein muß.

Jedenfalls folgt aber aus dieser Überlegung, daß auch in den kurzgeschlossenen Windungen  $W_K$  unter den Bürsten nur eine verschwindend geringe

Spannung auftritt, sobald der Anker synchron arbeitet. Es ist dann stets  $\Phi_x$  ein Kommutierungsfeld richtiger Größe und Phase, um der durch den Drehmomentfluß  $\Phi_y$  transformatorisch induzierten EMK in den kurzgeschlossenen Spulen das Gleichgewicht zu halten. Nach Abschnitt 5 ergibt sich das Kommutierungsfeld  $\Phi_K$  aus der Beziehung

$$\bar{\Phi}_K = \bar{\Phi}_y \frac{60 \sim}{n}.$$

Bei Synchronismus ist stets  $\bar{\Phi}_x \cdot \frac{n}{60} = \bar{\Phi}_y \cdot \sim$ , so daß

$$\bar{\Phi}_K = \bar{\Phi}_x = \bar{\Phi}_y \frac{60 \sim}{n}$$

ist.

Für alle anderen Betriebszustände der induktiv gespeisten Reihenschlußmotoren läßt sich die richtige Größe und Lage des Kommutierungsfeldes ermitteln, sobald Größe und Phase der in den kurzgeschlossenen Windungen induzierten EMK bekannt ist.

Die Lösung dieser Aufgabe ist indessen außerordentlich verwickelt, da im Gegensatz zu dem unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotor mit aufgehobenem Ankerfeld hier noch der Transformatorfluß  $\Phi_x$  auf die unter den Bürsten liegenden kurzgeschlossenen Windungen einwirkt.

Der Weg zur Ermittlung der gesamten EMK in den kurzgeschlossenen Windungen ergibt sich folgendermaßen.

Es sei

$W_K$  die Zahl der in Reihe geschalteten kurzgeschlossenen Windungen,

$E_{TKy}$  die in den kurzgeschlossenen Windungen transformatorisch durch  $\Phi_y$  induzierte EMK,

$E_{RKx}$  die in den kurzgeschlossenen Windungen durch Drehung in  $\Phi_x$  induzierte EMK,

$E_K$  die gesamte Kurzschluß-EMK.

Der Einfachheit halber möge hier die sog. Wendespannung vorläufig unberücksichtigt bleiben, und ebenso sollen die Spannungsabfälle im Anker vernachlässigt werden.

a) Atkinson-Motor.

Nach Fig. 84 ist

$$E_{TKy} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot 2 \pi \sim W_K 10^{-8} \text{ Volt (um } 90^\circ \text{ hinter } \Phi_y \text{ versetzt),}$$

$$E_{RKx} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} 2 \pi \frac{n}{60} W_K 10^{-8} \text{ Volt (um } 180^\circ \text{ hinter } \Phi_x \text{ versetzt),}$$

$$E_K = E_{TKy} - E_{RKx} = \frac{2 \pi W_K 10^{-8}}{\sqrt{2}} \left( \bar{\Phi}_y \cdot \sim - \bar{\Phi}_x \cdot \frac{n}{60} \right).$$

Hierin ist nach Abschnitt 7  $\frac{n}{60} = v \cdot \sim$  und  $\Phi_x = \Phi_y \cdot v$ ; daher erhält man

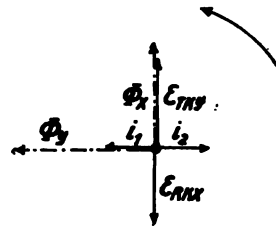


Fig. 84.

$$E_K = 2\pi \sim \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} W_K \cdot 10^{-8} \left( \frac{1}{v} - v \right) \text{ Volt} = 2\pi \sim \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cdot W_K \cdot 10^{-8} (1 - v^2) \text{ Volt.}$$

Schlußfolgerungen:

Für Untersynchronismus ( $v < 1$ ) ist  $E_K$  positiv, also in gleicher Phase mit  $E_{TKV}$  und erzeugt einen um fast  $90^\circ$  zurückbleibenden Strom, der also  $i_2$  gleichgerichtet ist, mithin das Drehmoment unterstützt.

Für Synchronismus ist  $E_K = 0$ , d. h. die Vernichtung ist vollkommen.

Bei Übersynchronismus wird  $E_K$  negativ, d. h.  $E_K$  eilt dem Strome  $i_2$  um  $90^\circ$  nach und erzeugt selbst einen Strom  $i_K$ , der  $i_2$  entgegengerichtet ist, mithin das Drehmoment schwächt.

Man führe in obige Gleichung für  $E_K$  den Wert der primären Klemmenspannung  $e_1$  ein, die sich folgendermaßen ergibt. Die Buchstaben  $A, B, C$  deuten auf den Anker, die Erregerwicklung und Arbeitswicklung des Ständers hin. Es ist

$$\begin{aligned} e_1 &= \sqrt{E_{TxC}^2 + E_{TyB}^2} = \sqrt{E_{TxA}^2 + E_{TyB}^2} = \sqrt{E_{KVA}^2 + E_{TyB}^2} \\ &= \sqrt{c_1 \bar{\Phi}_y^2 \sim^2 v^2 + c_2 \bar{\Phi}_y^2 \sim^2} = \bar{\Phi}_y \sim \sqrt{c_1 v^2 + c_2} \\ \bar{\Phi}_y &= \frac{e_1}{\sim \sqrt{c_1 v^2 + c_2}}. \end{aligned}$$

Setzt man diesen Wert von  $\bar{\Phi}_y$  in die Gleichung für  $E_K$  ein und faßt man die unveränderlichen Größen in der Größe  $C$  zusammen, so erhält man den Ausdruck

$$E_K = C \cdot \frac{1 - v^2}{\sqrt{v^2 + c}},$$

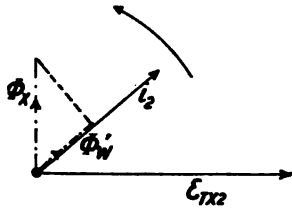


Fig. 85.

aus dem sich folgendes ergibt. Bei unveränderlichen  $e_1$  nimmt  $E_K$  zunächst ab, d. h. die Stromwindung wird besser und zwar am besten bei Synchronismus, da für  $v = 1$  der Wert von  $E_K$  Null ist. Bei übersynchronem Betrieb wächst  $E_K$  wieder schnell an.

Ändert man andererseits die Spannung  $e_1$  so, daß bei verschiedenen Werten von  $v$  der Drehmomentfluß  $\Phi_y$  ungeändert bleibt, dann ergibt sich an Hand der Gleichung

$$E_K = 2\pi \sim \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} W_K 10^{-8} (1 - v^2),$$

daß  $E_K$  bei übersynchroner Geschwindigkeit sehr stark anwächst.

Berücksichtigt man ferner noch die Wendespannung  $E_W$ , die in Phase mit  $i_2$  liegend, sich rechtwinklig mit  $E_K$  zusammensetzt und die ebenfalls bei ungeändertem  $i_2$  wie  $v$  wächst, so erkennt man, daß die Verhältnisse der Stromwindung beim Atkinson-Motor nur in der Nähe des Synchronismus günstig liegen und zwar unterhalb des Synchronismus günstiger als oberhalb.

Berücksichtigt man noch, daß beim Atkinson-Motor der Strom  $i_2$  eine geringe Voreilung gegen  $E_{Tx2}$  besitzt — eine Folge der Spannungsabfälle im Anker — so erkennt man aus Fig. 85, daß der in der Ankerachse schwingende Kraftfluß  $\Phi_x$  einen in Richtung von  $i_2$  liegenden Anteil  $\Phi_W$  besitzt. Das bedeutet aber, daß die Stromwindung beim Atkinson-Motor stets un-

günstig ist, denn ein brauchbares Wendefeld  $\Phi_W$  müßte gegen  $i_2$  um  $180^\circ$  verschoben sein.

Ein Vergleich des Atkinson-Motors mit dem unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotor mit vollkommen aufgehobenem Ankerfeld zeigt die Überlegenheit des letzteren in bezug auf die Verhältnisse bei der Stromwendung.

Beim direkt gespeisten Reihenschlußmotor ist

$$E_K = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} 2 \pi \sim W_K 10^{-8}.$$

Ersetzt man auch hier  $\bar{\Phi}_y$  durch die Klemmenspannung  $e_1$ , so erhält man den Ausdruck

$$E_K = C \cdot \frac{1}{\sqrt{v^2 + c}}.$$

Hieraus ergibt sich, daß unter gleichen Betriebsbedingungen die Spannung in den kurzgeschlossenen Spulen beim Atkinson-Motor  $(1 - v^2)$  größer ist als beim unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotor. Der Atkinson-Motor arbeitet demnach im Untersynchronismus

$(v < 1)$  günstiger als der unmittelbar gespeiste Reihenschlußmotor, dagegen im Übersynchronismus  $(v > 1)$  bedeutend ungünstiger. Wenn man aber bedenkt, daß man beim unmittelbar gespeisten Motor durch

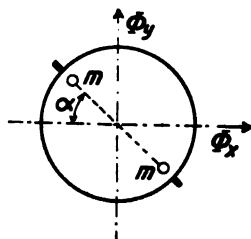


Fig. 86.

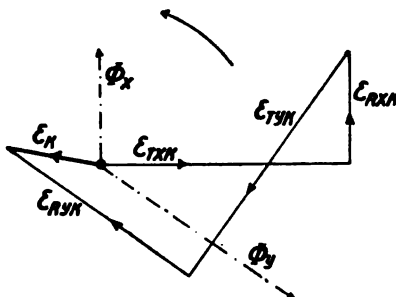


Fig. 87.

Wendepole die Stromwendung beherrschen kann, so kommt man zu dem Schluß, daß dieser Motor dem Atkinson-Motor überlegen ist.

b) Der Repulsions-Motor.

Auf die kurzgeschlossene Spule  $m m$  in Fig. 86 wirken folgende EMKe ein.

1.  $\Phi_y \cos \alpha$  induziert transformatorisch  $E_{TyK} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cos \alpha \cdot 2 \pi \sim W_K 10^{-8}$
2.  $\Phi_x \sin \alpha$  induziert transformatorisch  $E_{TxK} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \sin \alpha \cdot 2 \pi \sim W_K 10^{-8}$
3.  $\Phi_y \sin \alpha$  induziert durch Drehung  $E_{RyK} = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \sin \alpha \cdot 2 \pi \frac{n}{60} W_K 10^{-8}$
4.  $\Phi_x \cos \alpha$  induziert durch Drehung  $E_{RxK} = \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \cos \alpha \cdot 2 \pi \frac{n}{60} W_K 10^{-8}$

Aus Fig. 87 ist die grundsätzliche Lage dieser EMKe bei Untersynchronismus ( $\Phi_y > \Phi_x$ ) zu erkennen; ihre Schlußlinie ist  $E_K$ , deren Größe und Phase sich mit jedem Betriebszustand ändert.

Bei Stillstand verschwindet  $E_{RyK}$  und  $E_{RxK}$  und es ist

$$E_K = \frac{\bar{\Phi}_y}{\sqrt{2}} \cos \alpha \cdot 2 \pi \sim W_K 10^{-8} - \frac{\bar{\Phi}_x}{\sqrt{2}} \sin \alpha \cdot 2 \pi \sim W_K 10^{-8}.$$

Hierin ist  $\Phi_y = \Phi_x \operatorname{ctg} \alpha$ ;  
daher ist

$$E_K = \frac{\overline{\Phi_x}}{\sqrt{2}} 2\pi \sim W_K 10^{-8} (\operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \alpha).$$

Der Wert des Klammerausdrucks in dieser Gleichung nimmt mit wachsenden Werten des Bürstenverschiebungswinkels  $\alpha$  zunächst ab, bis er bei  $\alpha = 45^\circ$  Null wird. D. h. also, daß bei diesem Winkel der Anlauf funkenfrei erfolgt. Wächst  $\alpha$  über  $45^\circ$  hinaus, so nimmt  $E_K$

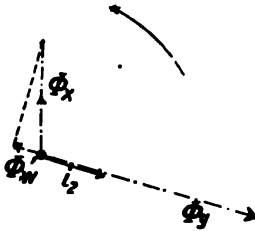


Fig. 88.



Fig. 89.

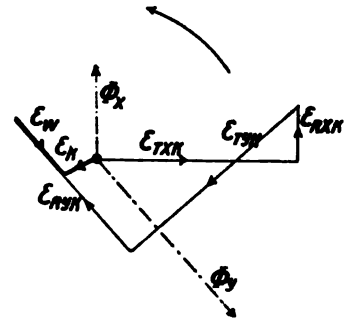


Fig. 90.

wieder zu. Für alle Werte von  $\alpha < 45^\circ$  eilt  $E_K$  dem Kraftfluß  $\Phi_x$  um  $90^\circ$  voraus, während für  $\alpha > 45^\circ$   $E_K$  dem Kraftfluß  $\Phi_x$  um  $90^\circ$  nachhinkt.

Bei  $\alpha = 30^\circ$  und  $\alpha = 90^\circ$  hat  $E_K$  den gleichen Wert

$$E_K = \frac{\overline{\Phi_x}}{\sqrt{2}} 2\pi \sim W_K 10^{-8}.$$

Bei Synchronismus ist  $\Phi_y = \Phi_x$  und es ist stets

$$\begin{aligned} E_{TxK} &= E_{RyK}, \\ E_{TyK} &= E_{RxK}. \end{aligned}$$

Bei  $\alpha = 45^\circ$  ist außerdem

$$E_{TxK} = E_{RyK} = E_{TyK} = E_{RxK}.$$

In beiden Fällen ist stets  $E_K = 0$ , d. h. also, daß der Repulsionsmotor bei Synchronismus die günstigsten Bedingungen für funkenfreie Stromwendung besitzt.

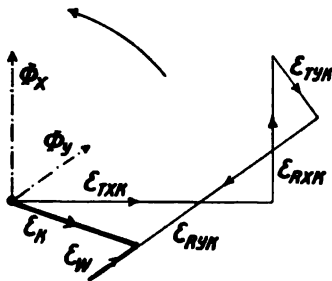


Fig. 91.

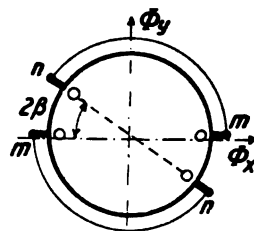


Fig. 92.

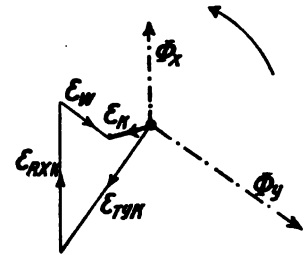


Fig. 93.

Es läßt sich aber auch hier noch weiter feststellen, daß der Betrieb unterhalb des Synchronismus günstiger ist als der oberhalb des Synchronismus. Denn für die Vernichtung der Wendespannung  $E_W$  bietet sich im Untersynchronismus nach Fig. 88 der Anteil  $\Phi_W$  von  $\Phi_x$  dar, der gegen  $i_2$  um  $180^\circ$



versetzt ist, während er bei Synchronismus ( $\Phi_x \perp \Phi_y$ ) fehlt und bei Übersynchronismus nach Fig. 89 in die Richtung von  $i_2$  fällt, mithin die Stromwendung verschlechtert.

Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn man in den Spannungsdiagrammen für die kurzgeschlossenen Spulen die Wendespannung  $E_W$  berücksichtigt.  $E_W$  ist mit  $i_2$  in Phase und verkleinert  $E_K$  bei Untersynchronismus (Fig. 90), während sie bei Übersynchronismus (Fig. 91)  $E_K$  vergrößert.

Ein Vergleich des Repulsionsmotors mit dem Atkinson-Motor und mit dem unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotor in Hinsicht auf die Stromwendung zeigt, daß er zwischen diesen beiden Motorengattungen liegt.

c) Déri-Motor.

Unter den festen Bürsten liegen nach Fig. 92 die kurzgeschlossenen Windungen  $m m$ . In diesen induziert

- $\Phi_x$  durch Drehung die Größe  $E_{RzK}$ ,
- $\Phi_y$  transformatorisch die Größe  $E_{TyK}$ ;

dazu kommt die mit  $i_2$  phasengleiche Wendespannung  $E_W$ . Diese EMKe setzen sich zu der Gesamtspannung  $E_K$  zusammen, wie Fig. 93 für Untersynchronismus und Fig. 94 für Übersynchronismus darstellt. Aus diesen Diagrammen ergibt sich, daß

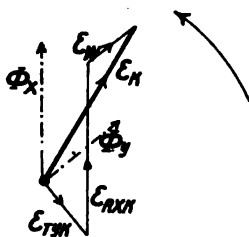


Fig. 94.

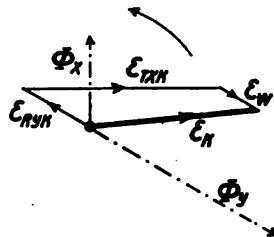


Fig. 95.

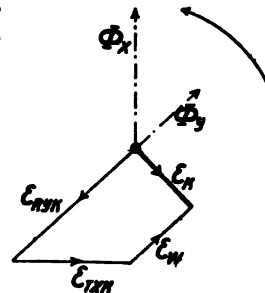


Fig. 96.

im Untersynchronismus grundsätzlich die Stromwendung besser ist als im Übersynchronismus, da  $E_W$  im ersten Falle auf eine Verkleinerung von  $E_K$ , im zweiten Falle auf eine Vergrößerung hinwirkt.

Die beweglichen Bürsten schließen nach Fig. 92 die Windungen  $n n$  kurz. In diesen induziert

- $\Phi_y \sin 2\beta$  durch Drehung die Größe  $E_{RvK}$  (klein),
- $\Phi_x \cos 2\beta$  durch Drehung die Größe  $E_{RzK}$  (groß),
- $\Phi_y \cos 2\beta$  transformatorisch die Größe  $E_{TyK}$  (groß),
- $\Phi_x \sin 2\beta$  transformatorisch die Größe  $E_{TxK}$  (klein).

Hierzu kommt noch die Wendespannung  $E_W$ .

Für den besonderen Fall, daß  $\beta = 45^\circ$  wird, verschwinden die beiden Größen  $E_{RzK}$  und  $E_{TyK}$  und man erhält dann die in Fig. 95 und 96 dargestellten einfachen Diagramme für Unter- und Übersynchronismus, aus denen sich die Tatsache ergibt, daß die gesamte EMK  $E_K$  in den kurzgeschlossenen Spulen unter den beweglichen Bürsten im Übersynchronismus kleiner ist als im Untersynchronismus.

Während also die festen Bürsten im Übersynchronismus ungünstiger arbeiten, ist bei den beweglichen Bürsten das Umgekehrte der Fall.

Im allgemeinen ist die Stromwendung des Déri-Motors günstiger als die des Einfachbürsten-Repulsionsmotors, weil bei ersterem während der Stromwendung der Strom  $i$  auf den Wert Null sinkt, während bei letzterem für den verschwindenden Strom  $+i$  der Strom  $-i$  entsteht. Im letzteren Falle ist bei gleichem Wert des zu wendenden Stromes die Wendespannung doppelt so groß als beim Déri-Motor.

### 11. Der Reihen-Kurzschlußmotor mit primärer Ankererregung (Winter-Eichberg-Latour-Motor).

Bei diesem Motor überträgt nach Fig. 97 die Ständerwicklung  $C$  transformatorisch die elektrische Leistung auf den Anker  $A$ , dessen Arbeitsbürsten  $a a'$  kurzgeschlossen sind. Der primäre Strom  $i_1$  wird vermittelt der Bürsten  $b b'$  durch den Anker geführt und erzeugt den Drehmomentfluß  $\Phi_y$ . Der Strom  $i_2$  ist nach Fig. 98 im wesentlichen dem Transformatorfluß  $\Phi_x$  entgegengerichtet, während  $i_1$  mit  $\Phi_y$  nach Fig. 99 in gleicher Phase ist. Wenn das Übersetzungsverhältnis  $C-A$  gleich der Einheit ist, so ist  $i_1$  ungefähr gleich  $i_2$  und da beide Ströme fast um  $180^\circ$  versetzt sind, heben sie sich in

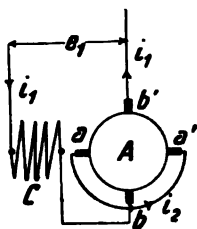


Fig. 97.

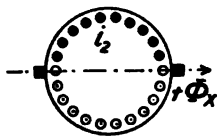


Fig. 98.

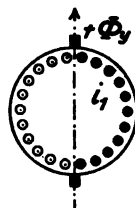


Fig. 99.

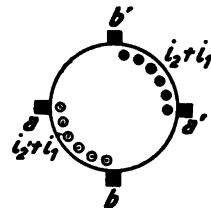


Fig. 100.

den Ankerabteilungen zwischen  $a b'$  und  $b a'$  praktisch auf, während sie sich in den Abteilungen  $a b$  und  $a' b'$  nach Fig. 100 addieren.

Das allgemeine Diagramm des Motors ergibt sich nach Fig. 101 folgendermaßen

Die durch  $\Phi_x$  induzierte Spannung  $E_{Tx_2}$  besitzt die Teilspannungen  $+i_2 r_2$ ,  $-E_{\sigma_2}$  (Streuung) und  $-E_{Rv_2}$ . Aus  $i_2$  und  $i_M$  ergibt sich  $i_1$ , in dessen Phase  $\Phi_y$  liegt. Aus den Anteilen  $-E_{Tx_1}$ ,  $+i_1 \cdot r_1$ ,  $-E_{\sigma_1}$  (Streuung in  $C$ ) ergibt sich die Klemmenspannung  $e_C$  an  $C$ . Um  $i_1$  durch den Anker zu treiben, ist eine Klemmenspannung  $e_A$  aufzuwenden, deren Anteile  $+i_1 r_2$   $-E_{Tv_2}$  (Transformatorwirkung von  $\Phi_y$  in der Ankerwicklung),  $-E_{Rx_2}$  (Drehungsinduktion im Kraftfluß  $\Phi_x$ ) sind. Als Schlußlinie von  $e_C$  und  $e_A$  erhält man die gesamte primäre Klemmenspannung  $e_1$ . In Fig. 102 ist das vereinfachte Motordigramm unter Vernachlässigung der Spannungsabfälle dargestellt. Aus diesem ergibt sich folgendes:

Es muß stets sein

$$E_{Tx_2} = E_{Rv_2},$$

$$c \cdot \bar{\Phi}_x \sim c \cdot \bar{\Phi}_y \frac{n}{60} = c \cdot \bar{\Phi}_y \sim v, \\ \bar{\Phi}_x = v \cdot \bar{\Phi}_y.$$

Es ist ferner

$$E_{Tv2} = c \cdot \Phi_y \cdot \sim$$

und 
$$E_{Rx2} = c \cdot \Phi_x \cdot \sim \cdot v = c \cdot v \cdot \Phi_y \cdot \sim \cdot v = c \cdot \sim \cdot \Phi_y \cdot v^2$$

$$E_{Rx2} = E_{Tv2} \cdot v^2.$$

Die Klemmenspannung  $e_A$  zwischen den Bürsten  $b b'$  ist

$$e_A = E_{Tv2} - E_{Rx2} = E_{Tv2} (1 - v^2);$$

sie wird also bei Synchronismus Null und bei Übersynchronismus negativ.

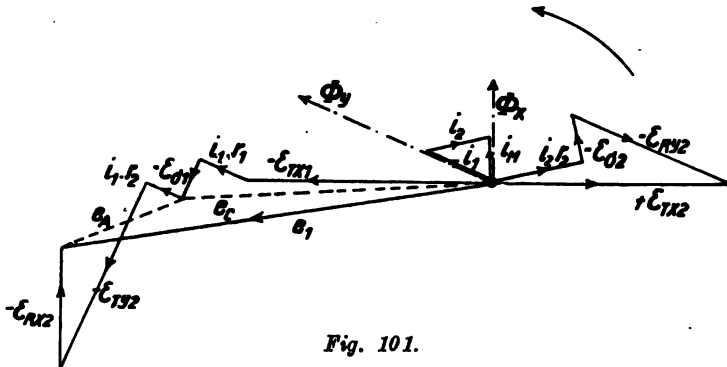


Fig. 101.

Für die primäre Phasenverschiebung  $\varphi_1$  zwischen  $i_1$  und  $e_1$  erhält man den Ausdruck

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{e_A}{E_{Tx1}} = \frac{E_{Tv2} (1 - v^2)}{E_{Tx1}} = \frac{c \cdot \Phi_y \cdot \sim (1 - v^2)}{c' \cdot \Phi_x \cdot \sim}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = C \cdot \frac{\Phi_y}{\Phi_x} \cdot (1 - v^2) = C \cdot \frac{1 - v^2}{v}.$$

Die Phasenverschiebung wird also bei Synchronismus Null und bei Übersynchronismus eilt  $i_1$  der Spannung  $e_1$  voraus.

In diesem Verhalten liegt ein großer Vorzug dieses Motors gegenüber sämtlichen bisher besprochenen Motoren.

Das Drehmoment des Motors setzt sich aus den beiden Anteilen  $D_x$  und  $D_y$  zusammen, deren Richtung sich aus folgender Überlegung ergibt. Aus dem allgemeinen Diagramm nach Fig. 101 ist zu ersehen, daß  $\Phi_x$  und  $\Phi_y$

wesentlich gleiche Phase haben, dagegen sind  $i_1$  und  $i_2$  im wesentlichen entgegengerichtet. Daher sind auch  $\Phi_x$  und  $i_2$  im wesentlichen entgegengerichtet. Ist  $\Phi_x$  positiv, so ist also  $\Phi_y$  auch wesentlich positiv und  $i_2$  negativ, wie Fig. 103 zeigt. Das Drehmoment  $D_y = c_1 \cdot \Phi_y \cdot i_2$  ist rechtsdrehend.

Da aber  $\Phi_y$  und  $i_1$  phasengleich sind, ergibt sich nach Fig. 104 das in gleicher Richtung wirkende Drehmoment  $D_x = c_1 \cdot \Phi_x \cdot i_1 \cos \delta$ , worin  $\delta$

der von  $\Phi_x$  und  $i_1$  eingeschlossene zeitliche Verschiebungswinkel ist. Das gesamte Drehmoment  $D$  folgt also aus der Gleichung

$$D = c_1 (\Phi_y \cdot i_2 + \Phi_x \cdot i_1 \cos \delta).$$

Der Unterschied dieses Vierbürstenmotors gegenüber dem Déri-Motor besteht darin, daß bei ihm bei allen Geschwindigkeiten die beiden Drehmomente gleiche Richtung besitzen, während bei letzterem das Drehmoment  $D_x$  im Untersynchronismus mit  $D_y$  gleiche Richtung, im Übersynchronismus entgegengesetzte Richtung besitzt. Wenn auch im allgemeinen  $D_x$  gegenüber  $D_y$  klein ist, so ist doch in dieser Tatsache ein weiterer Vorzug des Winter-Eichberg-Latour-Motors gegenüber dem Déri-Motor festzustellen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß man in Anbetracht der Aufhebung von  $E_{T_{y2}}$  durch  $E_{R_{x2}}$  größere Werte von  $\Phi_y$  zulassen kann, ohne zu große Phasenverschiebungen im primären Teil befürchten zu müssen, wie bei den übrigen Motorgattungen. Dementsprechend ergeben sich geringere Werte von  $i_2$ , was für die Stromwendung von Vorteil ist.

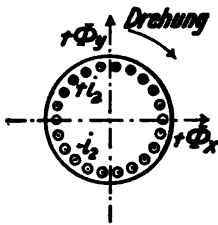


Fig. 103.

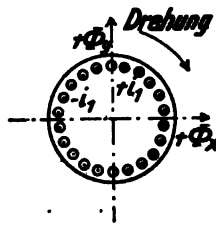


Fig. 104.

Der Winter-Eichberg-Latour-Motor besitzt die Kennzeichen des Reihenschlußmotors, nämlich den mit wachsender Geschwindigkeit abnehmenden Drehmomentfluß  $\Phi_y$  und das dem Quadrate des Stromes  $i_1$  proportionale Drehmoment, denn es ist  $D_y = c_1 \cdot \Phi_y \cdot i_2 = c_2 \cdot i_1 \cdot i_2 = c_2 i_1^2$ . Der Motor besitzt ferner,

wie alle induktiv gespeisten Kollektormotoren ein Drehfeld, das bei Synchronismus ( $v = 1$ ,  $\Phi_y = \Phi_x$ ) symmetrisch kreisförmig ist.

Über die Verhältnisse bei der Stromwendung geben folgende Betrachtungen Aufschluß.

Die Arbeitsbürsten  $a a'$  schließen die Windungen  $W_K$  kurz und in diesen entsteht durch Drehung in  $\Phi_x$  die EMK  $E_{R_{xK}} = c \cdot \Phi_x \cdot \sim v$ , gegen  $\Phi_x$  um  $180^\circ$  versetzt; ferner durch Transformation

$$E_{T_{yK}} = c \cdot \Phi_y \sim,$$

gegen  $\Phi_y$  um  $90^\circ$  zurückbleibend, also praktisch in Phase mit  $\Phi_x$ .

Daher ist  $E_K = E_{T_{yK}} - E_{R_{xK}} = c \cdot \sim (\Phi_y - v \cdot \Phi_x)$ ,

$$E_K = c \cdot \sim \Phi_y (1 - v^2).$$

Bei Synchronismus ist demnach die Stromwendung am günstigsten, da dann  $E_K = 0$  wird. Berücksichtigt man noch die Stromwendespannung  $E_W$ , so wirkt diese im Untersynchronismus verkleinernd auf  $E_K$ , im Übersynchronismus vergrößernd auf  $E_K$  ein. Die günstigste Stromwendebedingung liegt also für die Arbeitsbürsten im Untersynchronismus in der Nähe des Synchronismus.

In den durch die Erregerbürsten kurzgeschlossenen Windungen entsteht durch Drehung in  $\Phi_y$  die EMK

$$E_{R_{yK}} = c \cdot \Phi_y \cdot \sim \cdot v$$

und durch Transformation die EMK

$$E_{T_{xK}} = c \cdot \Phi_x \cdot \sim.$$

Es ist also

$$E_K = E_{T_x K} - E_{R_y K} = c \cdot (\Phi_x - \Phi_y \cdot v);$$

da aber  $\Phi_x = \Phi_y \cdot v$  ist, ist bei allen Geschwindigkeiten

$$E_K = c \cdot \sim (\Phi_x - \Phi_x) = 0.$$

Die Erregerbürsten arbeiten also bei allen Geschwindigkeiten einwandfrei, da in den von ihnen kurzgeschlossenen Windungen nur die Wendespannung  $E_W$ , die an sich verhältnismäßig klein ist, auftreten kann.

Bei Stillstand führen die durch die Arbeitsbürsten kurzgeschlossenen Windungen den durch  $\Phi_y$  induzierten Strom, der bedeutend größer ist als der durch den schwachen Kraftfluß  $\Phi_x$  in den durch die Erregerbürsten kurzgeschlossenen Windungen fließende Strom.

Bei Stillstand muß daher  $\Phi_y$  geschwächt werden, was durch den von Eichberg eingeführten Erregertransformator ermöglicht wird. Nach Fig. 105 ist mit  $C$  der Spartransformator  $T$  in Reihe geschaltet, dessen änderbare Sekundärspannung auf die Erregerbürsten  $b b'$  wirkt.

Bei Stillstand wird diese Spannung sehr klein gewählt, so daß  $\Phi_y$  klein und  $i_2$  groß ist, während mit wachsender Geschwindigkeit die an  $b b'$  herrschende Spannung vergrößert wird, so daß bei allen Geschwindigkeiten eine vollkommene Aufhebung der transformatorischen EMK durch diejenige der Drehung erzielt werden kann. Erst durch die Einführung dieses Transformators hat dieser Motor seine volle Bedeutung erlangt.

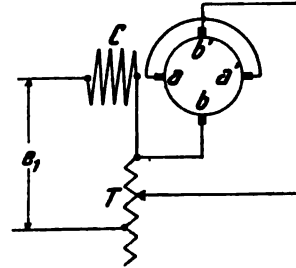


Fig. 105.

Um die Stromwendung an den Arbeitsbürsten, die besonders bei Übersynchronismus Schwierigkeiten macht, zu verbessern, verwendet Eichberg Wendepole für diese Bürsten, die von einem Teile der Spannung des Spartransformators  $T$  gespeist werden und deren Wicklung erst bei übersynchroner Geschwindigkeit eingeschaltet wird.

Der Erregertransformator bietet ferner den großen Vorteil, durch passende Einstellung des Kraftflusses  $\Phi_y$  bei beliebiger Belastung die Spannungen  $E_{R_x}$  und  $E_{T_y}$  im Motorstromkreise gleichzumachen, so daß die Phasenverschiebung  $\varphi_1$  verschwindet. Die Bedingung hierfür ist für gegebene Werte von  $\Phi_x$  und  $v$ , daß  $\Phi_y = v \cdot \Phi_x$  wird.

## 12. Der doppelt gespeiste Motor.

Das Wesen der doppelten Speisung ergibt sich aus folgender Betrachtung. Nach Fig. 106 sei die Sekundärwicklung des Transformators  $T$  so mit einem Wechselstromerzeuger  $D$  hintereinandergeschaltet, daß sich die beiden gleichphasigen Spannungen  $E_2$  und  $e_2$  gleicher Periodenzahl gemäß Fig. 107 zusammensetzen. Dann ist angenähert  $i_2 = \frac{E_2 + e_2}{R}$  und  $i_2 = i_1$ , wenn man wieder die Spannungsabfälle im Transformator unberücksichtigt läßt. Da aber  $E_2 = E_1 = e_1$  ist, so läßt die Gleichung

$$i_2 = \frac{e_1 + e_2}{R}$$

erkennen, daß die sekundäre Leistung  $i_2 \cdot (E_2 + e_2) = i_2 e_1 + i_2 e_2$  zum Teil durch die Spannung  $e_1$  auf induktivem Wege, zum anderen Teil durch die Spannung  $e_2$  auf unmittelbarem Wege im Sekundärstromkreis erzeugt wird.

Grundsätzlich ändert sich nichts, wenn man nach Fig. 108 die Maschine  $D$  durch einen Transformator  $T_2$  ersetzt, der mit dem Transformator  $T_1$  in Reihe geschaltet ist, dessen Sekundärwicklung die Spannung  $e_1$  erzeugt.

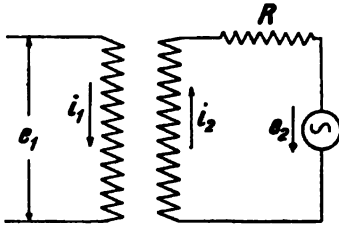


Fig. 106.



Fig. 107.

An Stelle des Spannungsverbrauchs  $i_2 R = e_1 + e_2$  kann auch ein solcher durch gegenelektromotorische Kräfte in einem Motoranker treten. Die in Fig. 109 dargestellte Motorschaltung dürfte sich nach dem oben gesagten selbst erläutern.  $C$  und  $A$  sind gegeneinander geschaltet;  $B$  ist mit  $A$  hintereinandergeschaltet, so daß der Motor Reihenschlußbeigenschaft besitzt. Die verschiebbare Zuleitung  $a$  des Spartransformators  $T_1$  hat nur den Unterschied von  $i_1$  und  $i_2$ , also den kleinen Magnetisierungsstrom  $i_M$  des Trans-

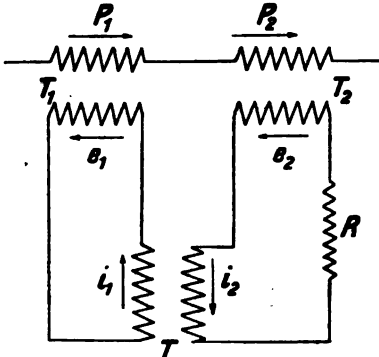


Fig. 108.

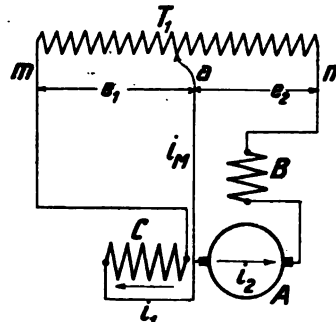


Fig. 109.

formators  $C-A$  ( $T$  in Fig. 108) zu führen. Auf den Anker  $A$  wirken stets die beiden Klemmenspannungen  $e_1$  und  $e_2$  ein, nämlich  $e_1$  induktiv,  $e_2$  unmittelbar.

Je größer aber der induktiv wirksame Anteil  $e_1$  der Klemmenspannung gegenüber  $e_2$  wird, um so größer muß der Kraftfluß  $\Phi_x$ , in dem die Bürsten des Motors stehen, werden. Durch passende Verteilung der Motorspannung auf die Wicklungen  $C$  einerseits,  $A$  und  $B$  andererseits, hat man also die Möglichkeit, die Größe von  $\Phi_x$  willkürlich zu verändern.

In Fig. 110 ist das Diagramm des doppelt gespeisten Motors für einen bestimmten Betriebszustand gegeben.

Der Transformatorfluß  $\Phi_x$  ist dem Magnetisierungsstrom  $i_M$  proportional, der sich mit  $i_2$  zu  $i_1$  zusammensetzt. Die primäre Klemmenspannung  $e_1$

besitzt die Teilspannungen  $-E_{Tx_1}$ ,  $+e_1 = i_1 r_1$ ,  $-E_{\sigma_1}$  (Streu­spannung). Mit  $e_1$  hat  $e_2$  gleiche Richtung und außerdem sind im sekundären Stromkreis, also im Anker, folgende EMKE tätig:

$E_{Tx_2}$ , induziert durch  $\Phi_x$  im Anker *A*

$E_{\sigma_2}$ , induziert durch die sekundären Streufelder

$E_{Tv_2}$ , induziert durch den Kraftfluß  $\Phi_y$  in Wicklung *B*

$E_{Rv_2}$ , induziert im Anker *A* durch Drehung im Kraftfluß  $\Phi_y$ .

Die Schlußlinie des Linienzuges  $E_{Tx_2}$ ,  $e_2$ ,  $E_{\sigma_2}$ ,  $E_{Tv_2}$ ,  $E_{Rv_2}$  ist der Spannungsabfall  $i_2 \cdot r_2$ , in dessen Richtung  $i_2$  und  $\Phi_y$  liegen.

Vernachlässigt man die primären Spannungsabfälle  $+i_1 \cdot r_1$  und  $-E_{\sigma_1}$ , so ist  $e_1 = E_{Tx_1} = K \cdot E_{Tx_2}$  und die Summe der im Sekundärkreis wirksamen

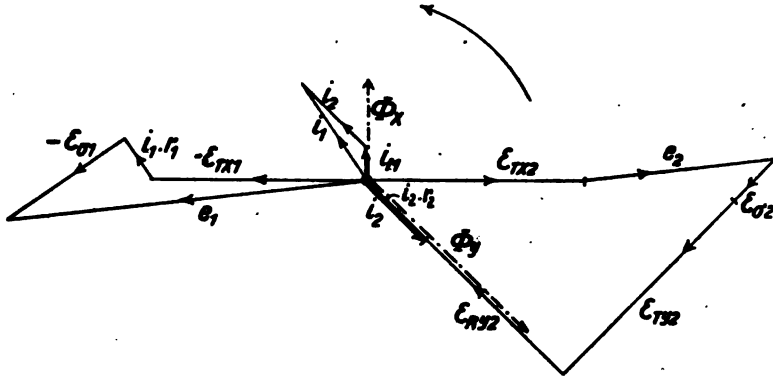


Fig. 110.

Spannungen  $E_{Tx_2} + e_2$  ist stets gleich  $e_1 + e_2$ , also gleich  $e$ . Vernachlässigt man ferner die sekundären Spannungsabfälle  $+i_2 \cdot r_2$  und  $-E_{\sigma_2}$ , so ist stets

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{E_{Tv_2}}{E_{Rv_2}} = c \cdot \frac{1}{v}.$$

Die Gleichungen für die mechanische Leistung und das Drehmoment sind genau die gleichen, wie beim direkt gespeistem Reihenschlußmotor mit der Klemmenspannung  $e_1$ , auf die an dieser Stelle verwiesen werden kann.

Es ist

$$e_1 + e_2 = \frac{E_{Rv_2}}{\cos \varphi_2}$$

$$(e_1 + e_2) \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{v^2}}} = c' \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi_y.$$

Man setze ferner  $e_2 = x \cdot e_1$  und  $e_1 = K \cdot E_{Tx_2} = K \cdot c' \cdot \sim \Phi_y$ ; dann erhält man die Gleichung

$$\frac{K \cdot c' \cdot \sim \Phi_x (1 + x)}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{v^2}}} = c' \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi_y.$$

Eine nähere Untersuchung der Unveränderlichen  $c$  unter dem Wurzelzeichen zeigt, daß diese das Verhältnis  $\frac{W_B}{Z_A}$  darstellt, welches nach dem früher

gesagten (vgl. Seite 27) aus Gründen der Verringerung der Phasenverschiebung möglichst klein gehalten werden muß. Infolgedessen wird der Wert des Wurzelausdruckes sich im allgemeinen nur wenig vom Werte 1 unterscheiden, d. h. der Winkel  $\varphi_2$  wird im allgemeinen klein sein. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache, aus der dann weiter folgt, daß  $\Phi_x$  und  $\Phi_y$  angenähert senkrecht aufeinander stehen, gelangt man zu der angenäherten, die Richtlinien der Spannungsverteilung andeutenden Gleichung

$$K \cdot \sim \cdot \Phi_x (1 + x) = \frac{n}{60} \cdot \Phi_y.$$

Mit Rücksicht auf vollkommene Vernichtung der Transformator-EMK in den kurzgeschlossenen Windungen durch eine gleichgroße EMK der Drehung ist die Bedingung

$$\Phi_x \cdot \frac{n}{60} = \Phi_y \cdot \sim$$

zu erfüllen. Durch Vereinigung der beiden letzten Gleichungen erhält man den Ausdruck

$$x = \frac{v^2}{K} - 1$$

aus dem sich ergibt, daß für jede Geschwindigkeit  $v$  die Spannung  $e$  derart in zwei Anteile  $e_1$  und  $e_2 = x \cdot e_1$  zerlegt werden kann, daß bei dieser Zerlegung der Kraftfluß  $\Phi_x$  die für die funkenfreie Stromwendung erforderliche Größe besitzt.

Für große Werte von  $v$ , also für den Übersynchronismus, ist  $x$  positiv und größer als 1, d. h.  $e_2$  muß größer als  $e_1$  sein. Für kleine Werte von  $v$  wird  $x$  negativ, d. h. die Spannung  $e_2$  im Motorstromkreise muß der induzierten Spannung  $E_{T_{22}}$  entgegenwirken; es müssen also die Anschlüsse  $a$  und  $n$  des Motorstromkreises in Fig. 109 vertauscht werden. Ist  $\frac{v^2}{K} = 1$ , so ist  $x = 0$ , d. h. die Spannung  $e_2$  ist gleich Null und die ganze Spannung  $e_1$  wirkt induktiv auf den Motor, der selbst kurzgeschlossen ist, da die Zuleitungen  $a$  und  $n$  zusammenfallen. Der Motor arbeitet dann als Repulsionsmotor mit vom Ankerstrom gespeister Erregerwicklung  $B$ .

Nach dem oben gesagten schließt  $\Phi_x$  mit  $\Phi_y$  einen stumpfen Winkel  $\delta$  ein, d. h.  $\Phi_x$  besitzt zwei Anteile, von denen der eine  $\Phi'_x$  auf  $\Phi_y$  senkrecht stehend, die durch  $\Phi_y$  in den kurzgeschlossenen Windungen erzeugte Transformator-EMK aufhebt, während der gegen  $\Phi_y$  um  $180^\circ$  verschobene Kraftflußanteil  $\Phi''_x$  für die Stromwendung paßt.

Der doppelt gespeiste Motor vereinigt demnach die Vorzüge des unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotors und der induktiv gespeisten Motoren, ohne deren Nachteile zu besitzen.

Diese Nachteile sind beim unmittelbar gespeisten Motor die Notwendigkeit einer besonderen im Nebenschluß liegenden Wendepolwicklung und bei den induktiv gespeisten Motoren die Schwierigkeiten der Stromwendung oberhalb des Synchronismus.

Es möge noch bemerkt werden, daß die Erregerwicklung  $B$  in Fig. 109 auch so geschaltet werden kann, daß sie vom primären Strom  $i_1$  durchflossen



wird oder schließlich so, daß sie vom Magnetisierungsstrom  $i_M$  durchflossen wird, so daß sie in der zum Anschluß  $a$  führenden Leitung liegt. Die erstere Schaltung ist von Arnold, die letztere von Osnos angegeben worden.

Schließlich ist hierzu noch der Motor von Alexanderson (vgl. Fig. 116) zu rechnen, der beim Anlauf als induktiv gespeister Motor, beim Lauf als doppelt gespeister Motor arbeitet.

In Fig. 111 ist die Abhängigkeit der Funkenspannung  $E_K$  von der Geschwindigkeit bei Änderung des Kraftflusses  $\Phi_x$  für einen doppeltgespeisten Lokomotivmotor der A. E. G. von 1000 PS normaler Leistung gegeben. Bei Anlauf ist  $E_K$  gleich 3 Volt und nimmt bis zum Synchronismus, der bei 34 km Fahrgeschwindigkeit liegt, bis zum Werte Null ab, um dann wieder schnell anzusteigen. Bei  $V = 38$  km wird, nachdem der Anker bisher mit kurzgeschlossenen Bürsten lief, dieser an die erste Spannungsstufe des Transformators gelegt, bei  $V = 50$  km an die zweite usw., mit anderen Worten, die unmittelbare Speisung des Ankers erhält in dem Maße das Übergewicht gegenüber der transformatorischen, wie die Fahrgeschwindigkeit steigt. Die Funkenspannung bleibt dabei oberhalb der Geschwindigkeit  $V = 30$  km innerhalb der Grenzen  $\pm 1$  Volt.

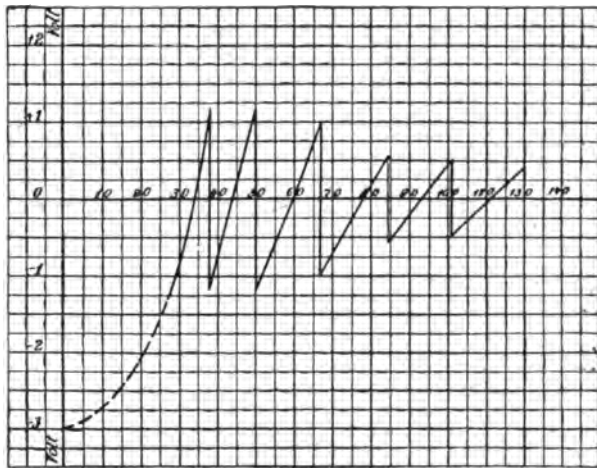


Fig. 111.

### 13. Anlauf, Drehzahlregelung und Umsteuerung der Kommutatormotoren.

Der Bahnbetrieb stellt an die Motoren während des Anlaufs besonders große Anforderungen, da neben der für die Überwindung der Bahnwiderstände erforderlichen Zugkraft noch verhältnismäßig große beschleunigende Kräfte zu erzeugen sind. Über die Berechnung dieser Kräfte ist in Abschnitt 17 das Nähere gesagt. Hier handelt es sich in erster Linie darum, zu untersuchen, welche Bedingungen für den Anlauf einzuhalten sind und wie sich die einzelnen Motorgattungen, soweit sie für den Bahnbetrieb in Frage kommen, bei Anlauf hinsichtlich des Stromverbrauchs verhalten.

Zunächst läßt sich für alle Kommutatormotoren aus dem früher gesagten die Tatsache feststellen, daß  $\Phi_y$  entweder mit  $i_1$  oder mit  $i_2$  in gleicher Phase ist. Unter Vernachlässigung des Magnetisierungsstroms  $i_M$  ist dann  $\Phi_y$  stets mit  $i_1$  und  $i_2$  in gleicher Lage, d. h. um  $0^\circ$  oder  $180^\circ$  verschoben. Es steht ferner bei allen betrachteten Motoren  $\Phi_x$  und  $\Phi_y$  in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander, so daß bei Stillstand, also  $v = 0$ , das Anlaufmoment sich stets ausdrücken läßt durch eine Gleichung von der Form

$$D_a = C \cdot \Phi_y \cdot i_1.$$

Der Kraftfluß  $\Phi_x$  hat bei Stillstand nur die geringen Spannungsabfälle zu decken und kann gegen  $\Phi_y$  vernachlässigt werden, so daß sich für alle Kollektormotoren, wie sie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben wurden, grundsätzlich das in Fig. 112 dargestellte Anlaufdiagramm ergibt, in welchem die Anlaufspannung  $e_a$  sich in die beiden Teilspannungen  $i_1 r_1$  und  $-E_{\sigma_1}$  nebst  $-E_{T_{y1}}$  zerlegt. Bei allen Motoren mit Ständererregung ist  $\Phi_y$  in Phase mit  $i_1$ , bei den Motoren mit Läufererregung dagegen gegenüber  $i_1$  um  $180^\circ$  verschoben.

Es ist weiter gemäß Fig. 112

$$e_a = \sqrt{(E_{T_y} + E_{\sigma})^2 + (i_1 r_1)^2} \cong E_{T_y} + E_{\sigma}.$$

In dieser Gleichung ist  $E_{\sigma} = i_a \omega L_{\sigma_1}$ , wenn  $L_{\sigma_1}$  der primäre Streukoeffizient ist. Daher läßt sich der Anlaufstrom  $i_a$  ausdrücken durch die angenäherte Gleichung

$$i_a = \frac{e_a - E_{T_y}}{\omega L_{\sigma_1}}.$$

Der Strom  $i_a$  muß regelbar sein, was sich durch Änderung von  $e_a$  oder von  $E_{T_y}$  erreichen läßt; ebenso können beide Größen gleichzeitig geändert werden.

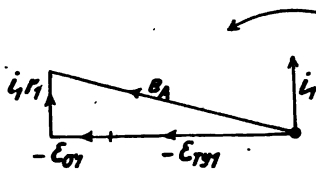


Fig. 112.

Diese drei Methoden sind bei jedem Motor anwendbar, jedoch ist deren wirtschaftlicher Erfolg bei den verschiedenen Motorengattungen verschieden. Welche aber auch immer angewendet wird —, zunächst ist der Forderung Rechnung zu tragen, daß in den unter den Arbeitsbürsten kurzgeschlossenen Spulen durch den Kraftfluß  $\Phi_y$  stets ein EMK  $E_K$  induziert wird, die bei Stillstand nicht vernichtet werden kann und die

höchstens den Betrag von 6 bis 7 Volt erreichen darf, damit eine einwandfreie Stromwendung möglich ist. Dadurch ist der Kraftfluß  $\Phi_y$  bei Anlauf nach oben begrenzt, und hieraus kann gefolgert werden, daß der Kraftfluß  $\Phi_y$  bei Anlauf im allgemeinen nicht größer sein darf, als bei Vollast, wenn der Motor mit Rücksicht auf günstigste Materialausnutzung bei Vollast gebaut worden ist.

Will man also bei Anlauf ein größeres Moment erzeugen, als es der normalen Last entspricht, so läßt sich dies nach der Gleichung

$$D = C \cdot \Phi_y \cdot i_1$$

nur durch eine Vergrößerung von  $i_1$  erreichen. Dabei darf aber  $i_1$  nur so weit anwachsen, als es die Rücksicht auf Erwärmung zuläßt. Durch diese Beschränkungen schrumpft die große Zahl der Anlaufmöglichkeiten zu einigen wenigen zusammen, die in folgendem kurz erläutert werden sollen.

1. Der unmittelbar gespeiste Hauptstrommotor.

Nach Fig. 113 wird die Spannung  $e_a$  durch den Reguliertransformator so weit erniedrigt, daß der Vollaststrom den Motorstromkreis durchfließt. Von der Sekundärseite des Transformators ist die Wicklung für das an unveränderlicher Spannung liegende Nebenschlußwendefeld (vgl. Abschnitt 6) abgezweigt. Ist der Motor so gebaut, daß er beim normalen Strom gesättigt ist, so kann  $e_a$  vergrößert werden, da der größere Strom keine Vergrößerung

von  $\Phi_v$  mehr bewirken kann. Es läßt sich dann ein gegenüber Vollast vergrößertes Anlaufmoment erzielen.

Ist der Motor bei Vollast nicht gesättigt, so läßt sich eine Vergrößerung des Anlaufmomentes nur dadurch erzielen, daß man den die Feldwicklung  $B$  durchfließenden Strom schwächt oder daß man die Windungszahl von  $B$  verringert. Letztere Möglichkeit läßt sich technisch nicht verwirklichen, wenigstens

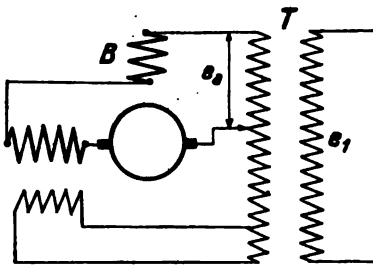


Fig. 113.

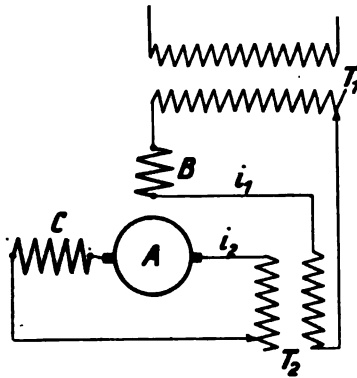


Fig. 114.

nicht bei Motoren großer Leistung, so daß nur die erstere Anwendung findet, und zwar nach der Schaltung in Fig. 114, in welcher  $T_1$  der Transformator zur Regelung der Anlaufspannung  $e_a$  und  $T_2$  der Transformator zur Regelung des Feldstromes in  $B$  ist. Der Kraftfluß  $\Phi_v$  hängt lediglich von  $i_1$  ab, während der Ankerstrom  $i_2$  ein Vielfaches von  $i_1$  sein kann.

Diese an und für sich sehr brauchbare Schaltung weist indessen den Nachteil auf, daß zwei Transformatoren erforderlich sind.

2. Die induktiv gespeisten Reihenschlußmotoren.

Von diesen kommen für den Bahnbetrieb nur der Dérimotor und der Winter-Eichberg-Motor in Frage. Beim Dérimotor wächst durch Verschiebung der Bürsten aus der Nulllage der Kraftfluß  $\Phi_v$  zunächst stark an, um bei weiterer Bürstenverschiebung wieder abzunehmen. Damit er aber nicht über die zulässige Grenze anwachsen kann, muß seine Begrenzung durch Sättigung des Eisens bewirkt werden.

Verschiebt man nun die Bürsten weiter, so bleibt  $\Phi_v$  wegen der Sättigung ungeändert, während die für die Drehmomentenbildung maßgebende Zahl der stromdurchflossenen Ankerleiter, d. h. die Größe  $i_2 z_2 \cos^2 \beta$  wächst. Damit wächst aber auch das Drehmoment. In gleichem Verhältnis zu dem wachsenden Wert  $i_2 z_2 \cos^2 \beta$  nimmt auch der primäre Strom  $i_1$  bei ungeänderter Klemmenspannung zu.

Um zu vermeiden, daß der Kraftfluß  $\Phi_v$  zu hoch anwächst, kann man auch so verfahren, daß man zunächst die Klemmenspannung am Ständer

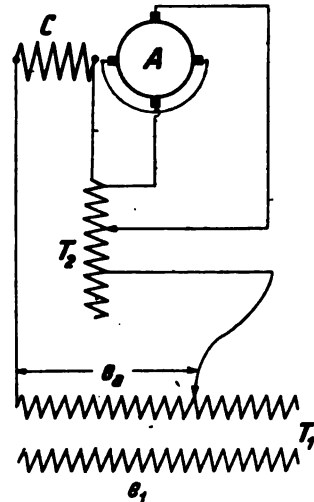


Fig. 115.

herabsetzt und den Motor durch Bürstenverschiebung zum Anlauf bringt. Dann entsteht eine EMK der Drehung, welche das fernere unzulässige Anwachsen von  $\Phi_v$  ausschließt. Die Bürsten werden nunmehr wieder in die Nullstellung gebracht und darauf dem Ständer die volle Klemmenspannung zugeführt. Hierauf werden die Bürsten wieder vorgeschoben. Hierzu ist aber ein Transformator notwendig, durch dessen Verwendung man auf den schwerwiegenden Vorzug des Dérimotors, ohne Transformator anlaufen zu können, verzichtet. —

Für den Anlauf des Winter-Eichberg-Motors sind zwei Transformatoren erforderlich, nämlich nach Fig. 115 der Leistungstransformator  $T_1$  zur Regelung der Anlaufspannung  $e_a$  und der Erregertransformator  $T_2$  (vgl. Abschnitt 11) zur Verminderung des Kraftflusses  $\Phi_v$ . Letzterer wird gewöhnlich als einphasiger Transformator ausgeführt.

### 3. Der doppelt gespeiste Reihenschlußmotor.

Die doppelt gespeisten Motoren laufen entweder als Reihenschlußmotoren mit verminderter Spannung in einer der Fig. 109 entsprechenden Schaltung an, oder aber als Repulsionsmotoren, wie es z. B. bei dem Motor von Alexanderson gebräuchlich ist, dessen Anlaufschaltung Fig. 116 darstellt.

Der Anlaufstrom  $i_a$  wird der niedrigsten Spannungsstufe des Transformators  $T$  entnommen, durchfließt die Arbeitswicklung  $C$  und die Erregerwicklung  $B$ , während der Anker  $A$  durch den Schalter  $S$ , der bei Lauf geöffnet wird, kurzgeschlossen ist. Der Motor läuft also als Atkinsonscher Repulsionsmotor mit verringerter Ständerspannung an. Dabei ist gleichzeitig der Erregerstrom kleiner als bei Vollast, und zwar aus folgendem Grunde. Die Arbeitswicklung  $C$  besitzt eine größere Windungszahl als der Läufer  $A$ , so daß in der Anlaufschaltung der Strom in  $C$  kleiner ist als in  $A$ . Sobald aber der Schalter  $S$  geöffnet wird, arbeitet der Motor mit doppelter Speisung und nun ist Feld- und Ankerstrom gleich.

Eine weitere Schaltung ist in Fig. 117 dargestellt. Der Haupttransformator  $T_1$  liefert die feste Sekundärspannung  $e_2$ , außerdem der regelbare Zusatztransformator eine Spannung  $e'_2$ , die  $e_2$  unterstützt oder ihr entgegenwirkt, je nach der Stellung der Anschlüsse  $m$  und  $n$ . Auf diese Weise läßt sich die Anlaufspannung des Motors beliebig einstellen. Der Transformator  $T_2$  besorgt durch den Anschluß  $0$  die richtige Spannungsverteilung für die doppelte Speisung des Ankers. Bei Anlauf kann entweder durch  $0$  die Arbeitswicklung  $C$  kurzgeschlossen sein, so daß der Motor als Reihenschlußmotor mit kurzgeschlossener Ausgleichswicklung  $C$  anläuft, oder aber es wird der Motorstromkreis  $A B$  kurzgeschlossen, so daß der Motor als Repulsionsmotor mit Speisung der Erregerwicklung  $B$  durch den induzierten Ankerstrom anläuft.

Für die Beurteilung der Brauchbarkeit der besprochenen Anlaßschaltungen dürfen indessen nicht allein technische Gesichtspunkte in Frage kommen, vielmehr sind die wirtschaftlichen Gesichtspunkte von größerer Bedeutung.

Diese lassen sich kurz folgendermaßen festlegen.

1. Die Anlaßvorrichtungen müssen einfach und von möglichst geringem Gewichte sein.
2. Der Stromverbrauch bei Anlauf muß möglichst niedrig gehalten werden.

Was den ersten Punkt anbelangt, so ist, wie bereits früher bemerkt, grundsätzlich eine große Überlegenheit der Repulsionsmotoren mit Bürstenverschiebung zu verzeichnen, da die Möglichkeit vorliegt, deren Ständerwicklung unmittelbar mit Hochspannung zu speisen. Allerdings kann dieser Vorteil in Vollbahnbetrieb nicht ausgenützt werden, da die sehr hohen Betriebsspannungen von 10 000 und 15 000 Volt für eine unmittelbare Verwendung nicht in Frage kommen. So müssen auch diese Motoren durch Transformatoren gespeist werden, die einen wesentlichen Bestandteil aller Anlaufvorrichtungen bilden, so daß man zu dem Schlusse gelangt, daß in bezug auf den ersten der oben festgelegten Gesichtspunkte wesentliche Unterschiede bei den einzelnen Motorengattungen nicht vorhanden sind. Was nun die Wirtschaftlichkeit dieser Anlaufverfahren anbelangt, so ist zunächst darauf hinzuweisen, daß die Verwendungsmöglichkeit von Anlauftransformatoren an und für

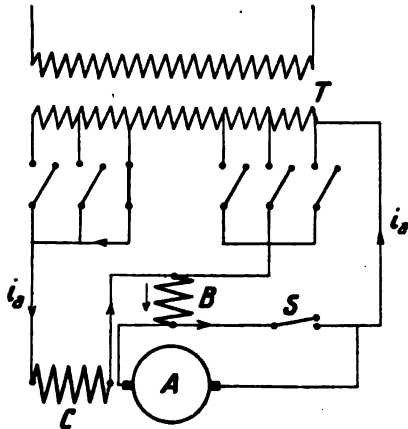


Fig. 116.

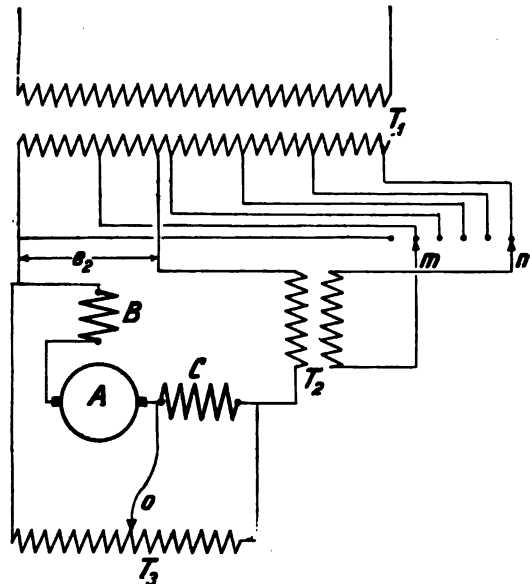


Fig. 117.

sich eine größere Wirtschaftlichkeit verbürgt, als sie bei Gleichstrommotoren mit Anlaufwiderständen erreichbar ist; denn bei Verwendung von Anlaufwiderständen muß stets der Leistungsanteil  $(e - e_a) i_a$  Watt in Joulesche Wärme verwandelt werden, während durch den Anlauftransformator dem Netze nur diejenige elektrische Leistung, nämlich  $i_1 e_1 = i_a e_a = i_a \frac{z_2}{z_1} \cdot e_1$  entnommen wird, welche für den Anlauf erforderlich ist. Will man bei Gleichstrombetrieb ein Anlaufmoment erzielen, welches doppelt so groß ist, als das Vollastmoment, so muß der Anlaufstrom doppelt so groß sein als der Vollaststrom, wenn das Feld in beiden Fällen das gleiche ist. Wenn demgegenüber ein einphasiger Reihenschlußmotor beispielsweise mit dem vierten Teil seiner normalen Spannung anläuft, wobei wieder der Kraftfluß den Vollastwert und der Anlaufstrom den doppelten Wert des Vollaststroms besitzen möge, so ist auch hier das Anlaufmoment doppelt so groß als das Vollastmoment, aber der dem Netze entnommene Anlaufstrom  $i_1$  ist wegen der Transformatorübersetzung nur halb so groß wie der Vollaststrom.

Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß bei Anlauf eine große Phasenverschiebung auftritt, weil das durch Drehung erzeugte  $E_K$  fehlt; die Folge davon ist ein verhältnismäßig großer wattloser Strom, so daß bei Anlauf eine große scheinbare Leistung aufgenommen wird, deren Größe bei gegebenem Anlaufmoment, bei gegebener Primärspannung und bei gegebener Motorleistung von der verwendeten Motorgattung abhängt. Über diese Frage sind von Niethammer und Siegel eingehende Untersuchungen<sup>1)</sup> angestellt worden, deren Ergebnis folgendes ist.

Der Reihenschlußmotor mit Ausgleichsspule mit oder ohne doppelte Speisung ist mit Rücksicht auf den ganzen Entwurf und hinsichtlich der Abmessungen allen Repulsionsmotoren überlegen.

Der Drehmomentfluß  $\Phi_v$  bei Lauf unter Vollast sollte für günstig entworfene Motoren größer sein als bei Anlauf, da wohl bei Lauf, nicht aber bei Anlauf die Funkenspannung  $E_K$  der kurzgeschlossenen Ankerspulen kompensiert werden kann. Eine Steigerung des Anlaufmomentes  $D_a$  über das normale Vollastmoment  $D$  ist also nicht durch erhöhten Kraftfluß, sondern durch erhöhten Strom anzustreben. Das wird erreicht

- a) durch Wahl hoher Eiseninduktion bei Vollast,
- b) durch Verminderung der Erregerleiterzahl oder Zwischenschaltung eines Erregertransformators zwischen die Erregerwicklung und die Arbeitswicklungen, welcher den Erregerstrom gegen den Arbeitsstrom herabsetzt.

Der für den gewöhnlichen Reihenschlußmotor übliche Anlauf mit herabgesetzter Spannung und ungeänderter Vollastschaltung erfolgt mit viel geringerem Voltampereverbrauch als der für Repulsionsmotoren übliche Anlauf mit voller Klemmenspannung und bei Anlauf erhöhtem Kraftfluß.

Den geringsten Voltampereverbrauch pro mkg Anlaufmoment und die bei gegebenem Drehmoment kleinste Funkenspannung  $E_K$  bei Anlauf erzielt man durch weitgehende Herabsetzung der Anlaufklemmenspannung  $E_a$  mit Hilfe eines Leistungstransformators und durch gleichzeitige Verminderung der Feld-EMK bei Anlauf.

Nach den Berechnungen der genannten Verfasser läßt sich der Voltampereverbrauch  $A_a$  für jedes mkg Anlaufmoment in Abhängigkeit von der normalen Drehzahl  $n$  durch folgende Gleichungen ausdrücken:

- a) Reihenschluß- und doppelt gespeiste Motoren

$$A_a = \frac{n}{8} \text{ bis } \frac{n}{3} \text{ Voltampere}$$

- b) Repulsionsmotoren mit Bürstenverschiebung

$$A_a = 1,3 n \text{ bis } 2,2 n$$

- c) Winter-Eichberg-Motor

$$A_a = \frac{n}{5} \text{ bis } \frac{4}{5} n.$$

Hieraus würde sich für den Vergleich des Déri-Motors mit dem unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotor folgendes ergeben.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1912, H. 11 u. 12.

Beide Motoren seien für gleiche normale Leistung gebaut und besitzen gleiche Polzahl. Der Reihenschlußmotor arbeite normal mit einem Synchronismusgrad  $v = 3$ , während der Déri-Motor nach dem früher gesagten mit dem Synchronismusgrad 1 arbeiten muß. Die Drehzahl des Reihenschlußmotors ist also dreimal so groß als die des Déri-Motors. Dementsprechend würde sich für den Déri-Motor ein Voltampereverbrauch bei Anlauf ergeben, der 2,2 bis 3,5 mal so groß wäre als der des unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotors gleicher Leistungsfähigkeit.

Die Anlaufschaltungen stellen die erste Stufe der Schaltungen zur Drehzahlregelung dar.

Die Drehzahl der Wechselstromkommutatormotoren kann ebenso wie die der Gleichstrommotoren durch Änderung des Drehmomentflusses oder der Ankerspannung geregelt werden. Die zuerst genannte Möglichkeit bietet indessen bei Reihenschlußmotoren mit unmittelbarer oder induktiver Ankerspeisung insofern Schwierigkeiten, als Anker- und Erregerstrom in bestimmtem Verhältnis zueinander stehen, das nur durch Änderung der Erregerwindungszahl oder durch Einschaltung eines Transformators mit regelbarem Übersetzungsverhältnis im Erregerstromkreis geändert werden kann.

Ein solcher Transformator ist stets mit dem Winter-Eichberg-Motor verbunden, so daß sich dessen Drehzahl durch Änderung des Drehmomentflusses regeln ließe. Indessen spricht bei diesem Motor gegen eine derartige Regelung die Forderung, den Drehmomentfluß so einzustellen, daß die Phasenverschiebung aufgehoben wird und daß die Bedingungen für günstigste Stromwendung hergestellt werden. Aus diesem Grunde wendet man auch bei diesem Motor nur die Drehzahlregelung durch Änderung der Motorspannung an.

Bei den Motoren mit Bürstenverschiebung erfolgt dagegen die Änderung der Drehzahl durch Änderung des vom Läufer erzeugten Drehmomentflusses, denn jeder Bürstenstellung entspricht ein anderes Verhältnis der Erregeramperewindungen des Läufers zu seinen Arbeitsamperewindungen. Zu der Drehzahlregelung durch Änderung der Motorspannung  $e_1$  möge noch folgendes bemerkt werden.

Sämtliche Motoranordnungen streben dem Ziel zu, die aufgenommene elektrische Leistung  $e_1 \cdot i_1 \cos \varphi_1$  möglichst vollkommen in mechanische Leistung  $E_R \cdot i_2 \cos \gamma$  zu verwandeln. (Über die Bedeutung der einzelnen Buchstaben vgl. Abschnitt 2.) Der Winkel  $\varphi_1$  soll möglichst wenig von  $0^\circ$  und der Winkel  $\gamma$  soll möglichst wenig von  $180^\circ$  abweichen. Des ferneren steht bei allen Motoren mit Reihenschlußverhalten bei ungeänderter Motoranordnung, also bei ungeänderter Zahl der Erregerwindungen und gleichbleibender Bürstenstellung,  $i_1$  und  $i_2$  in einem festen gegenseitigen Verhältnis. Daraus folgt dann, daß auch ein bestimmtes Verhältnis zwischen  $E_R$  und  $e_1$  bestehen muß. Nun ist  $E_R = Z \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{\Phi_v}{\sqrt{2}} 10^{-8}$  Volt  $= e_1 \cdot e_1$ . Da ferner unter gleichen Voraussetzungen sowohl  $i_1$  als auch  $i_2$  dem Drehmomentfluß  $\Phi_v$  proportional ist, da ferner ein bestimmtes Drehmoment  $D$  einen bestimmten Wert des Produktes  $\Phi_v \cdot i_2$  voraussetzt, folgt, daß bei ungeändertem Dreh-

moment auch  $\Phi_v$  eine so gut wie unveränderliche Größe besitzt. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache läßt sich die obige Spannungsgleichung in der Form  $E_R = c_1 \cdot e_1 = n \cdot c_2$  ausdrücken, woraus weiter folgt, daß  $n = C \cdot e_1$  ist, oder in Worten ausgedrückt: Wenn der Motor ein bestimmtes Drehmoment zu erzeugen hat, so ändert sich seine Drehzahl in bestimmtem Verhältnis zu seiner Klemmenspannung.

Im folgenden sind die gebräuchlichen Arten der Drehzahlregelung, die sich nach dem bisher gesagten von selbst erläutern, veranschaulicht.

Das Schaubild der Fig. 118 zeigt das Betriebsverhalten eines unmittelbar gespeisten Hauptstrommotors der Siemens-Schuckertwerke bei 150, 175, 225, 275 und 325 Volt an den Motorklemmen.

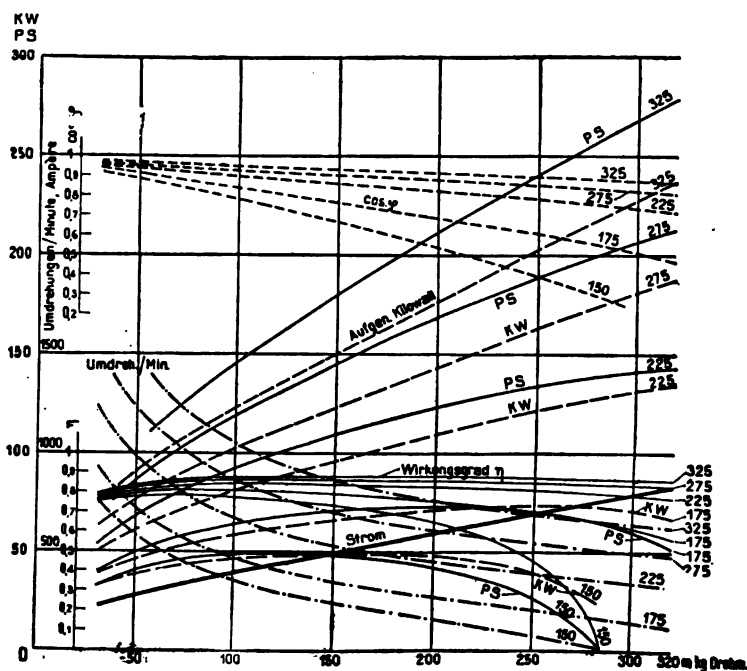


Fig. 118.

Fig. 119 kennzeichnet das Verhalten eines direkt gespeisten Hauptstrommotors der Maschinenfabrik Örlikon bei verschiedenen Werten der Motorspannung.

Zum Vergleich diene Fig. 120, welche das Betriebsverhalten des gleichen Motors bei Speisung mit Gleichstrom darstellt. Schließlich läßt Fig. 121 die Anlaufverhältnisse des gleichen Motors bei Wechselstrom- und Gleichstromspeisung erkennen. Es ist ersichtlich, daß für gleiche Zugkraft der Motor mit Wechselstrom um eine Kleinigkeit ungünstiger arbeitet, was auf die größeren Verluste bei Wechselstrom zurückzuführen ist. Dieser Unterschied nimmt indessen bei wachsender Motorspannung mehr und mehr ab.

Den Einfluß der Bürstenverschiebung eines Déri-Motors auf Drehmoment und Drehzahl zeigen die folgenden Schaubilder, die sich auf einen Motor von



Brown, Boveri & Cie. beziehen, der zum Betrieb der Lokomotiven der Rhätischen Bahn dient. Zunächst zeigt Fig. 122a, wie das Anlaufmoment in Ab-

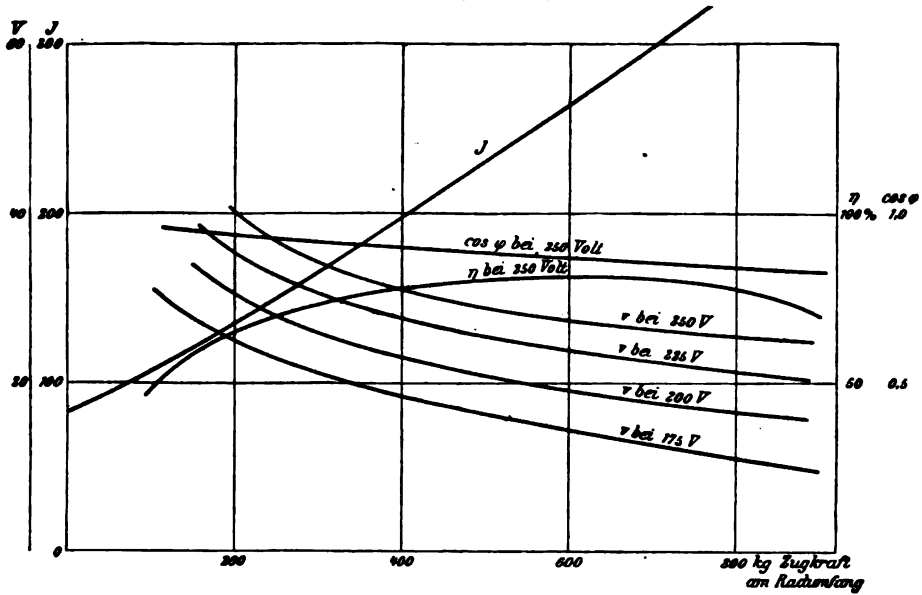


Fig. 119.

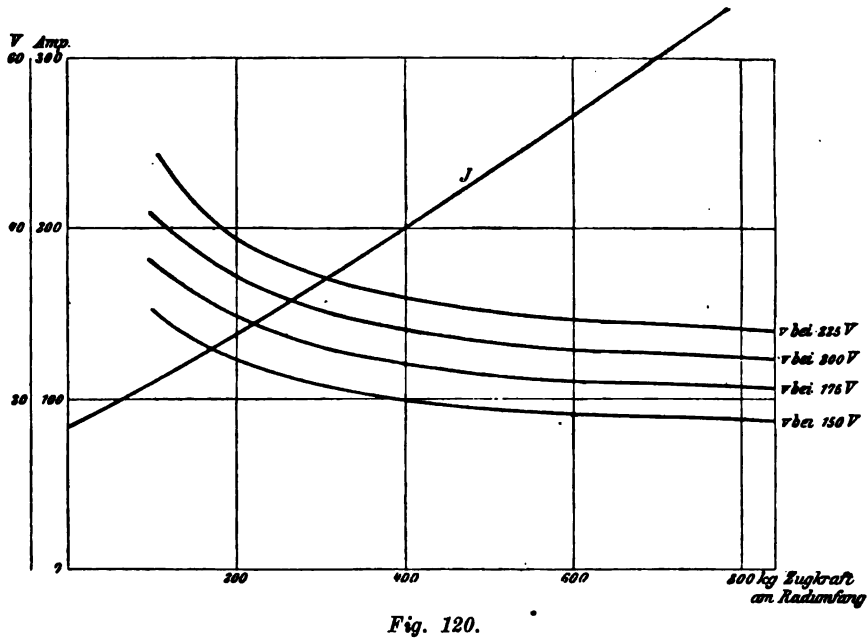


Fig. 120.

hängigkeit vom Winkel  $\beta$  zunächst von  $\beta = 0$  ab sehr rasch ansteigt, um dann nach Erreichung eines Höchstwertes allmählich wieder auf den Wert Null zu fallen. Beim Anlassen geht man von  $\beta = 90^\circ$  aus und verkleinert allmählich diesen Winkel.

In Fig. 122 b ist die Abhängigkeit der Leistung des Motors von der Drehzahl bei verschiedenen Werten des Winkels  $\beta$  bei gleichbleibender Ständer spannung dargestellt.

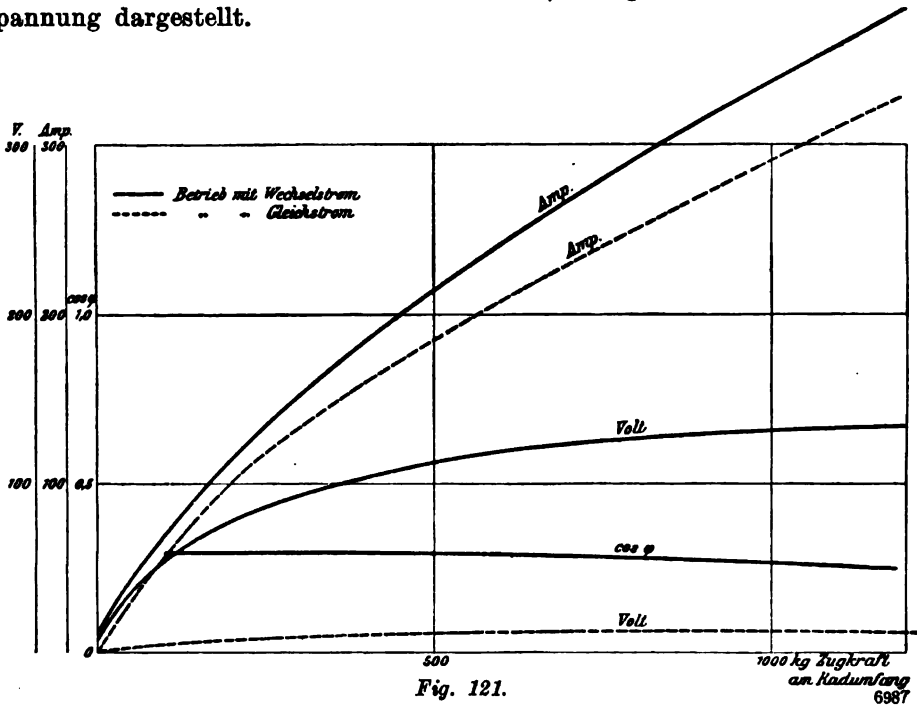


Fig. 121.

Über das Betriebsverhalten eines von der gleichen Firma für die elektrische Bahn Martigny-Orsières gebauten Déri-Motors geben die folgenden Schau-

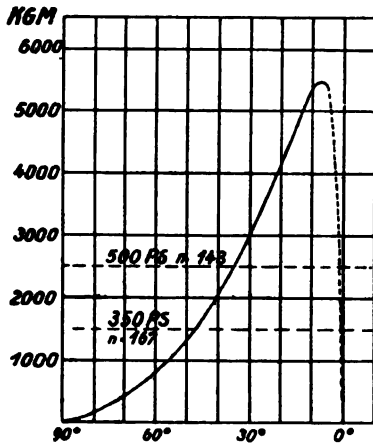


Fig. 122 a.

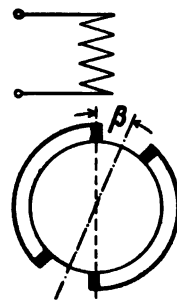


Fig. 122.

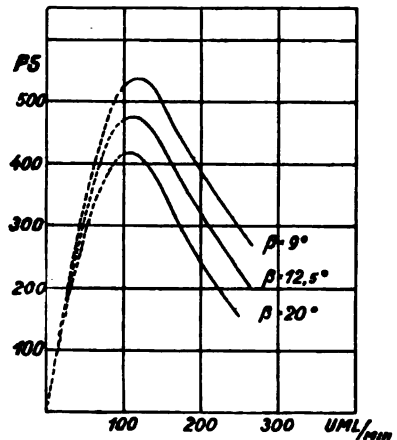


Fig. 122 b.

bilder Fig. 123 bis 126 Auskunft. Die in diesen Diagrammen eingezeichneten Winkel stellen die Winkel der Verschiebung der beweglichen Bürsten gegenüber den feststehenden dar, d. h. den jeweiligen Winkel  $180^\circ - 2\beta$ .

Fig. 127 erläutert das Verhalten eines Winter-Eichberg-Motors der Allgemeinen Electricitätsgesellschaft in Abhängigkeit von verschiedenen Werten der Klemmenspannung. Stufe 1 entspricht dabei 355 Volt, Stufe 2 — 398 Volt, 3 — 436 Volt, 4 — 573 Volt, 5 — 622 Volt, 6 — 622 Volt. Dabei unterscheidet sich Stufe 6 von Stufe 5 nur dadurch, daß in der letzten Stufe die Wendepolwicklung (vgl. Abschnitt 11) eingeschaltet wird. —

Eine Verbindung von Spannungsregelung und Bürstenverschiebung innerhalb gewisser Grenzen ist bei der in Fig. 128 dargestellten, von den Bergmann-Electricitätswerken angewendeten Schaltung möglich.

Die Ständerarbeitswicklung besteht aus den beiden Wicklungsanteilen  $C$  und  $C'$ , deren magnetische Achsen um  $90^\circ$  versetzt sind. Dabei ist  $C'$  so geschaltet, daß die magnetomotorische Kraft  $M_{C'}$  derjenigen der Erregerwicklung  $B$ , also  $M_B$  entgegengerichtet ist, so daß, wenn die Ankerbürsten in der neutralen Zone, also in der Achse von  $C$  stehen, der Drehmomentfluß geschwächt wird. In dieser Stellung ist  $M_A = M_C$ . Verschiebt man nun die Bürsten um den Winkel  $\alpha$  in der Drehrichtung aus der  $C$ -Achse, so verkettet sich jetzt nur noch der Anteil  $M_2 \cos \alpha = M_{2x}$  mit  $M_C$ , während der Anteil  $M_2 \sin \alpha = M_{2y}$  sich mit  $M_{C'}$  verkettet. Während also bei der Bürstenstellung  $\alpha = 0$  die Wicklung  $C'$  einen Kraftfluß erzeugte, der den Drehmomentfluß  $\Phi_v$  schwächt, nimmt jetzt  $C'$  an der magnetischen Verkettung teil, so daß der Drehmomentfluß  $\Phi_v$  um so mehr seinen  $M_B$  entsprechenden Wert annimmt, je vollkommener der in  $C'$  erzeugte Kraftfluß durch den Anteil  $M_{2y}$  aufgehoben wird.

Die Wicklung  $C$  läßt sich so bemessen, daß über einen verhältnismäßig

Zipp, Vollbahnlokomotiven.

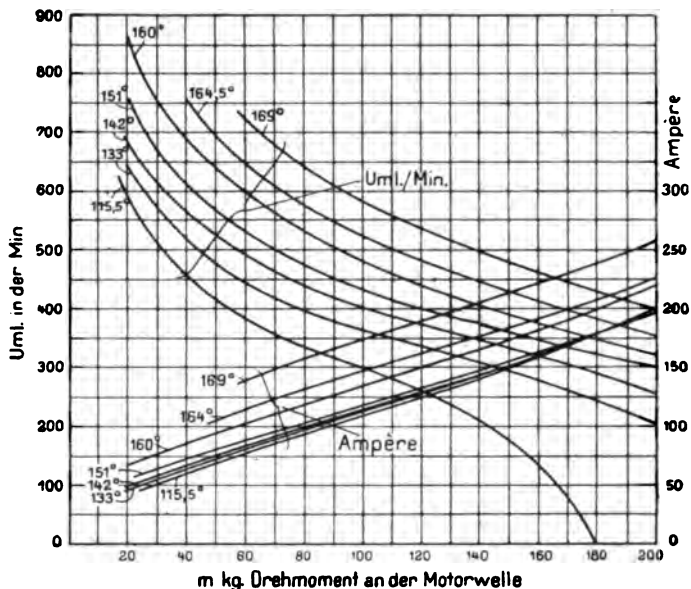


Fig. 123.

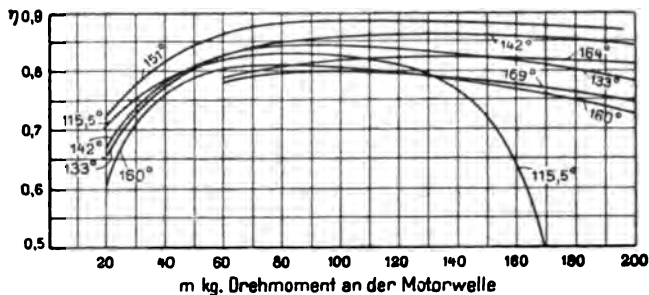


Fig. 124.

Während also bei der Bürstenstellung  $\alpha = 0$  die Wicklung  $C'$  einen Kraftfluß erzeugte, der den Drehmomentfluß  $\Phi_v$  schwächt, nimmt jetzt  $C'$  an der magnetischen Verkettung teil, so daß der Drehmomentfluß  $\Phi_v$  um so mehr seinen  $M_B$  entsprechenden Wert annimmt, je vollkommener der in  $C'$  erzeugte Kraftfluß durch den Anteil  $M_{2y}$  aufgehoben wird.

Die Wicklung  $C$  läßt sich so bemessen, daß über einen verhältnismäßig

großen Bereich der Bürstenverschiebung  $\alpha$  der Anteil  $M_{2y}$  durch  $M'_C$  vernichtet wird, so daß das ganze Ankerfeld bei allen Bürstenstellungen aufgehoben ist, und der Anker bei allen Bürstenstellungen funkenfrei läuft.

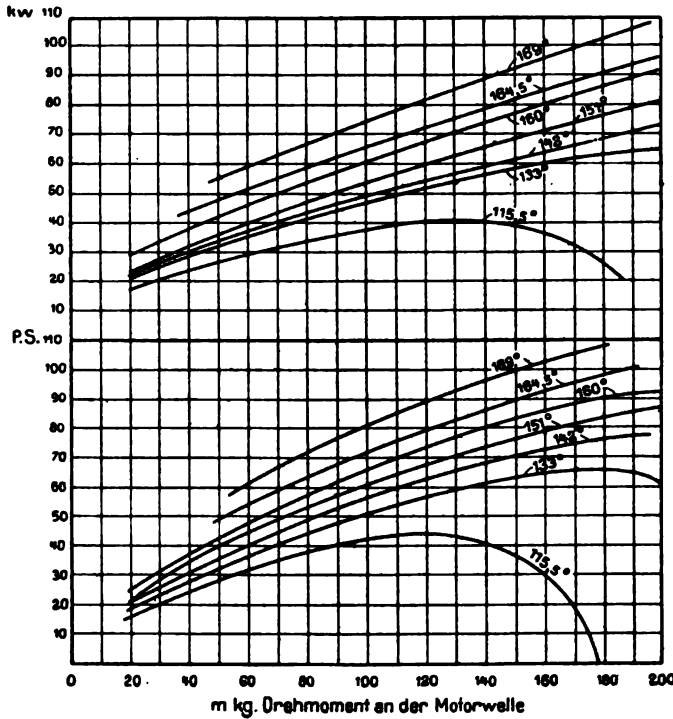


Fig. 125.

Dabei wächst  $\Phi_y$  mit wachsendem Winkel  $\alpha$ , so daß die Drehzahl zunächst sinkt. Da aber gleichzeitig mit wachsendem  $\alpha$  die Zahl der wirksamen Ankerleiter auf den Betrag  $Z_2 \cos \alpha$  sinkt, muß die Drehzahl des Ankers im Verhältnis  $\frac{1}{\cos \alpha}$  ansteigen.

Die Gesamtwirkung beider Einflüsse ist nun die, daß bis zu einer gewissen Winkelverschiebung die Kraftflußverstärkung zunimmt und die Drehzahl sinkt, während bei noch weiter gehender Winkelverschiebung die Verminderung der wirksamen Ankerleiter

sich dadurch geltend macht, daß die Drehzahl wieder wächst.

Es ist demnach nur eine beschränkte Bürstenverschiebung, von der C-Achse in der Drehrichtung ausgehend, für die Drehzahlregelung brauchbar.

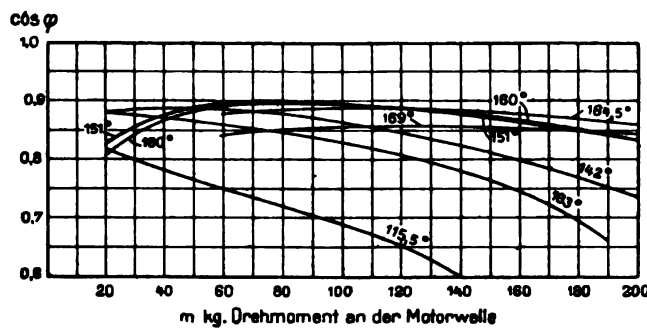


Fig. 126.

Man kann nun gleichzeitig den Motor an verschiedene Spannungsstufen des Transformators legen und verfährt bei der Regelung so, daß man zunächst die Bürsten um den höchstzulässigen Winkel  $\alpha$  verschiebt, dann den Motor an die niedrigste Spannungsstufe legt und

dann die Bürsten allmählich in die C-Achse zurückschiebt. Hierbei steigt die Drehzahl auf den der nächsten Spannungsstufe entsprechenden Wert, die der wieder um  $\alpha$  verschobenen Bürstenstellung entspricht. Demgemäß unterbricht man den Motorstromkreis, sobald die Bürsten in der C-Achse stehen,

verschiebt sie wieder um den Winkel  $\alpha$  und legt die zweite Spannungsstufe an. Hierauf steigert man die Drehgeschwindigkeit wieder, indem man die Bürsten in die C-Achse zurückstellt, unterbricht den Motorstrom, verschiebt die Bürsten wieder um  $\alpha^\circ$  und legt die dritte Spannungsstufe an den Motor.

Was nun die Schaltung der Motorwicklungen anbelangt, so können diese entweder sämtlich in Reihe geschaltet sein, oder die Wicklungen C und C' sind kurzgeschlossen, oder der Motor arbeitet mit doppelter Speisung, wie beispielsweise in Fig. 128a dargestellt. In den beiden letzteren Fällen schwingt zwischen C und A und zwischen C' und A ein Transformatorfluß, welcher bei der doppelten Speisung die für die Stromwendung richtige Phase hat.

Die Drehrichtung aller Kommutatormotoren wird dadurch geändert, daß man die Stromrichtung entweder in den Erregerwicklungen oder im Anker umkehrt. Dabei ist dafür

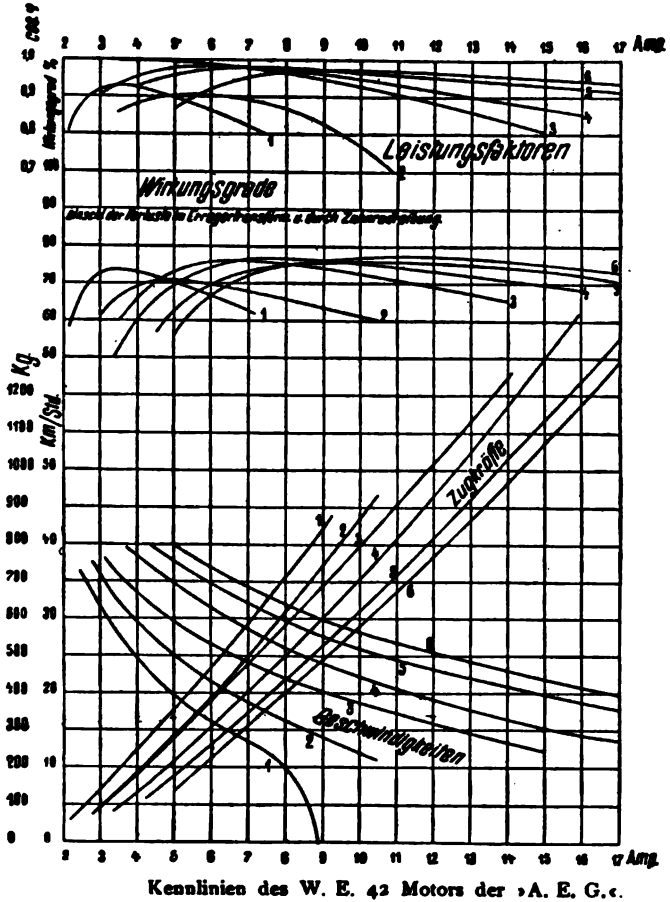


Fig. 127.

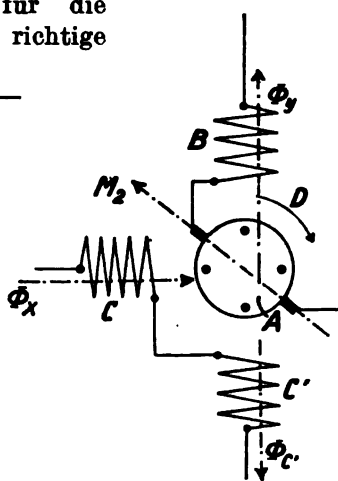


Fig. 128.

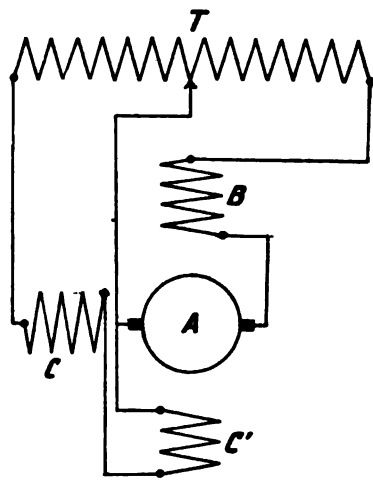


Fig. 128a.

Sorge zu tragen, daß auch die Ausgleichs- und Wendepolwicklungen in dem der geänderten Stromrichtung im Anker entsprechenden Sinne angeschlossen werden.

Besitzt der Motor eine gemischte Wendepolwicklung und ist deren Hauptstromanteil mit der Erregerwicklung vereinigt (vgl. Fig. 59), so daß also die Achse des Erregerfeldes gegen die Bürstenverbindungsline um einen Winkel  $90 - \alpha$  bei entsprechender Drehrichtung geneigt ist, so muß bei Änderung der Drehrichtung diese magnetische Achse eine Neigung gegen die Bürstenverbindungsline um  $90 + \alpha$  besitzen. Zu diesem Zwecke wird die auf den Ständer verteilte Erregerwicklung an bestimmten Stellen aufgeschnitten, um für die beiden Drehrichtungen geeignete Anschlußpunkte zu erhalten.

Die einfachste Schaltung erhält man in den meisten Fällen dadurch, daß man den Strom in der Erregerwicklung umsteuert; diese Methode wird aus dem angegebenen Grunde in der Mehrzahl der Fälle gewählt, wobei ein Umschalter in der bekannten Form der Schaltwalze, der sog. Fahrrichtungsschalter, diese Umschaltung bewirkt.

Bei den Kommutatormotoren mit induktiver Ankerspeisung müssen sinntsprechend die Klemmen der Erregerwicklung *B* oder diejenigen der Arbeitswicklung *C* (vgl. Fig. 30) vertauscht werden.

Beim Winter-Eichberg-Motor, bei welchem die Ankerwicklung selbst Erregerwicklung ist, kommt dementsprechend auch eine Vertauschung der Anschlußleitungen zu den Erregerbürsten in Betracht.

Bei den Repulsionsmotoren mit Ankererregung erfolgt die Umsteuerung dadurch, daß die beweglichen Bürsten aus der Anlaufstellung entweder nach links oder nach rechts verschoben werden.

#### 14. Betriebsspannung und Wellenzahl des Bahnmotors.

Die Betriebsspannung des Motors ist durch die Rücksicht auf einwandfreie Stromwendung beschränkt. Zunächst darf, wie bei der Besprechung der einzelnen Motorgattungen nachgewiesen wurde, der Drehmomentfluß einen bestimmten Wert nicht überschreiten, damit die in den durch die Bürsten kurzgeschlossenen Ankerwindungen durch Transformation entstehende EMK den für gute Stromwendung höchstzulässigen Wert von etwa 7 Volt nicht überschreitet.

Nach Arnold<sup>1)</sup> läßt sich diese EMK  $E_{TK}$  durch die Gleichung

$$E_{TK} = \pi \sqrt{2} \sim \cdot W_K \frac{Z}{2K} \bar{\Phi} 10^{-8} \text{ Volt}$$

darstellen, worin

$\sim$  = Zahl der sekundlichen Wellen

$W_K$  = Zahl der zwischen den Kanten einer Bürste in Reihe geschalteten Ankerspulen

$Z$  = Zahl der Ankerstäbe

$K$  = Kommutatorlamellenzahl

ist.

<sup>1)</sup> Arnold, Wechselstromtechnik, 5. Band, 2. Teil, S. 543.

Für die durch Umlauf im Kraftfluß  $\Phi$  erzeugte EMK  $E_R$  ergibt sich ferner die Gleichung

$$E_R = \frac{p}{a} \frac{n}{60} Z \frac{\bar{\Phi}}{\sqrt{2}} 10^{-8}$$

worin  $p$  = Zahl der Polpaare des Motors  
 $a$  = Zahl der Ankerstromzweigpaare  
 $n$  = minutliche Drehzahl

ist.

Zu der Größe  $W_K$  ist zu bemerken, daß sie bei laufendem Anker zwischen einem niedrigsten und höchsten Werte schwankt. Als Mittelwert kommt die Größe

$$W_K = \frac{b_1}{\beta} \cdot \frac{p}{a}$$

in Betracht, worin

$b_1$  = Bürstenbreite  
 $\beta$  = Lamellenteilung des Kommutators  
 $p$  = Zahl der Polpaare  
 $a$  = Zahl der Ankerstromzweigpaare

ist.

Durch Vereinigung der beiden Gleichungen für  $E_{TK}$  und  $E_R$  erhält man

$$E_R = \frac{E_{TK} \cdot \beta \cdot K \cdot n}{\pi \cdot \sim b_1 \cdot 60}$$

Hierin ist  $\beta \cdot K$  der Kommutatorumfang und  $\beta K \frac{n}{60}$  die Umfangsgeschwindigkeit  $V$  des Kommutators. Demnach ist

$$E_R = \frac{E_{TK} \cdot V}{\pi \cdot \sim b_1}$$

Wenn nun  $E_{TK}$  mit 7 Volt begrenzt ist, ferner  $V$  mit 33—35 m/sec und wenn ferner die Bürstenbreite mit 1 cm angenommen wird, so erhält man als größtmöglichen Wert der EMK  $E_R$

bei 50 sekundlichen Wellen	150 Volt
„ 25 „ „	300 „
„ 15 „ „	500 „

Aus den Diagrammen der einzelnen Motoren geht hervor, daß sich die Klemmenspannung des Motors aus den durch Drehung und Transformatorwirkungen entstehenden elektromotorischen Kräften und aus den Spannungsabfällen zusammensetzt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden die Ohmschen Spannungsabfälle klein gehalten, und damit ferner die Phasenverschiebung möglichst klein wird, werden die induktiven Spannungsabfälle ebenso wie die durch Transformation entstehenden elektromotorischen Kräfte möglichst herabgedrückt.

Mit anderen Worten: Die Klemmenspannung des Motors darf nur um den Gesamtwert dieser Komponenten größer sein, als die oben ermittelten Werte für  $E_R$ .

Der Nachteil dieser geringen Klemmenspannung liegt darin, daß bei den hohen Leistungen großer Lokomotivmotoren der Kommutator große Ströme führen muß, wodurch die Bürstenzahl wächst und wodurch der

Wirkungsgrad infolge der vergrößerten Bürstenreibung abnimmt. Außerdem erfordern die großen Stromstärken schwere Schaltvorrichtungen, wodurch die auf die Gewichtseinheit bezogene Leistung der Lokomotive herabgedrückt wird.

Günstiger verhält sich in dieser Beziehung der Winter-Eichberg-Motor. Bei diesem kann während des Anlaufs der Drehmomentfluß durch den Erregertransformator herabgesetzt werden, so daß die Bedingung guter Stromwendung bei Anlauf erfüllt wird.

Im Lauf findet eine mehr oder minder vollkommene gegenseitige Aufhebung der in den kurzgeschlossenen Spulenabteilungen induzierten elektromotorischen Kräfte statt, so daß durch Erhöhung des Drehmomentflusses eine höhere Ankerspannung erreicht werden kann.

Die gebräuchlichen unmittelbar gespeisten Reihenschlußmotoren werden mit Spannungen, die zwischen 250 und 500 Volt liegen, betrieben, während man bei Motoren nach Winter-Eichberg bis etwa 800 Volt hinaufgeht. Beim Déri-Motor liegt die Ständerspannung noch höher; so werden beispielsweise die von Brown, Boveri & Cie. für die Wiesentalbahn gelieferten Motoren mit 1200 Volt betrieben.

---

Die Wellenzahl besitzt bedeutenden Einfluß auf die Stromleitungen und auf die Wirkungsweise der Bahnmotoren.

Hohe Wellenzahlen verursachen großen induktiven Spannungsabfall in Oberleitung und Schienen und vergrößern die Ströme, welche durch Transformatorwirkung in den von den Bürsten kurzgeschlossenen Spulen der Motoren entstehen. Von diesem Standpunkte aus erscheint eine möglichst weitgehende Herabsetzung der Wellenzahl geboten. Auf der anderen Seite werden aber die Transformatoren sowohl auf den Lokomotiven als auch im Kraftwerk und die Stromerzeuger schwerer und teurer, wenn die Wellenzahl abnimmt. Dagegen wird wieder bei sinkender Wellenzahl die Phasenverschiebung in den Motoren kleiner, und wegen der Verringerung der Streuinduktion kann der Luftspalt zwischen Ständer und Läufer vergrößert werden, so daß die Lagerung des Motorankers geringere Schwierigkeiten macht. Außerdem können die unmittelbar gespeisten Motoren mit um so höheren Spannungen betrieben werden, je niedriger die Wellenzahl ist.

Ganz allgemein läßt sich sagen, daß der unmittelbar gespeiste Reihenschlußmotor um so günstiger arbeitet, je kleiner die Wellenzahl ist, da sich sein Betriebsverhalten mit sinkender Wellenzahl demjenigen bei Gleichstrombetrieb nähert. Dagegen werden alle Motoren, die mit induktiver Leistungsübertragung auf den Läufer arbeiten, um so günstiger sich verhalten, je größer die Wellenzahl ist.

Diese Tatsachen lassen sich durch folgenden Grundsatz zum Ausdruck bringen: Für alle Bahnbetriebe mit häufigen Beschleunigungsperioden ist der unmittelbar gespeiste Reihenschlußmotor bei niedriger Wellenzahl zweckmäßig, während die Repulsionsmotoren mit hohen Wellenzahlen für solche Fälle hauptsächlich in Betracht kommen, wo es sich darum handelt, lange Strecken ohne Aufenthalt zu durchfahren.

Bei gegebener Drehzahl der Motoren muß ferner die Polzahl und damit



die Zahl der Bürsten um so größer werden, je höher die Wellenzahl ist; desto größer wird auch im allgemeinen der Durchmesser des Kollektors werden,

So sprechen also gewichtige Gründe für eine Erniedrigung der Wellenzahl, die auch noch von einem anderen Gesichtspunkte aus geboten ist. Je höher diese nämlich ist, desto stärker werden die auf benachbarte elektrische Leitungen, vor allen Dingen auf die Schwachstromleitungen übertragenen Störungen, die auf induktive und Kapazitätswirkungen zurückzuführen sind.

Die Geschichte des elektrischen Vollbahnbetriebes lehrt denn auch, daß man im Laufe der Jahre die Wellenzahl ständig herabgesetzt hat und auch in der Literatur finden sich zahlreiche Erörterungen, die alle auf die Zweckmäßigkeit geringer Wellenzahlen hinweisen<sup>1)</sup>. Man lehnte sich zunächst an die amerikanische Praxis an, die mit 15 Wellen in der Sekunde günstige Erfahrungen gemacht hatte, ging dann aber auf  $16\frac{2}{3}$  sekundliche Wellen über, und zwar aus folgendem Grunde.

Die Wirtschaftlichkeit der großen Bahnkraftwerke wird, wie in Abschnitt 20 erörtert ist, wesentlich dadurch verbessert werden, daß auch elektrischer Strom für industrielle und andere Zwecke abgegeben wird. Es ist dabei beispielsweise denkbar, daß private und öffentliche Kraftwerke, z. B. Überlandzentralen, ihren eigenen Betrieb aufgeben und billigen Strom aus den Großkraftwerken der Staatsbahnen beziehen. In solchen Fällen wird es sich häufig darum handeln, den einphasigen Wechselstrom in Drehstrom umzuwandeln, und zwar in solchen von 50 sekundlichen Wellen. Es ist ferner damit zu rechnen, daß zahlreiche Kraftbetriebe und Beleuchtungsanlagen auf Bahnhöfen bereits heute mit Drehstrom von 50 Wellen aus Überlandkraftwerken gespeist werden, die später an die bahneigenen Kraftwerke anzuschließen sind. Die Bauart und der Betrieb der erforderlichen Umformer verlangt nun, daß das Verhältnis zwischen der Wellenzahl des aufgenommenen Wechselstroms und des abgegebenen Drehstroms eine ganze Zahl ist.

In Amerika, wo 60 Wellen gebräuchlich sind, hat man aus diesen Gründen für den Bahnbetrieb  $\frac{60}{4} = 15$  Wellen gewählt. Für 50 Wellen, wie sie in Deutschland üblich sind, würde demnach für den Bahnbetrieb die Zahl  $\frac{50}{3} = 16\frac{2}{3}$  in Betracht kommen.

Diesen Gründen haben die preußischen, bayrischen und badischen Staatsbahnverwaltungen im Jahre 1911 durch ein Übereinkommen Rechnung getragen, wonach als Wellenzahl für den Vollbahnbetrieb die Zahl  $16\frac{2}{3}$  in der Sekunde vereinbart worden ist. Gleichzeitig wurde mit Rücksicht darauf, daß unter Umständen die Lokomotiven der einen Verwaltung auf benachbarte Strecken einer anderen Verwaltung übergehen müssen, eine einheitliche Fahrdrabtspannung von 15 000 Volt festgelegt.

### 15. Elektrische Widerstandsbremung und Arbeitsrücklieferung durch Kollektormotoren.

Die Widerstandsbremung eines Motors beruht bekanntlich darauf, daß man den vom Netze abgetrennten Motor als Stromerzeuger auf Widerstände

<sup>1)</sup> E. K. B. 1906, S. 289; E. K. B. 1909, S. 81; E. K. B. 1909, S. 677; E. K. B. 1910, S. 187, 394; E. K. B. 1911, S. 127, 569; E. T. Z. 1909, Heft 27.

arbeiten läßt. Diese aus dem Gleichstrombetrieb bekannte Bremsart läßt sich auch auf den Wechselstromkollektormotor übertragen.

Als Beispiel für eine derartige Bremsung diene das Schaltbild der Fig. 129. Der Transformator ist durch den Hochspannungsschalter *A* von der Oberleitung getrennt und der Reihenschlußmotor *M* arbeitet auf die Sekundärwicklung von *T* unter Zwischenschaltung eines regelbaren Widerstandes *R*.

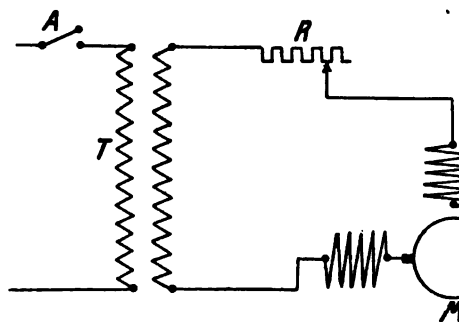


Fig. 129.

Der Motor *M* erregt sich als Gleichstromerzeuger und der Widerstand *R* setzt die erzeugte elektrische Arbeit in Wärme um.

Auch die Motoren mit kurzgeschlossenen Bürstensätsen können unter Umständen zur Widerstandsbremung verwendet werden.

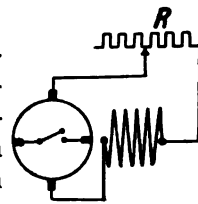


Fig. 130.

So kann z. B. der Winter-Eichberg-Motor gemäß Fig. 130 dadurch, daß man die Verbindung der kurzgeschlossenen Bürsten unterbricht, in eine Hauptstrommaschine verwandelt werden, die auf den Widerstand *R* arbeitet.

Es würde zu weit führen, wenn an dieser Stelle die übrigen Motor-gattungen auf die Möglichkeit der Widerstandsbremung hin untersucht würden. Es möge hier nur auf die unten mitgeteilten Aufsätze verwiesen werden<sup>1)</sup>.

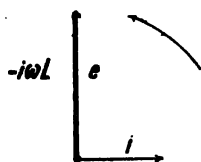


Fig. 131.

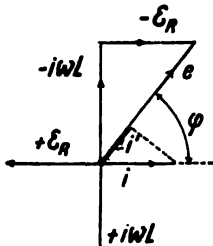


Fig. 132.

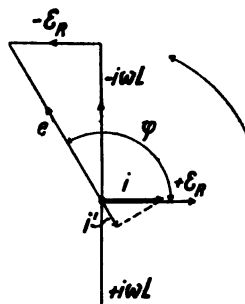


Fig. 133.

Wichtiger als die eigentliche Widerstandsbremung ist für den Bahnbetrieb die Nutzbremung, bei welcher elektrische Leistung in das Netz zurückgeliefert wird.

Diese Frage hat in dem neueren elektrotechnischen Schrifttum umfangreiche Erörterungen hervorgerufen, wobei die einzelnen Verfasser zu teilweise ganz entgegengesetzten Ergebnissen gelangten<sup>2)</sup>. Eine endgültige Klärung dieser Frage muß in Anbetracht der außerordentlich verwickelten

<sup>1)</sup> E. K. B. 1907, S. 361; E. K. B. 1907, S. 676; E. M. 1912, S. 677; E. M. 1912, S. 717.

<sup>2)</sup> E. T. Z. 1912, S. 1264; E. M. 1911, S. 4.

Vorgänge, besonders in den Motoren mit kurzgeschlossenen Bürstensätzen, mehr oder weniger der Erfahrung überlassen werden.

Die grundsätzliche Möglichkeit der Arbeiterücklieferung an das Netz ergibt sich aus dem Vektordiagramm des Kollektormotors. Fig. 131 stellt unter Vernachlässigung aller Verluste das Vektordiagramm des stillstehenden Reihenschlußmotors mit unmittelbarer Speisung dar. Dreht sich der Motor, so tritt die Umlaufspannung  $E_R$  auf und die Klemmenspannung besitzt nach Fig. 132 die beiden Teilspannungen  $-E_s$  und  $-E_R$ . Der von  $e$  und  $i$  eingeschlossene spitze Winkel  $\varphi$  ist das Kennzeichen dafür, daß die Leistung  $e \cdot i \cdot \cos \varphi$  aus dem Netz aufgenommen wird. Schaltet man nun bei ungeänderter Drehrichtung des Ankers die Feldwicklung um, so kehrt sich auch die Richtung von  $E_R$  um, wie Fig. 133 zeigt, und die Klemmenspannung  $e$ , die sich auch jetzt wieder aus den Teilspannungen  $-E_s$  und  $-E_R$  zusammensetzt, eilt dem Strome  $i$  um mehr als  $90^\circ$  vor. Während nach Fig. 132 der Leistungsanteil  $i'$  des Stromes  $i$  in die Richtung von  $e$  fiel, ist er nach Fig. 133 um  $180^\circ$  gegen  $e$  verschoben; die Leistung ist demnach negativ und wird an das Netz zurückgegeben.

So einfach nun an Hand der Diagramme der Übergang von der Motorwirkung zur Stromerzeugerwirkung erscheint, so große Schwierigkeiten treten bei der wirklichen Anwendung dieser Umschaltung auf.

Die Maschine arbeitet nämlich gleichzeitig als sich selbst erregender Gleichstromerzeuger, da ihre Klemmen nach Fig. 129 durch die Sekundärwicklung des Transformators geschlossen sind. Dieser neben dem ins Netz zurückfließenden Wechselstrom entstehende Gleichstrom wächst nun so lange an, bis die Maschine gesättigt ist, was im allgemeinen erst bei sehr großen Werten dieses Gleichstroms der Fall sein wird, so daß die eigentliche Arbeiterücklieferung hierdurch so gut wie ganz vereitelt wird. Man hat nun alle möglichen Vorschläge gemacht, um diese unzulässige Gleichstromselbsterregung der Maschine hintanzuhalten.

Sie bewegen sich hauptsächlich in folgenden Richtungen.

Am nächstliegenden ist die Verwendung von Motoren, die in stark-gesättigtem Zustand arbeiten. Derartige Motoren verhalten sich indessen wegen des beinahe gleichbleibenden Drehmomentflusses ähnlich wie Nebenschlußmotoren, so daß ihre Eignung für den Bahnbetrieb, der unbedingt ein stark ausgeprägtes Reihenschlußverhalten verlangt, fraglich erscheint.

Ein zweiter Vorschlag geht dahin, in den Motorstromkreis einen Widerstand  $R$  gemäß Fig. 129 einzubauen, durch welchen allerdings die Selbsterregung der Maschine herabgedrückt wird, der indessen auch einen nicht unbeträchtlichen Teil der erzeugten Wechselstromleistung vernichtet.

Am beachtenswertesten ist der dritte Vorschlag, der von Scherbius<sup>1)</sup> herrührt und der darauf beruht, daß der Anker vermittelt eines Stromtransformators mit dem Felde in Reihe geschaltet wird.

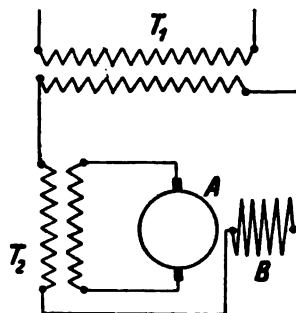


Fig. 134.

<sup>1)</sup> E. T. Z. 1912, S. 1266.

Nach dieser, in Fig. 134 dargestellten Schaltung ist die Gleichstromselbsterregung der Maschine unmöglich; allerdings wird durch den Sperrtransformator  $T_2$  die Betriebseinrichtung verwickelt. Nach den Versuchen von Scherbins konnte mit einer derartigen Anordnung ein Wirkungsgrad der Arbeitsrücklieferung von 50% erreicht werden.

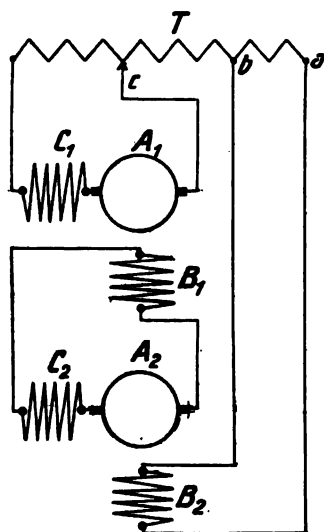


Fig. 135.

Einfacher gestaltet sich die Lösung dieser Aufgabe<sup>2)</sup>, wenn man den Motoren für den Zweck der Arbeitsrücklieferung Nebenschlußeigenschaften erteilt, wie im folgenden an einigen kennzeichnenden Beispielen beschrieben werden soll.

Bei Verwendung von 2 Motoren läßt sich nach einem Patent von Osnos (DRP 186 781) die in Fig. 135 dargestellte Schaltung herstellen. Die Feldwicklung  $B_2$  des zweiten Motors wird an eine Abteilung des Leistungstransformators  $T$  gelegt.

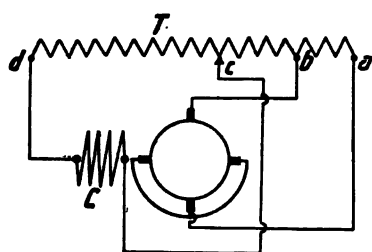


Fig. 136.

Der in  $B_2$  fließende Strom  $i_1$  eilt dann der Teilspannung  $e_2'$ , also auch der Gesamtspannung  $e_2$  um  $90^\circ$  nach. Im Anker  $A_2$  wird eine EMK  $E_2$  erzeugt, die mit  $i_1$  phasengleich ist und die in der Feldwicklung  $B_1$  des ersten Motors einen Strom  $i_2$  erzeugt, der hinter  $E_2$  um  $90^\circ$  zurückbleibt. Im Anker des ersten Motors entsteht also eine EMK  $E_1$ , welche mit  $i_1$  phasengleich ist, also hinter  $e_2$  um  $180^\circ$  zurückbleibt oder die bei passender Schaltung von  $B_2$  mit  $e_2$  in gleicher Phase ist. Der Anker des ersten Motors kann also zu einer passenden Spannungsstufe des Transformators parallel geschaltet werden und liefert Arbeit in diesen zurück.

Als weiteres Beispiel diene die in Fig. 136 dargestellte Nebenschlußerregung eines Winter-Eichberg-Motors. Das in der Richtung der Erreger-

<sup>1)</sup> E. K. B. 1911, S. 641; E. K. B. 1911, S. 721.

<sup>2)</sup> E. T. Z. 1910, S. 911.

bürsten schwingende Feld ist wieder gegen die Spannung  $e_2$  des Transformators praktisch um  $90^\circ$  verschoben. In diesem Felde dreht sich der Anker und in ihm entsteht eine EMK  $E_R$ , welche den Ankerstrom  $i$  erzeugt, der über die Arbeitsbürsten fließt und in der Arbeitswicklung  $C$  einen um  $180^\circ$  verschobenen Strom  $i_C$  hervorruft. Verfolgt man an Hand des Vektordiagramms die Lage dieses Stromes, so ergibt sich, daß bei geeignetem Anschluß der Wicklung  $C$  an eine passende Spannungsstufe  $e_1$  des Transformators dieser Strom gegenüber der Spannung  $e_1$  um mehr als  $90^\circ$  versetzt ist. Hat dieser Winkel den Wert  $\varphi$ , so ist die Leistung  $e_1 \cdot i_C \cdot \cos \varphi$  negativ, d. h. der als Stromerzeuger arbeitende Motor liefert elektrische Arbeit in den Transformator und durch dessen Vermittlung in das Netz.

Die in allen diesen Fällen durch den als Stromerzeuger arbeitenden Motor erzeugte elektrische Arbeit entstammt der lebendigen Energie des auslaufenden Zuges, der mithin durch diese Entziehung seines Arbeitsvorrates gebremst wird.

Eine solche Nutzbremung kann indessen nur dann in Betracht kommen, wenn es sich um Talfahrten längerer Dauer handelt und wenn die Neigung der Gefällsstrecke beträchtliche Werte besitzt. In allen anderen Fällen sind die zurückgewonnenen Arbeitsmengen verhältnismäßig so unbedeutend, daß in jedem einzelnen Falle eingehend erwogen werden muß, ob der erzielte Gewinn wirklich die größere Verwicklung und Verteuerung der Schalteinrichtungen zur Ermöglichung der Arbeitsrücklieferung rechtfertigt. Außerdem bietet die der Bergfahrt folgende Talfahrt willkommene Gelegenheit zur Abkühlung des bei der Bergfahrt stark beanspruchten Motors, der für den Fall, daß er zur Arbeitsrücklieferung benutzt werden soll, unter Umständen größer gewählt werden muß, wodurch die Lokomotive schwerer und ihr Eigenverbrauch größer wird. Aus diesen Gründen wird man in den weitaus meisten Fällen von der Arbeitsrücklieferung aus wirtschaftlichen Gründen absehen müssen.

## II. Kapitel.

# Der Arbeitsverbrauch einer Wechselstromlokomotive und die Wirtschaftlichkeit des einphasigen Vollbahnbetriebes.

### 16. Berechnung der Bewegungswiderstände.

Die von einer Lokomotive am Haken zu entwickelnde Zugkraft muß den Bewegungswiderständen des geschleppten Zuges das Gleichgewicht halten. Bei der Berechnung dieser Widerstände ist nicht nur das Gewicht des Zuges, sondern auch noch seine Zusammensetzung zu berücksichtigen, da der die Zugkraft wesentlich beeinflussende Luftwiderstand von der Art und Zahl der Wagen abhängt.

Der gesamte Bahnwiderstand  $W$  läßt sich durch eine Gleichung von der Form

$$W = \alpha + \beta \cdot V^2$$

ausdrücken, worin  $\alpha$  und  $\beta$  unveränderliche Größen sind und  $V$  die Geschwindigkeit in Stundenkilometer ist.

Dabei setzt sich  $W$  aus folgenden Anteilen zusammen.

1. Der Widerstand der rollenden Reibung zwischen Rad und Schiene ist so gut wie unabhängig von der Geschwindigkeit und hat den Wert

$$W_I = Q_2 \cdot 2,5 \text{ kg} \text{ oder } w_I = 2,5 \text{ kg/t,}$$

wenn  $Q_2$  das Tonnengewicht des Zuges ist;  $w_I$  hat für Lokomotive und Zug gleichen Wert.

2. Durch Stoßwirkungen entsteht ein Widerstand

$$W_{II} = Q_2 \cdot 0,0142 \left( \frac{V^2}{10} \right) \text{ kg}$$

oder

$$w_{II} = 0,0142 \left( \frac{V^2}{10} \right) \text{ kg/t;}$$

$w_2$  hat für Lokomotive und Zug gleichen Wert.

3. Der Luftwiderstand läßt sich ganz allgemein an Hand des Ausdruckes

$$W_{III} = k \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot F \cdot v^2$$

berechnen, wenn  $k$  eine Erfahrungszahl,  $\gamma$  das Gewicht der Raumeinheit Luft,  $g$  die Beschleunigung der Schwere,  $F$  die bewegte Fläche in Quadratmeter senkrecht zur Bewegungsrichtung und  $v$  die metrische Sekundengeschwindigkeit ist.

Der Bruch  $\frac{\gamma}{g}$  hat den Wert 0,1225 und nach den eingehenden Versuchen von Frank<sup>1)</sup> ergibt sich

$$k = 0,553 \text{ für kreisförmige Flächen,}$$

$$k = 0,582 \text{ für quadratische Flächen,}$$

die senkrecht zur Bewegungsrichtung stehen.

Es ist also, wenn man für  $k$  den Mittelwert einführt,

$$W_{III} = 0,07 F \cdot v^2.$$

Nun ist weiter

$$0,07 v^2 = 0,54 \left( \frac{V}{10} \right)^2,$$

wenn  $V$  die kilometrische Stundengeschwindigkeit ist. Der Luftwiderstand läßt sich also darstellen durch die Gleichung

$$W_{III} = 0,54 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \cdot F \text{ kg.}$$

Nach den Frankschen Versuchen ist für  $F$  folgender Wert einzusetzen:

- a) für die Lokomotive 1,1  $F'$ , wobei  $F'$  die Querprojektionsfläche der Lokomotive in  $m^2$  ist;
- b) für jeden Personenwagen und bedeckten Güterwagen 0,56  $m^2$ ;
- c) für jeden beladenen Güterwagen 0,32  $m^2$ ;
- d) für jeden offenen Güterwagen 1,62  $m^2$ ;
- e) außerdem für den ersten hinter der Lokomotive fahrenden Wagen, also den Dienst- oder Gepäckwagen 2  $m^2$ .

Besteht also ein Zug aus

- 1 Lokomotive ( $F' = 7,5 m^2$ ),
- 20 offenen leeren Güterwagen ( $20 \cdot 1,62 m^2$ ),
- 15 beladenen offenen Wagen ( $15 \cdot 0,32 m^2$ ),
- 10 beladenen gedeckten Wagen ( $10 \cdot 0,56 m^2$ ),

so ist

$$F = 7,5 \cdot 1,1 + 2 + 20 \cdot 1,62 + 15 \cdot 0,32 + 10 \cdot 0,56 = 53,05 m^2.$$

Ist ferner  $V = 45 \text{ km/Stde.}$ , so ist

$$W_{III} = \frac{0,54 \cdot 53,05 \cdot 45^2}{100} = 580 \text{ kg.}$$

4. Auf Steigungen tritt ein weiterer Widerstand  $W_{IV}$  hinzu, der eine ebenso große Zugkraft erfordert und dessen Größe sich folgendermaßen berechnet

Ist  $s$  die Steigung in Meter, bezogen auf 1000  $m$  der Fahrbahn, so wirkt von dem Gesamtgewicht  $Q_2 = 1000 Q_2 \text{ kg}$  in der Richtung der Fahrbahn die Seitenkraft  $Q_2 \cdot 1000 \cdot \frac{s}{1000} = Q_2 \cdot s \text{ kg}$ . Fährt der Zug eine Steigung

hinauf, so muß die Zugkraft diesen Widerstand überwinden; fährt der Zug zu Tal, so unterstützt jene Seitenkraft die Zugkraft. Es ist ganz allgemein

$$W_{IV} = \pm (Q_1 + Q_2) s \text{ kg}$$

wenn  $s$  in  $\text{‰}$  gegeben ist.

<sup>1)</sup> Z. V. d. I. 1906, S. 593; Z. V. d. I. 1907, S. 94.

5. In Gleiskrümmungen tritt ein Widerstand  $W_V$  auf, der abhängig ist vom Radstand  $d$  und vom Krümmungshalbmesser  $R$  des Gleisbogens. Versuche haben ergeben, daß sich dieser Widerstand darstellen läßt durch den Ausdruck

$$W_V = (Q_1 + Q_2) \frac{d}{R} \left( 180 - \frac{1000 d}{R} \right) \text{ kg für Personenzüge,}$$

$$W_V = (Q_1 + Q_2) \frac{d}{R} \left( 180 - \frac{2000 d}{R} \right) \text{ kg für Güterzüge.}$$

Hierbei ist wieder  $Q_1$  und  $Q_2$  das Gewicht der Lokomotive und des Zuges in Tonnen ausgedrückt und ferner ist sowohl  $d$  als auch  $R$  in Meter einzusetzen. Man kann auch schreiben:

$$W_V = (Q_1 + Q_2) r \text{ kg,}$$

wobei  $r$  der auf 1 Tonne des Zuggewichtes bezogene „Krümmungswiderstand“ ist.

Wenn z. B. der Radstand  $d$  gewöhnlicher Güterwagen 4 m und derjenige von Drehgestellen 2,5 m beträgt, so ergibt die Gleichung, daß Drehgestellwagen einen geringeren Widerstand in Gleiskrümmungen besitzen, als Wagen mit festgelagerten Einzelachsen.

Die Summe aller dieser Widerstände läßt sich demnach folgendermaßen darstellen. Es ist

$$W = (Q_1 + Q_2) \left( 2,5 + 0,0142 \left[ \frac{V}{10} \right]^2 + s + r \right) + 0,54 \left( 1,1 F' + 2 + n f \right) \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg.}$$

Für die Lokomotive allein ist

$$W_L = Q_1 \left( 2,5 + 0,0142 \left[ \frac{V}{10} \right]^2 + s + r \right) + 0,54 \cdot 1,1 F' \cdot \left( \frac{V}{10} \right)^2$$

und für den Zug allein ist

$$W_Z = Q_2 \left( 2,5 + 0,0142 \left[ \frac{V}{10} \right]^2 + s + r \right) + 0,54 \left( 2 + n f \right) \left( \frac{V}{10} \right)^2.$$

In diesen Ausdrücken stellt das Produkt  $n \cdot f$  die Summe aller für die Wagen des Zuges in Betracht kommenden zuschläglichen Flächen dar.

Der Bruch  $\frac{W_Z}{Q_2}$  ergibt den Zugwiderstand  $w$  bezogen auf die Tonne Zuggewicht. Für die üblichen Zugbildungen lassen sich an Hand der obigen Gleichung folgende mittleren Werte für  $w$  unter der Voraussetzung ebener gerader Fahrbahn berechnen.

1. Für Personenzüge mit einem Gewicht der einzelnen Wagen  $q_t = 30$  t:

$$w = 2,5 + 0,03 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

2. Für Personenzüge mit einem Gewicht der einzelnen Wagen  $q_t = 15$  t:

$$w = 2,5 + 0,04 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$



3. Für Personenzüge mit einem Gewicht der einzelnen Wagen  $q_t = 12$  t:

$$w = 2,5 + 0,044 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

4. Für Güterzüge, bestehend aus etwa 50 bedeckten Güterwagen mit einem mittleren Gewicht der einzelnen Wagen  $q_t = 12$  t:

$$w = 2,5 + 0,41 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

5. Für Güterzüge, bestehend aus etwa 50 beladenen offenen Güterwagen und einem Gepäckwagen bei einem mittleren Gewicht der einzelnen Wagen  $q_t = 15$  t:

$$w = 2,5 + 0,032 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

6. Für Güterzüge, bestehend aus etwa 50 leeren offenen Güterwagen mit einem Gewicht von je 5 t und mit einem Gepäckwagen mit dem Gewicht  $q_t = 15$  t:

$$w = 2,5 + 0,187 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

7. Für Güterzüge mit etwa 25 bedeckten und 25 offenen Güterwagen, von denen je die Hälfte leer und die andere Hälfte beladen ist, bei einem durchschnittlichen Gewicht der einzelnen Wagen  $q_t = 11$  t:

$$w = 2,5 + 0,053 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

Diese Gleichungen für den Tonnenzugwiderstand sind durch Strahl<sup>1)</sup> insofern erweitert worden, als er die verschiedenen Zahlenwerte den Gewichten der neueren Wagen angepaßt hat. Nach diesem Vorschlag ist zu setzen:

1. Für D-Züge, Eil- und Schnellzüge, sowie schwere Güterzüge (Kohlenzüge)

$$w = 2,5 + \frac{1}{40} \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

2. Für gewöhnliche Personenzüge

$$w = 2,5 + \frac{1}{30} \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

3. Für Eilgüterzüge

$$w = 2,5 + \frac{1}{25} \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

4. Für gewöhnliche Güterzüge gemischter Zusammensetzung

$$w = 2,5 + \frac{1}{20} \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

5. Für Leerwagenzüge aus zweiachsigen Güterwagen

$$w = 2,5 + \frac{1}{10} \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t.}$$

<sup>1)</sup> Z. V. d. I. 1913, S. 327.

Hruschka<sup>1)</sup> gibt für den Tonnenzugwiderstand einer elektrischen Lokomotive folgenden Wert an:

$$w_L = 2,5 + c \cdot \left(\frac{V}{10}\right)^2,$$

dabei ist

$$\begin{array}{ll} c \text{ bei 3 Treibachsen} & = 0,07 \text{ bis } 0,06, \\ c \text{ ,, 4 ,,} & = 0,065, \\ c \text{ ,, 5 ,,} & = 0,055. \end{array}$$

Als Mittelwert erhält man

$$w_L = 2,5 + \frac{1}{15} \left(\frac{V}{10}\right)^2 \text{ kg/t.}$$

Die Formel von Hruschka gibt etwas geringere Werte wie die von Franke, z. B. ist für eine Lokomotive von 70 t bei  $V = 80$  km

$$\begin{array}{ll} w \text{ nach Hruschka} & = 6,8, \\ w \text{ ,, Franke} & = 7,4. \end{array}$$

Es wird sich empfehlen, solange keine maßgebenden Versuchszahlen vorliegen, die an eingelaufenen elektrischen Lokomotiven gewonnen sind, die Frankesche Formel zu verwenden.

Die Berechnung des Arbeitsverbrauches eines fahrenden Zuges wird häufig so vorgenommen, daß man zunächst einen Wert  $w$  ermittelt, den man mit dem Gewicht des ganzen Zuges, also einschließlich Lokomotive multiplizieren kann.

Beispielsweise werde ein Eilzug von 200 t durch eine Lokomotive von 65 t befördert. Dann ist nach Hruschka bei  $V = 80$  km

$$w = \frac{65}{265} \left[ 2,5 + \frac{1}{15} \left(\frac{80}{10}\right)^2 \right] + \frac{200}{265} \left[ 2,5 + \frac{1}{40} \left(\frac{80}{10}\right)^2 \right]$$

$$w = 4,8 \text{ kg/t bezogen auf das ganze Zuggewicht.}$$

Nun muß sein

$$4,8 = 2,5 + x \cdot \left(\frac{80}{10}\right)^2$$

$$x = \frac{1}{28},$$

also

$$w = 2,5 + \frac{1}{28} \left(\frac{V}{10}\right)^2 \text{ kg/t.}$$

In ähnlicher Weise gelangt man an Hand der Frankeschen Formel für den Lokomotivwiderstand zu dem für den ganzen Zug gültigen Wert

$$w = 2,5 + \frac{1}{25} \left(\frac{V}{10}\right)^2 \text{ kg/t.}$$

Alle diese Gleichungen gelten nur für windstille Witterung. Die Berücksichtigung des durch Wind verursachten zusätzlichen Widerstandes ist außerordentlich schwierig, da Richtung und Stärke des Windes zwei weitere veränderliche Größen in die Gleichungen bringen würden.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1910, S. 518.

Strahl teilt in dem oben erwähnten Aufsätze eine Reihe von Versuchswerten mit, die den Einfluß des Windes auf den Zugwiderstand erkennen lassen und die nachstehend wiedergegeben sind.

1. Der Versuch wurde mit Wagenzügen, die aus vier- und sechsachsigen Personenwagen, teils Abteil- teils D-Wagen ohne Faltenbalgverbindung bestanden, auf der völlig ebenen und geraden Teilstrecke Isenbüttel—Dollbergen der Flachlandstrecke zwischen Wustermark und Hannover angestellt. Die Zugkräfte wurden dabei sowohl nach der Formel

$$w = 2,5 + \frac{1}{40} \left( \frac{V}{10} \right)^2 \text{ kg/t}$$

berechnet als auch durch einen Zugkraftmesser gemessen.

1	2	3	4	5	6	7
Reihe	Wagen Gewicht t	Geschwin- digkeit km/St	Steigung	Zugwiderstand kg		Witterung
				gemessen	berechnet	
1	450	92	1 : ∞	2000	2078	gut, windstill
2	450	91	1 : ∞	2100	2058	" "
3	450	92	1 : ∞	2100	2078	" "
4	450	95	1 : ∞	2000	2140	" "
5	514	88	1 : ∞	2400	2290	" "
6	514	91	1 : ∞	2300	2350	" "
7	514	94	1 : ∞	2600	2420	" "
8	253	95	1 : ∞	1300	1203	" "
9	253	94	1 : ∞	1200	1190	" "
10	253	91	1 : ∞	1150	1156	" "
11	253	98	1 : ∞	1300	1240	" "
12	315	90	1 : ∞	1600	1425	" "
13	315	93	1 : ∞	1600	1469	" "
14	398	91	1 : ∞	1800	1820	" "
15	398	93	1 : ∞	1900	1855	" "
16	315	90	1 : ∞	1600—1700	1425	Mittelwind schräg von vorn
17	315	95	1 : ∞	1800	1496	" " " "
18	392	93	1 : ∞	2000	1825	" " " "
19	450	94	1 : ∞	2500	2120	" " " "
20	450	95	1 : ∞	2600	2140	" " " "
21	450	100	1 : ∞	2700	2250	" " " "

2. Der Versuch wurde mit einem 53 Achsen starken und 492 t schweren Zuge aus vier- und sechsachsigen Personenwagen zwischen Wustermark und Hannover unternommen. Die Grundgeschwindigkeit betrug 90 km/St.

Bei der Hinfahrt von Wustermark nach Hannover wehte ein starker Seitenwind schräg von vorn; bei der Rückfahrt herrschte Windstille.

Datum	Strecke	Durchschnitts- leistung PS eff.	Durchschnitts- leistung PS ind.	Witterung
14. 3. 11.	Wustermark— Stendal	852	1266	starker Seitenwind
14. 3. 11.	Stendal—Lehrte	864	1225	" "
15. 3. 11.	Hannover— Stendal	690	1003	"Windstille"
15. 3. 11.	Stendal— Wustermark	690	986	"

An Hand dieser Versuchsergebnisse weist Strahl nach, daß sich die Zugwiderstandsgleichung unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit  $c$  in die Form

$$w = 2,5 + \frac{1}{40} \left( \frac{V + c}{10} \right)^2 \text{ kg/t}$$

für D-, Eil- und Personenzüge bringen läßt. Ist gleichzeitig noch eine Steigung von  $s$  ‰ zu überwinden, so ist

$$w = 2,5 + \frac{1}{40} \left( \frac{V + c}{10} \right)^2 + s \text{ kg/t.}$$

Setzt man für  $c$  den mittleren Wert von 12 km/St ein, entsprechend einem frischen Winde, so erhält man die in folgender Tabelle zusammengestellten Werte von  $w$ .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s ‰	V in km/St								
	0	10	20	30	40	60	80	100	120
1 : ∞	2,54	2,62	2,76	2,94	3,18	3,8	4,62	5,64	6,86
1 : 1000	9,54	3,62	3,76	3,94	4,18	4,8	5,62	6,64	7,86
1 : 500	4,54	4,62	4,76	4,94	5,18	5,8	6,62	7,64	8,86
1 : 400	5,04	5,12	5,26	5,44	5,68	6,3	7,12	8,14	9,36
1 : 300	5,87	5,95	6,09	6,27	6,51	7,13	7,95	8,97	10,19
1 : 200	7,54	7,62	7,76	7,94	8,18	8,8	9,62	10,64	11,86
1 : 150	9,21	9,29	9,43	9,61	9,85	10,47	11,29	12,31	13,53
1 : 100	12,54	12,62	12,76	12,94	13,18	13,8	14,62	15,64	16,86
1 : 60	19,24	19,32	19,46	19,64	19,88	20,5	21,32	22,34	23,56

Die Bedeutung dieser Gleichungen besteht weniger darin, eine genaue Berechnung der Zugwiderstände zu ermöglichen — dies ist für windstille Witterung mit einem hohen Grade der Genauigkeit möglich — sondern in erster Linie darin, die Grundlage für wirtschaftliche Vergleiche zwischen den verschiedenen Arten der Zugförderung zu schaffen.

Benutzt man die mitgeteilten Gleichungen etwa zur Berechnung des Arbeitsverbrauches elektrischer Bahnen, so werden die zusätzlichen Widerstände durch Winddruck um so weniger das Gesamtergebnis der Rechnung beeinträchtigen, je ausgedehnter das Bahnnetz ist, das in die Berechnung einbezogen wird.

Für wirtschaftliche Berechnungen wird man demnach ohne Fehler diesen zusätzlichen Windwiderstand unbeachtet lassen können. Dagegen ist er unbedingt zu berücksichtigen, wenn es sich darum handelt, die Leistungsfähigkeit einer Lokomotive zu bestimmen, da sonst unter Umständen die Einhaltung des Fahrplanes Schwierigkeiten bereiten würde.

Ist beispielsweise die Zugkraft  $Z$  einer Lokomotive am Radumfang bei der Geschwindigkeit  $V$  km/St bekannt, ist ferner  $W_L$  der gesamte Widerstand der Lokomotive,  $Q_1$  deren Gewicht, ferner  $Q_2$  das Gewicht des Zuges, der aus  $n$  Wagen mit dem Gewicht  $q_2$  besteht, ist ferner  $w_2$  der auf 1 t bezogene Widerstand der Wagen, so ist

$$Z - W_L = Q_2 \cdot w_2 = q_2 \cdot n \cdot w_2$$

$$n = \frac{Z - W_L}{q_2 \cdot w_2}$$

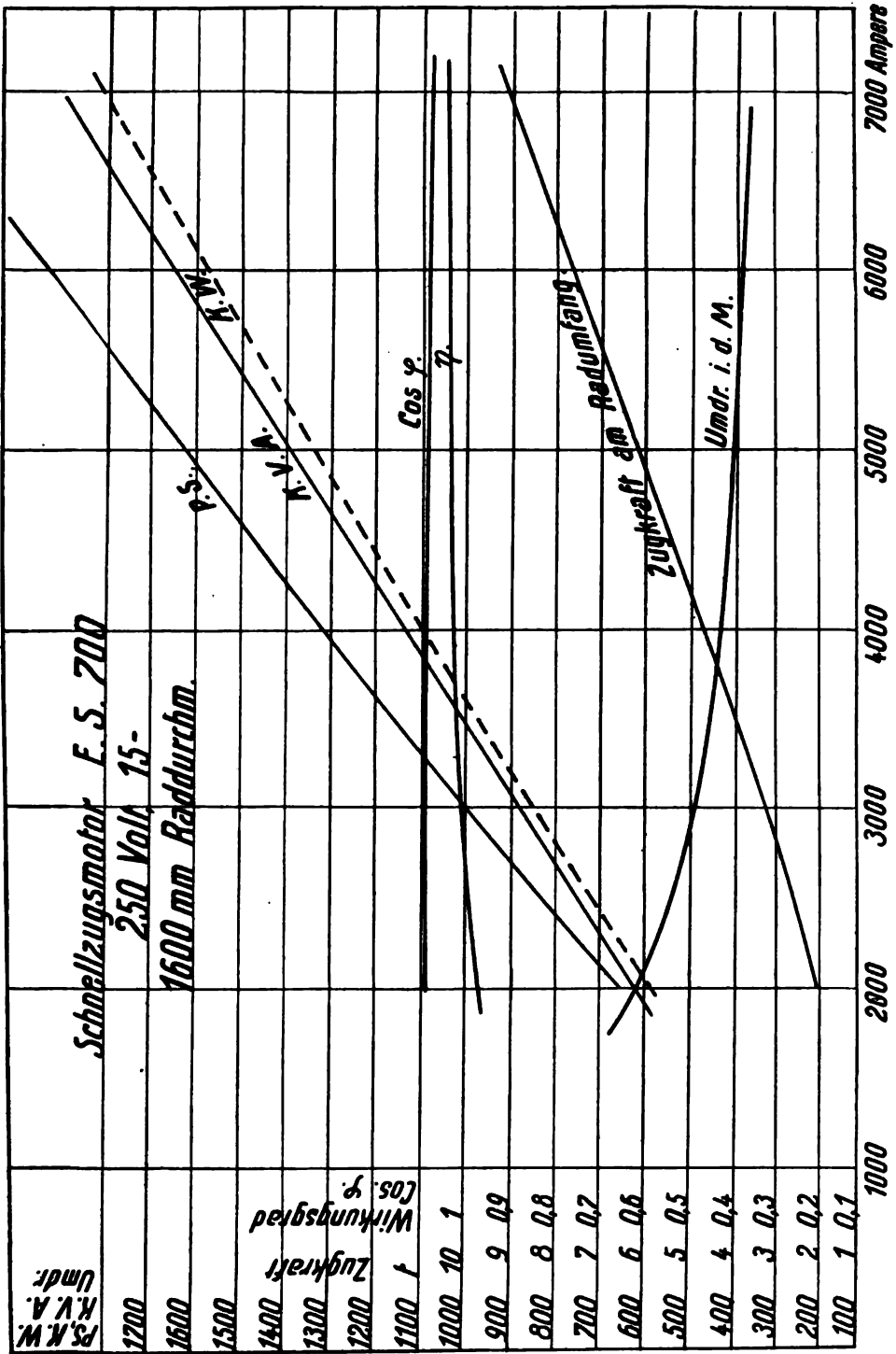


Fig. 187a.

diejenige Wagenzahl, welche die Lokomotive bei der zugrunde gelegten Geschwindigkeit  $V$ , für welche nach dem oben gesagten  $W_L$  und  $w_2$  unter Annahme einer mittleren Windgeschwindigkeit von 12 km/St berechenbar ist, ziehen kann.

Beispiel. Es sei eine elektrische Lokomotive mit einem Gesamtgewicht von 70 t gegeben, die bei  $V = 75$  km/St eine Zugkraft von 4500 kg am Radumfang entwickelt. Ihre Querprojektionsfläche sei 7,5 qm und sie soll dazu benutzt werden, um einen Personenzug, bestehend aus Wagen von 23 t Gewicht auf einer Steigung  $s = 5$  zu ziehen. Es sei mit einem Gegenwind von 12 km/St zu rechnen. Dann ist zunächst

$$W_L = 70 \left[ 2,5 + 0,0142 \left( \frac{75 + 12}{10} \right)^2 + s \right] + 0,54 \cdot 1,1 F' \cdot \left( \frac{75 + 12}{10} \right)^2$$

$W_L = \text{rund } 940 \text{ kg.}$

Ferner ist

$$w_2 = 2,5 + \frac{1}{30} \left( \frac{75 + 12}{10} \right)^2 + 5 = 10,03 \text{ kg.}$$

Hieraus ergibt sich

$$n = \frac{4500 - 940}{23 \cdot 10,03} = 15 \text{ Wagen.}$$

Mit Hilfe des Motordiagrammes lassen sich die zusammengehörigen Werte von Zugkraft, Geschwindigkeit, Strom und Leistung in einfacher Weise für beliebige Zugbildungen und Bahnwiderstände folgendermaßen bestimmen.

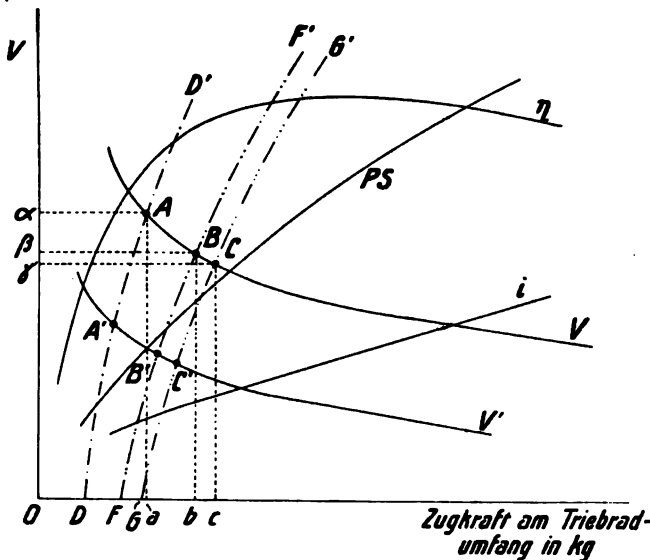


Fig. 137b.

für beliebige Zugbildungen und Bahnwiderstände folgendermaßen bestimmen.

In Fig. 137b sind die Schaulinien einer mit einem Reihenschlußmotor ausgerüsteten Lokomotive gegeben, das unmittelbar aus den Schaulinien des Motors, wie sie beispielsweise in Fig. 137a gegeben sind, dadurch erhalten wird, daß man die Drehzahllinie bei normaler Betriebsspannung durch die Linie der kilometrischen Stunden- geschwindigkeit  $V$  ersetzt und Wirkungsgrad nebst Leistung unter Berücksichtigung der Verluste in

etwa verwendeten Übersetzungsgliedern auf den Triebtradumfang bezieht. In dieses Schaubild läßt sich für gegebene Streckenverhältnisse der Widerstand eines bestimmten Zuges einschließlich Lokomotive in Abhängigkeit von  $V$  (Ordinatenmaßstab) eintragen. Die Linie  $D D'$  stellt beispielsweise den durch Rechnung gefundenen Verlauf des gesamten Bahnwiderstandes

für irgendeinen Zug dar; Linie  $F F'$  ist der Gesamtwiderstand für einen anderen, schwereren Zug auf ebener Bahn und  $G G'$  der gesamte Widerstand desselben Zuges auf einer Steigung. Die Linie  $D D'$  schneidet  $V$  im Punkte  $A$ , d. h. für die Geschwindigkeit  $A a$  ist die Zugkraft  $O a$  gleich dem Widerstand  $A a$ , so daß  $A a$  die Fahrgeschwindigkeit des ersten Zuges ist. Für den zweiten Zug erhält man die Fahrgeschwindigkeit  $B b$  auf ebener Bahn und  $C c$  auf der Steigung. Zu den gefundenen Werten der Fahrgeschwindigkeiten ergeben sich aus dem Schaubild ohne weiteres die entsprechenden Werte von Strom, Leistung und Wirkungsgrad.

Ist außer der Kurve  $V$  bei normaler Spannung noch die Kurve  $V'$  etwa bei halber Spannung gegeben, so erhält man neue Schnittpunkte von  $V'$  mit  $D D'$ ,  $F F'$ ,  $G G'$ , deren Ordinaten wieder die Geschwindigkeiten, deren Abszissen die Zugkräfte darstellen.

### 17. Anfahrt und Beschleunigung einer Lokomotive.

Aus der Gleichung für den auf eine Tonne des gesamten Zuggewichtes bezogenen Widerstand

$$w = \left[ 2,5 + \zeta \left( \frac{V^2}{10} \right) + s + r \right] \text{ kg/t}$$

folgt, daß für  $V = 0$  die Größe  $w$  den Wert

$$w = 2,5 + s + r$$

oder für horizontales gerades Gleis den Wert

$$w = 2,5 \text{ kg/t}$$

besitzt. Dies stimmt indessen mit der Erfahrung nicht überein, welche lehrt, daß im Augenblick der Anfahrt bedeutend höhere Werte von  $w$  auftreten. Die Gründe hierfür sind noch nicht völlig aufgeklärt, sie dürften aber darin zu suchen sein, daß die Schmierung der Achslager bei laufendem Wagen infolge der Bewegung der Ölschicht eine vollkommener ist als bei ruhendem Wagen und daß bei laufendem Wagen die Räder sich besser in die Fahrtrichtung einstellen als bei ruhendem Wagen.

Nach Versuchen von v. Glinski<sup>1)</sup> liegt der Wert von  $w_A$  (auf die Tonne bezogener Bewegungswiderstand bei Anfahrt) für Dampflokomotiven mit Schlepptender durchschnittlich bei 20 kg/t, für Tenderlokomotiven bei 26 kg/t und bei elektrischen Lokomotiven mit Blindwellenübertragung bei 30 kg/t.

Als Mittelwert für Güter- und Personenwagen hat v. Glinski den Wert  $w_A = 12 \text{ kg/t}$  ermittelt.

Die Versuche lehrten ferner, daß der Wert von  $w_A$  sich um so mehr einem bestimmten Grenzwert, d. h. den oben mitgeteilten Mittelwerten nähert, je länger die Lokomotive oder der ganze Zug vor der Anfahrt gestanden hatte.

So ergaben sich für eine Heißdampf-Tenderlokomotive der Bauart 1—C mit einem Gewicht von 65 t folgende Werte für  $w_A$ .

<sup>1)</sup> Z. V. d. I. 1912, S. 2065.





stimmten Zug, der von einer Lokomotive mit bekanntem Gewicht gezogen wird, die Widerstände  $W$  für verschiedene Geschwindigkeiten gefunden. Diese sind ebenfalls im Schaubild in Abhängigkeit von  $V$  dargestellt. Der Zug fuhr mit der Zugkraft  $o p$  an und sofort nach der Anfahrt sinkt der Widerstand auf den durch Rechnung gefundenen Wert  $o h$ . Im Augenblick der Anfahrt wirkt also die beschleunigende Kraft  $P = h p$ . Der Zug beschleunigt sich so lange, bis Zugkraft und Zugwiderstand gleich sind, was im Punkte  $d$  der Fall ist. Da  $Z = W = f d$  ist, wird  $P$  zu Null, d. h. der Zug fährt mit der gleichförmigen Geschwindigkeit  $d g$  weiter. Aus diesem Diagramm lassen sich nun die Beschleunigungen  $\gamma$  folgendermaßen berechnen. Nach dem bekannten Gesetze, daß Kraft = Masse  $\times$  Beschleunigung ist, kann man schreiben

$$P = M \cdot \gamma.$$

Hierin ist  $M$  die zu beschleunigende Masse, die folgendermaßen zu berechnen ist.

Die gesamte Masse des Zuges  $m_1 = \frac{(Q_1 + Q_2) 1000}{9,81}$  ist zunächst in der

Richtung der Fahrt zu beschleunigen. Außerdem muß aber auch den umlaufenden Massen  $m_2$  des Zugs, also den Rädern und Motoren, eine Winkelbeschleunigung  $\frac{d\omega}{dt}$  erteilt werden. Das hierfür erforderliche Drehmoment

läßt sich durch das Produkt: Polares Trägheitsmoment  $\times$  Winkelbeschleunigung ausdrücken. Unter Berücksichtigung der Übersetzungsverhältnisse läßt sich eine Kraft  $p'$  berechnen, die, am Radumfang angreifend und in der Richtung der Zugsbewegung wirkend, dieses Drehmoment der Winkelbeschleunigung erzeugt. Die Rechnung ergibt nun, daß

$$p' = \left[ \sum M_R \cdot \left( \frac{\rho_1}{r} \right)^2 + \sum M_A \left( \nu \frac{\rho_2}{r} \right)^2 \right] \frac{dV}{dt}$$

ist, worin

$M_R$  = Masse eines Wagenrades,

$M_A$  = Maße eines Motorankers,

$\rho_1$  = Trägheitshalbmesser des Rades,

$\rho_2$  = Trägheitshalbmesser des Ankers,

$r$  = Halbmesser des Rades,

$\nu$  = Übersetzungsverhältnis zwischen Motor und Rad  $\geq 1$

ist.

Es muß sich also die gesamte überschüssige Zugkraft  $P = Z - W$  zerlegen in die beiden Glieder  $p$  und  $p'$ , wobei

$$p = \frac{(Q_1 + Q_2) 1000}{9,81} \cdot \gamma = \frac{(Q_1 + Q_2) 1000}{9,81} \frac{dV}{dt}$$

und

$$p' = \left[ \sum M_R \left( \frac{\rho_1}{r} \right)^2 + \sum M_A \left( \nu \cdot \frac{\rho_2}{r} \right)^2 \right] \frac{dV}{dt}$$

ist. Der Ausdruck in der eckigen Klammer hat den Maßbegriff einer Masse  $m_2$ ; man kann also schreiben

$$P = p + p' = (m_1 + m_2) \frac{dV}{dt}.$$

Die Errechnung des Wertes  $m_2$  ergibt für Wagen mittlerer Größe den Mittelwert  $m_2 = 0,1 m_1$ , so daß

$$P = 1,1 \cdot m_1 \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{1,1 \cdot (Q_1 + Q_2) 1000}{9,81} \cdot \gamma$$

wird.

Daraus folgt, daß

$$\gamma = \frac{P \cdot 9,81}{1,1 (Q_1 + Q_2) 1000} \text{ m/sec}^2$$

ist; an Hand dieser Gleichung lassen sich für die verschiedenen Werte von  $P$  die entsprechenden Werte von  $\gamma$  aus dem Schaubild der Fig. 138 finden.

Fig. 139 zeigt diese Abhängigkeit der Größe  $\gamma$  von der Geschwindigkeit  $V$ .

Da  $\gamma = \frac{dV}{dt}$  ist, also  $dt = \frac{dV}{\gamma}$  diejenige Zeit, welche erforderlich ist, um bei einer gegebenen Beschleunigung  $\gamma$  den Geschwindigkeitszuwachs  $dV$  zu erzeugen, läßt sich an Hand der Fig. 139 durch die angenäherte Gleichung

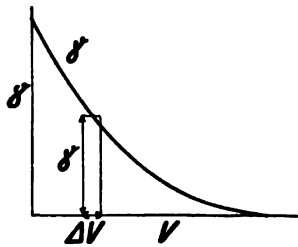


Fig. 139.

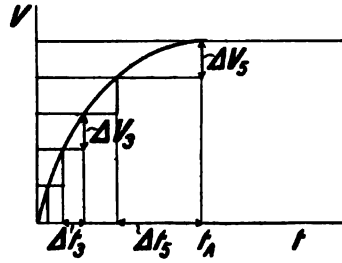


Fig. 140.

$\Delta t = \frac{\Delta V}{\gamma_m}$ , worin  $\gamma_m$  ein während  $\Delta t$  gleich bleibender Mittelwert ist, die Anfahrzeit  $t_A$  berechnen; denn es ist

$$t_A = \sum_{\gamma=0}^{\gamma_{\max}} \Delta t = \sum_{\gamma=0}^{\gamma_{\max}} \frac{\Delta V}{\gamma}$$

In Fig. 140 sind die für die abnehmenden Werte von  $\gamma$  gefundenen Zeiten  $\Delta t_1 \dots \Delta t_2 \dots \Delta t_3$  der Reihe nach zusammengezählt und als Höhen hierzu die jeweilig erreichten Geschwindigkeiten  $V$  aufgetragen, wobei z. B. nach der Zeit  $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$  die Geschwindigkeit den Wert  $\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$  erreicht hat. Nach Ablauf der Zeit  $t_A$  ist  $\gamma = 0$  und der Zug fährt mit der gleichbleibenden Geschwindigkeit  $V$  weiter.

Der Anfahrweg  $l_A$  ergibt sich aus der Gleichung

$$dl = V \cdot dt$$

zu

$$l_A = \int_{v=0}^{v=v} V \cdot dt,$$

d. h. die von der Linie  $V$  und der Abszisse eingeschlossene Fläche stellt den seit Beginn der Anfahrt durchlaufenen Weg dar. An Hand der angenäherten Gleichung

$$\Delta l = V_m \cdot \Delta t,$$

worin  $V_m$  einen während der Zeit  $dt$  gleichbleibenden Mittelwert darstellt, kann man wieder die Wegstrecken  $\Delta l$  ermitteln. Zählt man die Zeitelemente

$\Delta t$  auf der Abszisse zusammen und trägt als Höhen die jeweilig durchlaufene Wegstrecke, also z. B. für  $x = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$  die Höhe  $y = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3$  auf, so erhält man die in Fig. 141 dargestellte Abhängigkeit des Weges  $l$  von der Zeit. Dabei ist  $o a$  die Anfahrzeit und  $a b$  der Anfahrweg. Nach Ablauf der Anfahrzeit bleibt die Geschwindigkeit und der in der Zeiteinheit durchlaufene Weg gleich.

Nach diesem zeichnerisch-rechnerischen Verfahren lassen sich für jede beliebige Zugbildung und für alle Gleisverhältnisse die Anfahrzeiten und Anfahrwege ermitteln.

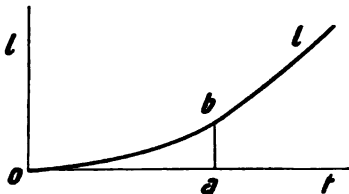


Fig. 141.

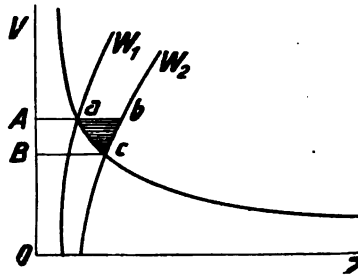


Fig. 142.

Ebenso läßt sich auch die Verzögerung bestimmen, die ein Zug beim Übergang auf eine größere Steigung erfährt. Der Gang dieser Ermittlung ist in den folgenden Abbildungen angedeutet.

Der Zug fahre zunächst auf einer Steigung  $s_1$  und der entsprechende Widerstand sei nach Fig. 142  $W_1$ ; dann ist  $O A$  die Geschwindigkeit  $V_1$  auf dieser Steigung. Geht er dann auf die größere Steigung  $s_2$  über, welcher der Widerstand  $W_2$  entspricht, so muß sich seine Geschwindigkeit auf den Wert  $O B$  erniedrigen. Im Augenblick der Einfahrt in die Steigung  $s_2$  hat die Zugkraft

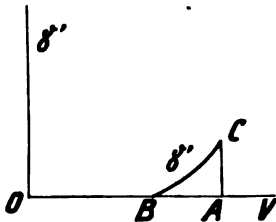


Fig. 143.

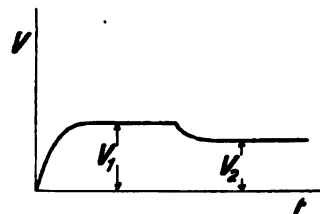


Fig. 144.

nur den Wert  $A a$ , der Widerstand indessen den Wert  $A b$ ; mithin ist  $a b$  die verzögernde Kraft  $P'$  und die Vergrößerung  $\gamma'$  bestimmt sich aus der Gleichung

$$P' = \frac{1,1 (Q_1 + Q_2) \cdot 1000}{9,81} \cdot \gamma'.$$

Der Wert von  $\gamma'$  nimmt mit sinkender Geschwindigkeit ab und wird für  $V_2 = O B$  gleich Null. Diese Abhängigkeit ist in Fig. 143 dargestellt. Aus der Beziehung  $\gamma' = \frac{dV}{dt}$  läßt sich wieder nach dem oben erläuterten zeichnerischen Verfahren  $d t$  ermitteln und man erhält die in Fig. 144 dargestellte Abhängigkeit  $V = f(t)$ .

In gleicher Weise läßt sich auch der Auslaufvorgang verfolgen. Der Strom wird unterbrochen, so daß die Zugkraft zu Null wird. Dann ist nur die durch den Widerstand  $W$  bedingte verzögernde Kraft vorhanden und es ist

$$\gamma' = \frac{W \cdot 9,81}{1,1 (Q_1 + Q_2) 1000} \text{ m/sec}^2.$$

Die Abhängigkeit  $\gamma' = f(V')$  ist in Fig. 145 dargestellt, aus der sich die weitere Beziehung  $V' = f_1(t)$  in Fig. 146 ableiten läßt. Nach der Gleichung  $dl = v \cdot dt$  läßt sich dann weiter der Auslaufweg bestimmen.

Eine zusätzliche Bremskraft  $\pi$  würde gemäß Fig. 145 die Verzögerung

$$\gamma'' = \frac{(W + \pi) 9,81}{1,1 (Q_1 + Q_2) 1000} \text{ m/sec}^2$$

und dementsprechend die neue Abhängigkeit  $V'' = f_2(t)$ , wie sie in Fig. 146 dargestellt ist, ergeben.

Die Größe der Anfahrbeschleunigung ist für verschiedenartige Bahnbetriebe verschieden.

Der Grund hierfür liegt in folgendem. Während der Anfahrzeit wird

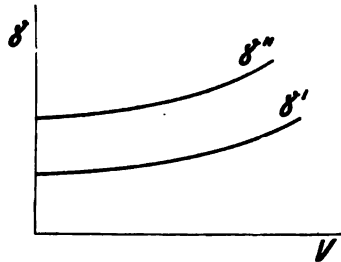


Fig. 145.

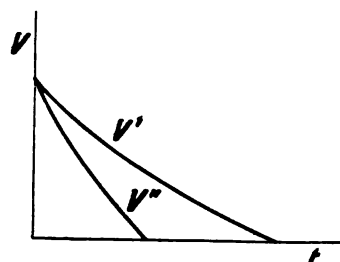


Fig. 146.

eine Arbeit  $\frac{M v^2}{2}$  für die Massenladung verbraucht, die nachher am Ende der Fahrt mehr oder weniger vollständig durch die Bremsarbeit verloren geht.

Die tatsächlich auf einer bestimmten Strecke verbrauchte Arbeit setzt sich also aus der Reibungsarbeit  $A_R$  und aus der Beschleunigungsarbeit  $A_v$  zusammen. Oder wenn man bei einem Gesamtgewicht des Zuges  $Q_t$  den Arbeitsverbrauch für das Tonnenkilometer ermitteln will, so hätte man zu schreiben

$$a = \frac{A_v + A_R}{Q_t \cdot L_{\text{km}}} \text{ mkg/tkm.}$$

Hierin ist  $\frac{A_v}{Q_t \cdot L}$  bei gegebener Beharrungsgeschwindigkeit nur abhängig von der Länge  $L$  der Strecke und ist um so größer, je kleiner  $L$  ist. Mit anderen Worten: bei kürzeren Abständen der Haltestellen und hohen Fahrgeschwindigkeiten beeinflußt die Beschleunigung des Zuges stark den tonnenkilometrischen Verbrauch, während dieser Einfluß um so mehr zurücktritt, je länger die Strecke  $L$  ist. Dadurch sind aber zwei vollständig verschiedene Betriebsarten gekennzeichnet, nämlich auf der einen Seite der

Betrieb einer Stadt- oder Lokalbahn mit naheliegenden Haltepunkten, auf der anderen Seite der Betrieb eines Schnellzuges, der sehr lange Strecken, ohne anzuhalten, durchfährt.

Die Beschleunigung des Zuges ist aber auch von Einfluß auf die Fahrzeit und zwar wird dieser Einfluß wieder um so mehr hervortreten, je kürzer die Strecke ist.

Da demnach der Anfahrbeschleunigung und — das möge gleich hier bemerkt werden — auch der Bremsverzögerung eine wirtschaftliche und betriebstechnische Bedeutung zukommt, sollen im folgenden die Gesichtspunkte abgeleitet werden, die für die richtige Wahl dieser Größen für einen bestimmten Bahnbetrieb maßgebend sind.

Es sei

$V$  die Geschwindigkeit in km/St im Beharrungszustand,

$w$  der Bahnwiderstand pro t bei der Geschwindigkeit  $V$ ,

$L_a, t_a$  Anfahrweg und Anfahrzeit in km und sec,

$L_b, t_b$  Bremsweg und Bremszeit in km und sec,

$L_v, t_v$  Weg und Zeit im Beharrungszustand in km und sec,

$\gamma_a$  der unveränderliche Mittelwert der Anfahrbeschleunigung in m/sec<sup>2</sup>,

$\gamma_b$  der unveränderliche Mittelwert der Bremsverzögerung in m/sec<sup>2</sup>,

$T$  die gesamte Fahrzeit in sec,

$L$  Der gesamte Fahrweg in km.

$a$  die am Radumfang zu leistende Arbeit in mkg resp. Wattstunden, bezogen auf das tkm.

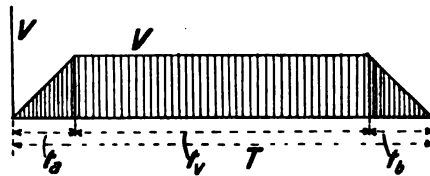


Fig. 147.

In Fig. 147 ist zunächst der Verlauf der Geschwindigkeit während einer gewöhnlichen Fahrt dargestellt; während

der Zeit  $t_a$  wird der Zug auf die Geschwindigkeit  $V$  beschleunigt, fährt während der Zeit  $t_v$  mit dieser Geschwindigkeit und wird während der Zeit  $t_b$  durch Bremsung wieder zum Stillstand gebracht. Die von der  $V$ -Linie und der Abszisse  $T$  eingeschlossene gestrichelte Fläche stellt den Fahrweg in Kilometer dar.

$$T = t_a + t_v + t_b = \frac{V}{3,6 \gamma_a} + \frac{1000 \cdot L_v \cdot 3,6}{V} + \frac{V}{3,6 \cdot \gamma_b}$$

$$L_v = L - L_a - L_b$$

$$L_a = \frac{V \cdot t_a}{2 \cdot 3,6 \cdot 1000} = \left(\frac{V}{3,6}\right)^2 \cdot \frac{1}{2000 \cdot \gamma_a}$$

$$L_b = \frac{V \cdot t_b}{2 \cdot 3,6 \cdot 1000} = \left(\frac{V}{3,6}\right)^2 \cdot \frac{1}{2000 \gamma_b}$$

Hieraus folgt:

$$T = \left[ \frac{V}{7,2} \left( \frac{1}{\gamma_a} + \frac{1}{\gamma_b} \right) + 3600 \frac{V}{L} \right] \text{sec.}$$

Die Gleichung läßt erkennen, daß  $T$  umso kleiner bei gegebenem  $V$  wird, je größer  $\gamma_a$  und  $\gamma_b$  gewählt wird.

Der Arbeitsverbrauch während dieser Fahrt ergibt sich folgendermaßen. Für die Beschleunigung der auf eine Tonne des Zuggewichtes bezogenen Masse ist unter Berücksichtigung der umlaufenden Massen eine Arbeit von

$$\frac{1000 \cdot 1,1}{9,81 \cdot 2} \left( \frac{V}{3,6} \right)^2 \text{ mkg}$$

zu leisten. Diese wird während der Bremszeit  $t_b$  teils durch den Bahnwiderstand, teils durch den zusätzlichen Bremswiderstand aufgezehrt. Für die Fahrt auf dem Bremsweg  $L_b$  braucht der Motor also keine Arbeit mehr zu liefern, wohl aber für den Anfahrweg  $L_a$ . Es ist also

$$a = \frac{\frac{1000 \cdot 1,1}{2 \cdot 9,81} \left( \frac{V}{3,6} \right)^2 + w \cdot L_a \cdot 1000 + w \cdot L_v \cdot 1000}{L_a + L_v + L_b} \text{ mkg/tkm}$$

$$a = \frac{0,5 \left( \frac{V}{3,6} \right)^2 \left( \frac{1000 \cdot 1,1}{9,81} - \frac{w}{\gamma_b} \right) + 1000 w \cdot L}{L} \text{ mkg/tkm,}$$

oder im elektrischen Maße ausgedrückt

$$a = \frac{\left[ 0,5 \left( \frac{V}{3,6} \right)^2 \left( \frac{1000 \cdot 1,1}{9,81} - \frac{w}{\gamma_b} \right) + 1000 w L \right] \cdot 9,81}{L \cdot 3600} \text{ Wattstunden/tkm.}$$

Die Gleichung läßt erkennen, daß bei gegebenen Werten von  $V$ ,  $w$  und  $L$  der Arbeitsverbrauch  $a$  um so größer ist, je größer die Bremsverzögerung  $\gamma_b$  ist.

Er ist am geringsten, wenn  $\frac{1000 \cdot 1,1}{9,81} - \frac{w}{\gamma_b} = 0$  ist, wenn also

$$\gamma_b = \frac{w \cdot 9,81}{1000 \cdot 1,1} \text{ m/sec}^2$$

wäre, d. h. wenn  $w$  die verzögernde Kraft wäre oder mit anderen Worten, wenn der Zug ohne Bremsung auslaufen würde, so daß seine Massenladung nur durch die natürlichen Zugwiderstände aufgezehrt würde.

Das würde einen Bremsweg resp. Auslaufweg

$$L_b = \left( \frac{V}{3,6} \right)^2 \cdot \frac{1 \cdot 1000}{2000 \cdot w \cdot 9,81} \text{ km}$$

ergeben, also für einen Schnellzug, der mit 80 km fährt, einen Auslaufweg von etwa 6 km.

Die Auslaufzeit  $t_b$  findet man durch den Ausdruck

$$t_b = \frac{V}{3,6 \gamma_b} = \frac{V 1000 \cdot 1,1}{3,6 \cdot w \cdot 9,81} \text{ sec;}$$

sie würde für den vorliegenden Fall 624 sec betragen, so daß der Zug während der Auslaufperiode über zehn Minuten lang mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von nur 34,6 km anstatt 80 km fahren würde.

Eine derartige Verlängerung der Fahrzeit wäre aber mit dem Fahrplan einer Vollbahn nicht in Einklang zu bringen. Immerhin kann man bei ge-

gebener Fahrzeit und gegebener Streckenlänge den Arbeitsverbrauch dadurch wirtschaftlicher gestalten, daß man den Zug nur teilweise auslaufen läßt und kurz vor der Haltestelle bremst. Die Geschwindigkeitsabnahme während der Auslaufzeit würde aber einen Zeitverlust verursachen, den man durch eine Vergrößerung der Anfahrbeschleunigung wieder einholen kann. Dies ist in Fig. 148 dargestellt. Die Linie  $A B C D$  stellt den Geschwindigkeitsverlauf für eine Fahrt dar. Nach der Anfahrzeit  $A b$  wird die Beharrungsgeschwindigkeit  $V$  erreicht, mit der der Zug während der Zeit  $b f$  weiterfährt. Nach dieser Zeit wird der Strom ausgeschaltet und der Zug während der Zeit  $f D$  bis zum Stillstand gebremst. Die Anfahrbeschleunigung ergibt sich aus der Neigung der Linie  $A B$  und die Bremsverzögerung aus der Neigung der Linie  $C D$ . Würde man mit größerer Anfahrbeschleunigung, also etwa der Neigung von  $A F$  anfahren, so würde die volle Geschwindigkeit  $V$  schon nach der kürzeren Zeit  $A a$  erreicht und der durch die gestrichelte Dreiecksfläche  $A F B$  dargestellte Weg als Vorsprung gewonnen. Nach der Zeit  $A c$  wird der Strom abgestellt und der Zug läuft unter Verringerung der Geschwindigkeit bis auf den Wert  $V'$

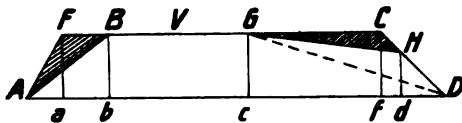


Fig. 148.

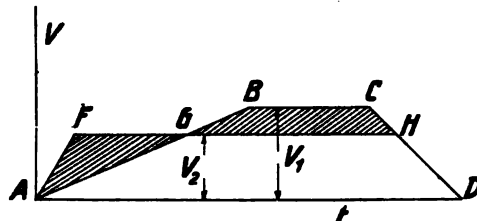


Fig. 149.

=  $d H$  während der Zeit  $c d$  aus, um dann während der Zeit  $d D$  gebremst zu werden. Dabei ergibt sich die Verzögerung durch den Bahnwiderstand aus der Neigung der Linie  $G H$  und die gestrichelte Dreiecksfläche  $G H C$  muß mit dem Dreieck  $A F B$  inhaltsgleich sein, da der Flächeninhalt  $A B C D$  gleich dem von  $A F G H D$  sein muß. Die mittlere Bremsverzögerung im letzten Falle ergibt sich aus der Neigung der Linie  $G D$ ; sie ist geringer als im ersten Fall, daher der tonnenkilometrische Arbeitsverbrauch geringer.

Die Gleichung für  $a$  zeigt ferner, daß die Geschwindigkeit  $V$  von großem Einfluß auf den Arbeitsverbrauch ist. Wenn nun eine bestimmte Strecke in bestimmter Zeit durchfahren werden soll, so muß die Beharrungsgeschwindigkeit  $V$  um so größer sein, je kleiner die Anfahrbeschleunigung  $\gamma_a$  ist, da eben mit abnehmendem  $\gamma_a$  der Zeitverlust während der Anfahrt zunimmt. Dies zeigt Fig. 149 für zwei verschiedene Beschleunigungen. Einmal wird der Zug nach der Linie  $A B$  beschleunigt und muß die Geschwindigkeit  $V_1$  erreichen, um die durch die Fläche  $A B C D$  dargestellte Strecke in der fahrplanmäßigen Zeit  $A D$  zu durchfahren; wenn er dagegen nach der Linie  $A F$  beschleunigt wird, so genügt die kleinere Endgeschwindigkeit  $V_2$  für die gleiche Fahrt. In dem Diagramm muß das Dreieck  $A F G$  mit dem Trapez  $G B C H$  inhaltsgleich sein, da die Inhalte der Flächen  $A B C D$  und  $A F G H D$ , denselben Weg darstellend, gleich sein müssen.

Diese Darstellungen lassen erkennen, daß der richtigen Wahl der Anfahrbeschleunigung und der Höchstgeschwindigkeit bei gegebenem Fahrplan um so

größere Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit eines Bahnbetriebes beizumessen ist, je geringer die Entfernung der Haltepunkte ist.

Wenn man also in dem Bestreben, mit kleineren Bremsverzögerungen auszukommen, die Anfahrbeschleunigungen möglichst hoch wählen wird, so ist dabei doch folgendes zu bedenken. Mit wachsender Anfahrbeschleunigung wächst die beschleunigende Kraft; dieser muß die Zugkraft des Motors entsprechen. Je größer ferner die Zugkraft ist, desto größer muß das Adhäsionsgewicht der Lokomotive sein. Die Erhöhung der Anfahrbeschleunigung verursacht demnach eine Verteuerung der Triebmittel und außerdem darf sie mit Rücksicht auf die Fahrgäste nicht zu groß gemacht werden.

Bei Stadtbahnen wendet man Beschleunigungen bis zu  $0,7 \text{ m/sec}^2$  an; die auf den ganzen Anfahrweg bezogene mittlere Beschleunigung beträgt zumeist höchstens  $0,5 \text{ m/sec}^2$ . Für Bahnen mit großen Entfernungen der Haltepunkte wird man Anfahrbeschleunigungen von  $0,2$  bis  $0,3 \text{ m/sec}^2$  wählen. Der Mittelwert der Bremsverzögerung beträgt erfahrungsgemäß etwa  $0,5 \text{ m/sec}^2$ , es können aber unter Umständen auch Werte bis zu  $1 \text{ m/sec}^2$  und bei Gefahr bis zu  $1,5 \text{ m/sec}^2$  in Betracht kommen. Als Beispiele mögen folgende dienen.

Bahnanlage	Anfahrbeschleunigung $\gamma_a \text{ m/sec}^2$
Schwebbahn Elberfeld—Vohwinkel . .	0,6—0,8
Hochbahn Liverpool—Manchester . . .	0,45—0,6
Hoch- und Untergrundbahn Berlin . .	0,7
Veltlinbahn . . . . .	0,25
Burgdorf—Thun . . . . .	0,22
Dessau—Bitterfeld . . . . .	0,15—0,19
Spiez—Lötschberg—Simplon . . . . .	0,05

### 18. Der Arbeitsverbrauch eines Zuges mit elektrischer Lokomotivförderung.

Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt wurde, läßt sich für einen Zug gegebener Zusammensetzung, der auf einer gegebenen Strecke fährt, der mechanische Arbeitsverbrauch an Hand von verhältnismäßig einfachen Gleichungen berechnen. Dagegen bietet die rein rechnerische Ermittlung des elektrischen Arbeitsverbrauches insofern Schwierigkeiten, als während der Anfahrzeit infolge der Betriebseigentümlichkeiten des Motors sowohl die Beschleunigung als auch der Wirkungsgrad sich zeitlich ändert.

Es erscheint daher richtiger den elektrischen Arbeitsbedarf aus den Schaulinien des Motors selbst zu ermitteln. Das hier anzuwendende Verfahren beruht auf folgenden Grundlagen.

In Fig. 150 stellen die Schaulinien  $V_1$  bis  $V_3$  die Abhängigkeit der kilometrischen Stundengeschwindigkeit von der Zugkraft am Radumfang für einen bestimmten Lokomotivmotor dar und zwar gilt  $V_1$  für eine Spannung von 150 Volt an den Motorklemmen,  $V_2$  für 250 Volt und  $V_3$  für 350 Volt.

Dementsprechend stellen die Kurven  $A_1$  bis  $A_3$  die Leistungen in PS an der Motorwelle bei den verschiedenen Spannungen dar, es gilt also beispielsweise die Linie  $A_2$  für 250 Volt. Endlich stellen die Kurven  $\eta_1$  bis  $\eta_3$  den Verlauf



des Wirkungsgrades bei den verschiedenen, durch die entsprechenden Zahlen gekennzeichneten Spannungen dar. Aus dem Schaubild ist ersichtlich, daß, wenn man den stillstehenden Motor an die Spannung  $e = 175$  Volt legen würde, er die Anzugskraft  $O a'$  entwickeln würde. Das Schaubild zeigt ferner noch eine Linie  $M M$ , welche die Abhängigkeit des gesamten Zugwiderstandes

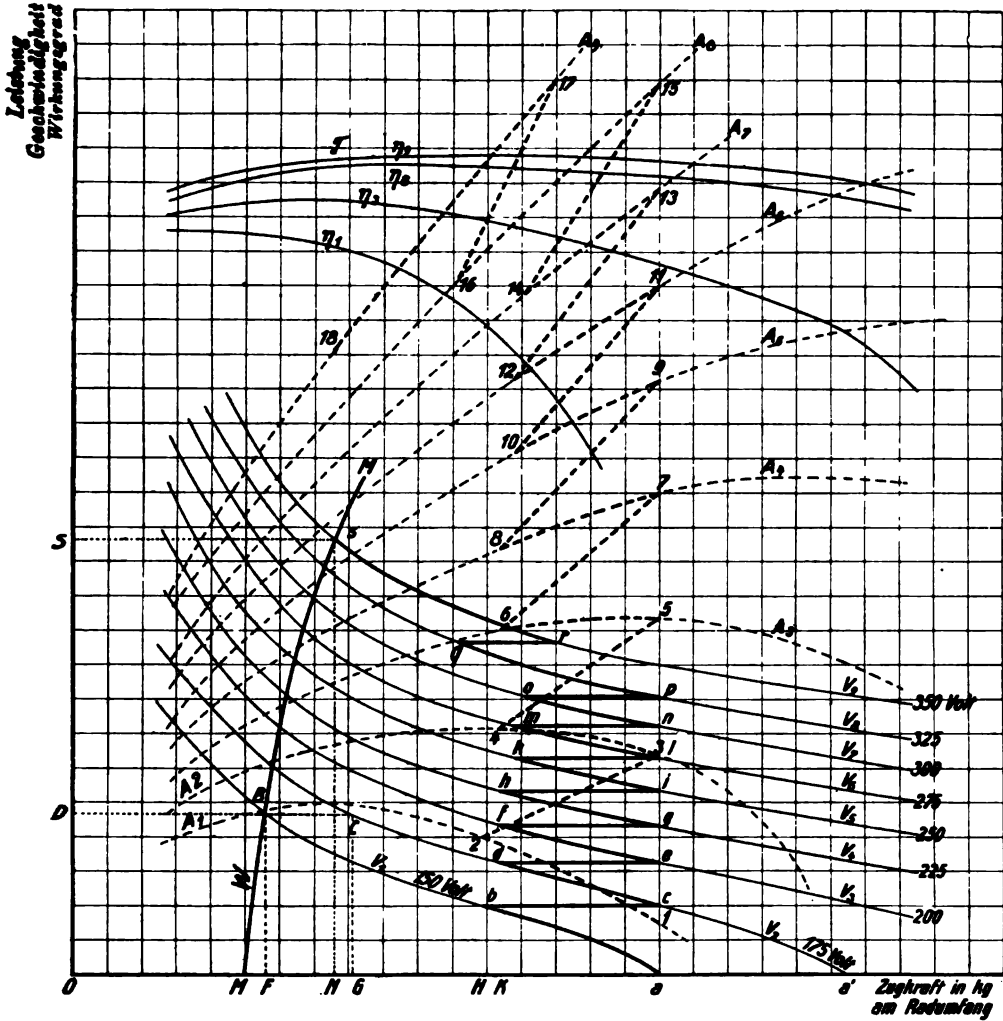


Fig. 150.

$W$  in kg von der kilometrischen Stundengeschwindigkeit auf der Anfahrstrecke mit gleichmäßig gedachter Steigung darstellt.

Wenn also bei  $e = 175$  Volt die Lokomotive im Augenblick des Anfahrens die Zugkraft  $O a'$  entwickelt, so wird nur der Teil  $O M$  durch den Zugwiderstand verbraucht, während der Rest  $M a'$  als beschleunigende Kraft wirkt.

Aus der Kraft  $M a'$  und der zu beschleunigenden Masse des Zuges einschließlich Lokomotive läßt sich nun in der bekannten Weise die Beschleuni-

gung  $\gamma$  m/sec<sup>2</sup> berechnen, die aus den auf Seite 94 angegebenen Gründen einen bestimmten Höchstwert nicht überschreiten darf. Die Rechnung möge nun ergeben haben, daß für eine bestimmte Zugbildung die beschleunigende Kraft  $M a'$  zu groß ist. Dann folgt hieraus, daß man mit einer geringeren Spannung anfahren muß, um eine kleinere beschleunigende Kraft zu erhalten.

Die bei  $e = 150$  Volt auftretende Anfahrzugkraft  $O a$  ergebe die zulässige Beschleunigungskraft  $M a$ .

Die Lokomotive wird jetzt anfahren; die Zugkraft nimmt dann mit allmählich wachsender Geschwindigkeit in dem Maße ab, wie  $V_1$  zunimmt. Der Schnittpunkt  $B$  der  $W$ - und  $V_1$ -Linien besitzt als zusammengehörige Größen die Werte  $O F$  der endgültigen Zugkraft und  $O D$  der endgültigen Geschwindigkeit. Will man eine höhere Geschwindigkeit erreichen, so muß man auf eine höhere Spannungsstufe übergehen. Dieser Übergang muß aber erfolgen, ehe die endgültige Geschwindigkeit  $O D$  erreicht ist und zwar aus folgenden Gründen.

Würde man nach Erreichung der Geschwindigkeit  $O D = F B$  auf die Spannungsstufe  $e = 175$  Volt übergehen, so würden gemäß der 175 Volt- $V$ -Linie der Geschwindigkeit  $C G = F B$  eine Zugkraft  $O G$  entsprechen, von welcher der Anteil  $F G$  als beschleunigende Kraft wirkt.

Würde man dagegen nach Erreichung der Geschwindigkeit  $H b$  von der 150 Volt-Stufe auf die 175 Volt-Stufe übergehen, so würde man wieder die anfängliche Zugkraft  $O a$  und eine beschleunigende Kraft, die nur um ein geringes kleiner ist als  $M a$ , erhalten. Es ergibt sich aus dieser Betrachtung ohne weiteres, daß diese zweite Art der Umschaltung infolge der größeren Beschleunigungen eine schnellere Geschwindigkeitssteigerung ermöglicht als die erste Art.

Läßt man nun die Lokomotive mit  $e = 175$  Volt weiterfahren, so nimmt die Geschwindigkeit nach der Linie  $V_2$  zu. Sobald die Geschwindigkeit  $d K$  erreicht ist, schaltet man auf  $e = 200$  Volt um. Für diese neuen Spannungsstufe ist  $V_3$  maßgebend, wobei  $d K = e a$  ist.

Die Lage der Punkte  $c, e, g$  usw. ist durch das zum Punkte  $a$  gehörige Lot bestimmt, welches die  $V$ -Linien in den bezeichneten Punkten schneidet. Die Punkte  $b, d, f$  usw. ergeben sich als Schnittpunkte wagerechter, durch  $c, e, g$  usw. gelegter Linien mit den  $V_1, V_2, V_3$ -Kurven.

Der Schaltvorgang spielt sich also in der Weise durch Übergang von einer zur anderen Spannungsstufe ab, daß die Geschwindigkeit gemäß dem Linienzug  $a-b-c-d \dots p-q-r-s$  ansteigt.

Das Stück  $r-s$  liegt auf der zur höchsten Spannungsstufe  $e = 350$  Volt gehörigen  $V$ -Linie, welche die  $W$ -Linie im Punkte  $s$  schneidet. Zu diesem Punkte gehören die Werte der endgültigen Geschwindigkeit  $N s = O S$  und der Zugkraft  $O N$  bei dieser Geschwindigkeit.

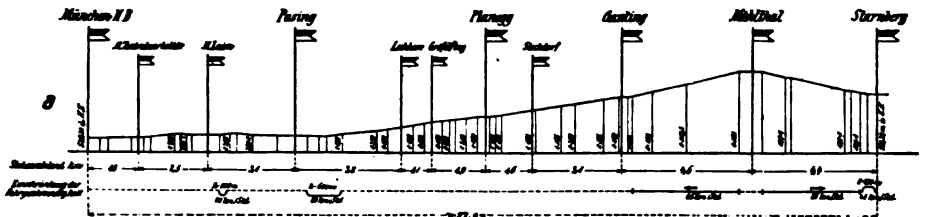
Der Verlauf des Linienzuges  $a-b \dots p-q$  zeigt, daß während des größten Teiles der Beschleunigungszeit die beschleunigende Kraft, also auch die Beschleunigung zwischen einem höchsten und niedrigsten Wert schwankt. Die Wirkung ist so, als wenn eine mittlere beschleunigende Kraft vorhanden wäre, die sich ohne weiteres aus dem Schaubild ermitteln läßt.

In ähnlicher Weise, wie die Geschwindigkeit, wächst auch die Leistung des Motors und zwar nach dem Linienzug 1—2—3 . . . 13—14—15—16—17—18.

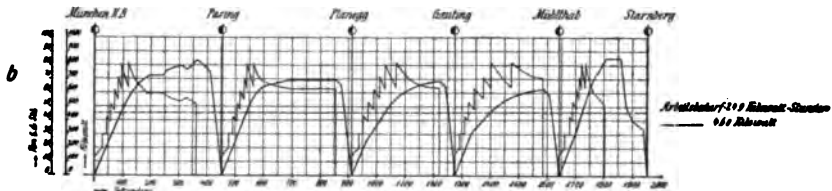
Beispielsweise vollzieht sich die Geschwindigkeitsänderung  $g-h$  bei der Leistungsänderung 7-8; dabei liegt  $g-h$  auf der zu  $e = 225$  Volt gehörigen  $V_4$ -Linie und 7-8 auf der zur gleichen Spannung gehörigen  $A_4$ -Linie.

*Schaulinien*

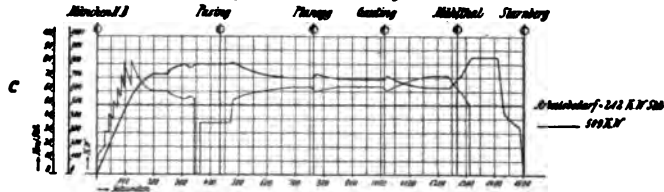
*der Geschwindigkeit u. des Arbeitsbedarfes für Personen- u. Eilzüge der Strecke München H.B. -Starnberg.*



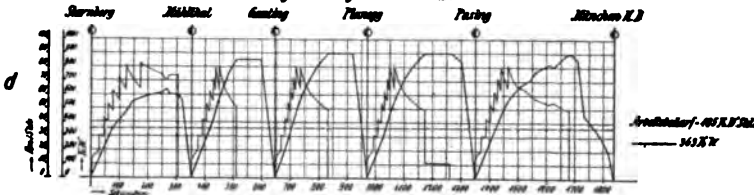
*Personenzug München H.B. -Starnberg.*



*Eilzug München H.B. -Starnberg.*



*Personenzug Starnberg -München H.B.*



*Eilzug Starnberg -München H.B.*

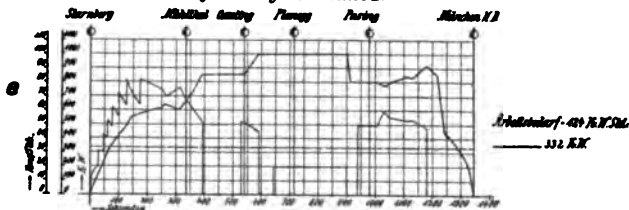


Fig. 151.

Die höchstzulässige Leistung des Motors, die nicht überschritten werden soll, sei durch den Punkt 17 gekennzeichnet. Daraus ergibt sich die Lage des Punktes  $r$  auf der  $V_3$ -Linie, dem eine geringere Zugkraft entspricht, Vollbahnlokomotiven.

spricht, als den Punkten *a, c, . . . n, p*, welche auf dem in *a* errichteten Lote liegen.

Da nun der Verlauf der mechanischen Leistung während des Beschleunigungsvorganges bekannt ist, läßt sich durch Vermittlung der jeweilig gültigen Wirkungsgrade auch die aufgenommene Leistung in Kilowatt durch einen ähnlichen Linienzug, der indessen nicht mitgezeichnet ist, darstellen.

Da ferner die beschleunigenden Kräfte während der Beschleunigungszeit bekannt sind, läßt sich nach dem in Abschnitt 17 erläuterten Verfahren die Zunahme der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit berechnen und man kann für eine gegebene Strecke beliebiger Steigung durch sinngemäße

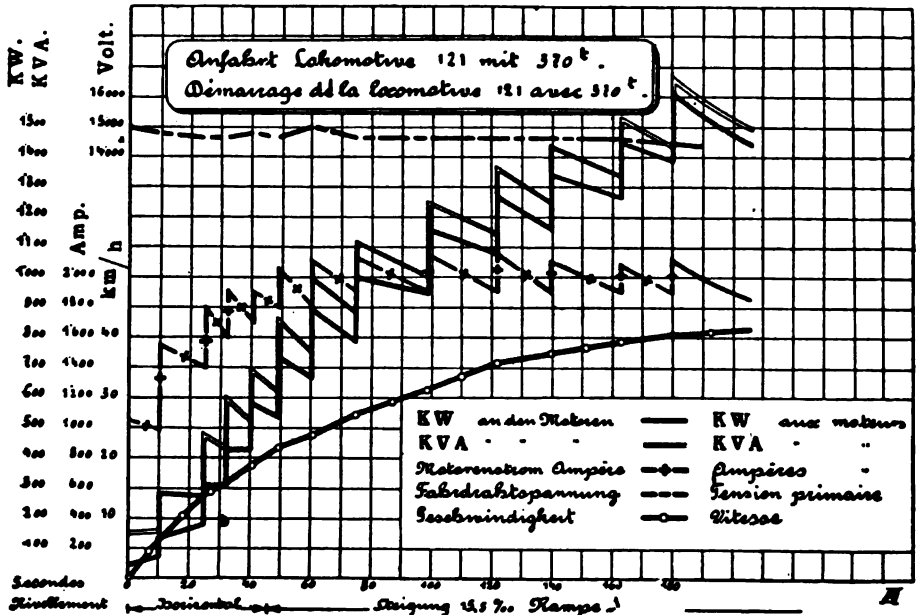


Fig. 152.

Weiterentwicklung des an Hand der Fig. 137 b erläuterten zeichnerischen Verfahrens den Geschwindigkeits- und Arbeitsplan ermitteln.

Als Beispiel für eine derartige Ermittlung mögen die der „Denkschrift über die Einführung des elektrischen Betriebes auf den bayrischen Staatsbahnen“ entnommenen Schaulinien der Geschwindigkeit und des Arbeitsbedarfs für Personen- und Eilzüge der Strecke München H. B.—Starnberg für beide Fahrtrichtungen dienen, die in Fig. 151 dargestellt sind. Das Zuggewicht beträgt einschließlich der Lokomotive 250 t.

Der Plan a zeigt zunächst die Steigungsverhältnisse der Strecke. In den Arbeitsplänen b bis e prägt sich die Beschleunigungsperiode deutlich durch die Zacken der Leistungs-(kW)-Linie aus und auch die Geschwindigkeitslinie zeigt infolge der wechselnden Steigungen Unstetigkeiten.

Aus den Arbeitsplänen b bis e läßt sich nun der Arbeitsbedarf in kW-Stunden durch Ausmüttlung der von der kW-Linie und von der Abzisse eingeschlossenen Flächen ermitteln.

Derselbe beträgt für den

- Personenzug München H. B.—Starnberg 249 kW-Stunden, entsprechend einer mittleren Leistung von 460 kW;
- Personenzug Starnberg—München H. B. 185 kW-Stunden, entsprechend einer mittleren Leistung von 363 kW;
- Eilzug München H. B.—Starnberg 212 kW-Stunden, entsprechend einer mittleren Leistung von 509 kW;
- Eilzug Starnberg—München H. B. 124 kW-Stunden, entsprechend einer mittleren Leistung von 332 kW.

Aus diesen Zahlen ergibt sich ein Anhaltspunkt dafür, wie der Arbeitsverbrauch einer Strecke durch die Beschleunigungsarbeit vergrößert wird, denn der größere Verbrauch der Personenzüge ist auf das häufige Anfahren an den zahlreichen Haltepunkten zurückzuführen. —

In Fig. 152 ist noch ein Schaubild wiedergegeben, das bei den Versuchsfahrten mit einer einphasigen Lokomotive der Maschinenfabrik Örlikon, welche 90 t wiegt, aufgenommen wurde. Die Einrichtung dieser Lokomotive wird später noch näher beschrieben. In dieses Diagramm ist auch der Verlauf des Stromes während der Beschleunigungszeit eingezeichnet, der in Fig. 150 der Übersichtlichkeit halber fortgelassen wurde.

Nachdem so der Arbeitsverbrauch einer bestimmten Strecke berechnet werden kann, läßt sich auch der auf das tkm bezogene Verbrauch ermitteln.

Die Gesamtarbeit auf der 27,9 km langen Strecke München H. B.—Starnberg beträgt für den 250 t schweren Zug 6975 tkm.

Demnach werden unter Beobachtung der oben mitgeteilten Werte für den Arbeitsverbrauch folgende Zahlen ermittelt:

Personenzug München—Starnberg	36	Wattstunden für das tkm
Eilzug	30	„ „ „ „
Personenzug Starnberg—München	26,5	„ „ „ „
Eilzug	18	„ „ „ „

Diese durch Rechnungen gefundenen Zahlen werden durch die Betriebs- erfahrungen durchaus bestätigt.

So ergaben die Messungen auf der Strecke Dessau—Bitterfeld als mittleren Arbeitsbedarf, am Stromabnehmer gemessen,

für Schnell- und Personenzüge	29,5	Wattstunden/tkm
für Güterzüge	16,5	„ „

Auf der Strecke Seebach—Wettingen betrug der Arbeitsverbrauch einschließlich des Leitungsverlustes 25—30 Wattstunden/tkm.

Schließlich möge noch eine Zusammenstellung Platz finden, aus welcher sich der Arbeitsverbrauch für das Tonnenkilometer unter Berücksichtigung des gesamten Arbeitsbedarfs der Strecke einschließlich elektrischer Heizung der Züge, des Arbeitsverbrauchs für den Verschiebedienst und für Beleuchtung und Werkstättenbetrieb ergibt. Es handelt sich dabei um die Strecke Spiez—Frutigen, und zwar für die Betriebszeit vom November 1910 bis Juni 1911.

Monat	Wattstunden für das tkm	Monat	Wattstunden für das tkm
November	47	März	48
Dezember	50	April	42
Januar	53	Mai	40
Februar	58	Juni	39

Das anfängliche Steigen des Verbrauchs ist auf den wachsenden Arbeitsverbrauch durch Heizung und Beleuchtung im Winter zurückzuführen.

### 19. Die Leistungsfähigkeit der Dampf- und elektrischen Lokomotiven.

Maßgebend für einen Vergleich der beiden Betriebsarten nach rein technischen Gesichtspunkten ist das Verhältnis der höchsten Zugkraft einerseits und der größten Leistung andererseits zum Lokomotivgewicht.

Als Grundlage für diesen Vergleich sind die Vorschriften der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung und die technischen Vereinbarungen des Vereins Deutscher Eisenbahn-Verwaltungen zu benutzen.

Nach diesen darf der Zughaken der Lokomotive mit höchstens 10 000 kg beansprucht werden; der Druck eines Rades auf die Schienen darf bei genügend tragfähigem Oberbau und Brücken 8 t nicht überschreiten; die Geschwindigkeit darf betriebsmäßig höchstens 100 km/St betragen.

Die größte Zugkraft einer Lokomotive hängt bekanntlich von dem Widerstand der gleitenden Reibung zwischen den Triebrädern und der Schiene ab. Ist die Kraft  $F$ , welche der Triebmotor am Triebbradumfang erzeugt, größer als der Widerstand  $R_g$  der gleitenden Reibung zwischen Rad und Schiene, so führt das Rad nicht die gewünschte Rollbewegung aus, sondern es gleitet auf den Schienen. Diese Erscheinung des sog. „Schleuderns“ kann man häufig beim Anfahren eines schweren Zuges auf feuchten Schienen beobachten. Man kann diesen Widerstand  $R_g$  durch die Gleichung

$$R_g = \mu \cdot Q'$$

ausdrücken, wobei  $Q'$  der Achsdruck für einen Triebbradsatz in kg und  $\mu$  die Kennziffer der gleitenden Reibung ist. Die auf den Umfang eines Triebrades übertragbare Zugkraft  $F$  kann demnach höchstens den Wert

$$F = R_g = \mu \cdot Q' \cdot 0,5$$

erreichen. Ist ferner  $V$  die kilometrische Stundengeschwindigkeit, so erhält man die Höchstleistung einer Triebachse zu

$$L = \frac{\mu \cdot Q' \cdot V}{3,6 \cdot 75} \text{ PS.}$$

Setzt man in diesen Ausdruck die zulässigen Höchstwerte für  $V$  und  $Q'$  ein, so wird

$$L = \mu \cdot \frac{2 \cdot 8000 \cdot 100}{3,6 \cdot 75} = \mu \cdot 5926 \text{ PS.}$$

Der Wert von  $\mu$  ist nach Untersuchungen von Poirée von der Geschwindigkeit der Bewegung abhängig und hat für die Reibung zwischen Rad und Schiene folgende Größe

$V$ km/St	$\mu$	$V$ km/St	$\mu$
16,56	0,209	72,0	0,136
26,28	0,206	79,2	0,112
31,68	0,171	(100)	(0,1) <sup>1)</sup>
51,48	0,145		

Beim Anfahren ( $V = 0$ ) sind Höchstwerte für  $\mu$  von 0,25 bis 0,286 auf der elektrisch betriebenen Strecke Spiez—Frutigen bei trockenen Schienen beobachtet worden. Bei Verwendung von mit Luftdruck betriebenen Sandstreuern wurden Werte für  $\mu$  von 0,5 bis 0,6 festgestellt. Setzt man nun in die Gleichung für  $L$  den für  $V = 100$  km gültigen Wert  $\mu = 0,1$  ein, so erhält man die höchste Leistung, welche auf eine Triebachse übertragen werden kann, zu

$$L_{\max} = 592,6 = \text{rd } 600 \text{ PS.}$$

Soll also eine Lokomotive bei  $V = 100$  km an den Triebrädern eine Leistung von 3000 PS erzeugen, so müßte sie  $\frac{3000}{600} = 5$  Triebachsen besitzen.

Es fragt sich nun zunächst, welche Höchstleistungen von einer Dampflokomotive und von einer elektrischen Lokomotive überhaupt erzeugt werden können.

#### I. Dampflokomotive.

Im Jahre 1904 stellte die preußische Staatsbahn-Verwaltung auf der 243 km langen Strecke Berlin—Hannover mit der damals leistungsfähigsten Lokomotive der Hannoverschen Maschinenbau-Aktiengesellschaft, einer  $\frac{2}{5}$  gekuppelten Maschine, Leistungsversuche an. Nach den amtlichen Berichten wurde mit 318 t Zuggewicht hinter dem Tender bei 108 km Beharrungsgeschwindigkeit und bei starker Kesselanstrengung während etwa 10 Min. eine Höchstleistung von rund 1500 PS<sub>i</sub> erzielt. Bei normaler Kesselleistung und  $V = 95$  bis 100 km würde man dann etwa mit 1300 PS<sub>i</sub> zu rechnen haben. Das ergäbe eine Höchstleistung von etwa

$$13 \text{ PS}_i \text{ für die Tonne Lokomotivgewicht.}$$

Dieselbe Bahnverwaltung<sup>2)</sup> stellte im Jahre 1906 auf der Strecke Berlin—Sangerhausen Leistungsversuche mit einer  $\frac{3}{5}$  gekuppelten Lokomotive, die einschließlich Tender 120 t wog, an. Die Höchstleistung wurde dabei auf einer Steigung von 1:150 mit einem Zuge von 585 t bei  $V = 68$  km zu 1620 PS<sub>i</sub> ermittelt, d. h. also, zu

$$13,5 \text{ PS}_i \text{ für die Tonne Lokomotivgewicht.}$$

Von neueren Untersuchungen dieser Frage kommen in erster Linie die Rechnungsergebnisse in Betracht, zu welchen Strahl<sup>3)</sup> auf Grund von Versuchsfahrten mit den neuesten und leistungsfähigsten Dampflokomotiven der preußisch-hessischen Staatsbahnverwaltung gelangt ist; sie sollen hier mitgeteilt werden.

<sup>1)</sup> Dieser letzte Wert ist durch Extrapolation gefunden.

<sup>2)</sup> E. K. B. 1907, S. 424.

<sup>3)</sup> Z. V. d. I. 1913, S. 251 ff.

1. Dampfverbrauch der Lokomotiven.

Der kleinste Dampfverbrauch für 1 PS<sub>4</sub>/St bei vorteilhaftester Füllung beträgt

für Naßdampflokomotiven 11 bis 12 kg bei Zwillingswirkung,  
 für Naßdampflokomotiven 9,5 bis 10 kg bei Verbundwirkung,  
 für Heißdampflokomotiven 6,5 bis 7 kg bei Zwillings- und Vierlingswirkung,  
 für Heißdampflokomotiven 6 bis 6,4 kg bei Verbundwirkung.

2. Größe und Leistungsfähigkeit der Lokomotivkessel.

Da es sich darum handelt, die obere Grenze für die Leistung einer Dampflokomotive zu ermitteln, ist die Beschränkung auf die leistungsfähigste Lokomotivbauart, nämlich die der Heißdampfmaschine, statthaft. Auf derartige Lokomotiven bezieht sich die folgende Zusammenstellung preussischer Lokomotiven

Gattung der Lokomotive	Heizfläche		Rostfläche qm	Dampferzeugung in kg/St auf			
	mit Überhitzer qm	ohne Überhitzer qm		1 qm Rostfläche		1 qm Heizfläche ohne Überhitzer	
				berechnet	beobacht.	berechnet	beobacht.
2—C. H. S. L. vierzylindrig S <sub>10</sub> Bauart 1911	207,25	154,25	2,61	3490	3550	59	60
2—B. H. S. L. S <sub>6</sub> Bauart 1911 . . . . .	177,25	136,91	2,3	3480	3330	58,3	56
2—C. H. P. L. P <sub>8</sub> Bauart 1911 . . . . .	199,54	150,16	2,6	3480	3600	60	62
D—H. G. L. G <sub>8</sub> Bauart 1911 . . . . .	176,87	137,9	2,35	3480	3440	59,6	58

Aus diesen Werten lassen sich nun die Höchstleistungen berechnen, wie sie nachfolgend zusammengestellt sind. In dieser Zusammenstellung ist an Stelle der Lokomotive 2—C. H. S. L. Bauart 1911 die neueste Lokomotivgattung 2—C. H. S. L. Bauart 1912 berücksichtigt, welche die zurzeit leistungsfähigste Schnellzuglokomotive der preussischen Staatsbahn ist. Sie arbeitet mit Verbundwirkung.

Gattung der Lokomotive	Rostfläche qm	Heizfläche		Kolben-durch-messei cm	Kolben-hub cm	Trieb-rad-durch-messer cm	Fahr-ge-schwin-digkeit km/St	Zylin-der-zug-kraft kg	Höchstleistung	
		ohne Überhitzer qm	mit Überhitzer qm						auf 1 qm Rostfläche PS <sub>4</sub>	der Lokomotive PS <sub>4</sub>
2—C. H. S. L. vierzylindrig, Verbund S <sub>10</sub> , Bauart 1912	2,95	165,4	217,54	40/61	66	198	105	4216	560	1652
2—B. H. S. L. S <sub>6</sub> , Bauart 1911 . . . . .	2,3	136,91	177,25	55	63	210	98	3270	515	1185
2—C. H. P. L. P <sub>8</sub> , Bauart 1911 . . . . .	2,6	150,16	199,54	59	63	175	80	4511	515	1340
D—H. G. L. G <sub>8</sub> , Bauart 1911 . . . . .	2,35	137,9	176,87	60	66	135	51,7	6336	515	1210

Anmerkungen:

2—B. H. S. L. S<sub>6</sub> heißt: Heißdampf-Schnellzug-Lokomotive Type S<sub>6</sub> mit zwei Laufachsen und zwei Triebachsen.

D—H. G. L. G<sub>8</sub> heißt: Heißdampf-Güterzug-Lokomotive Type G<sub>8</sub> mit vier Triebachsen.



Es wiegt 2—C. H. P. L. P<sub>8</sub> 121 t, wovon 49 t auf den gekuppelten und 72 t auf den übrigen Achsen ruhen.

Es wiegt 2—C. H. S. L. S<sub>10</sub> Verbund 143 t, wovon 92 t auf Lauf- und Tenderachsen, 51 t auf den gekuppelten Achsen ruhen.

Aus dieser Tabelle ergibt sich die Leistung der Lokomotiven in PS<sub>t</sub> für die Tonne bei der Type

2—C. H. P. L. P<sub>8</sub> zu 11,07 PS<sub>t</sub>/t

2—C. H. S. L. S<sub>10</sub> v zu 11,55 PS<sub>t</sub>/t.

Die Zugkraft einer Dampflokomotive muß mit wachsender Geschwindigkeit abnehmen, da die Kesselleistung begrenzt ist. Bei gegebener stündlicher Dampfentwicklung muß die Zylinderfüllung und der mittlere indizierte Kolbendruck um so kleiner werden, je höher die Geschwindigkeit ist. Diesen Zusammenhang hat Strahl für die S<sub>10</sub> v-Lokomotive aus der höchsten Kesselleistung berechnet und die so gefundenen Grenzleistungen sind in der folgenden Zusammenstellung enthalten.

V km/St	Indizierte Zylinderzugkraft kg	Indizierte Pferdestärken	V km/St	Indizierte Zylinderzugkraft kg	Indizierte Pferdestärken
30	10118	1124	80	5360	1585
40	8440	1250	90	4860	1620
50	7400	1374	100	4390	1650
60	6590	1463	110	4050	1650
70	5910	1530	120	3670	1630

Strahl kommt auf Grund dieser Berechnungen zu dem Ergebnis, daß eine moderne Heißdampf-Verbundlokomotive im Höchstfalle bei angestrenzter Kesselleistung 10 PS<sub>t</sub> für 1 qm Heizfläche leisten kann.

Zieht man nun von der indizierten Leistung der Lokomotive die inneren Verluste und den Verbrauch für die eigene Fortbewegung ab, so erhält man die wirkliche Leistung PS<sub>es</sub> am Zughaken. Das Verhältnis  $\frac{PS_{es}}{PS_t} = \eta$  ist der

Wirkungsgrad der Lokomotive, bezogen auf den Zughaken. Aus dem Wert von PS<sub>es</sub> läßt sich das jeweilige Zuggewicht berechnen, das die Lokomotive zu schleppen vermag. Strahl gibt für die Grenzleistungen der S<sub>10</sub> v-Lokomotive auf den verschiedenen Steigungen bei Berücksichtigung eines mittelstarken Seitenwindes folgende Werte an.

Steigung	V km/St	PS <sub>es</sub>	PS <sub>t</sub>	η
1 : ∞	104	1075	1650	0,652
1 : 1000	96,5	1102	1630	0,675
1 : 500	88,5	1110	1615	0,688
1 : 400	86	1139	1610	0,706
1 : 300	79	1110	1570	0,708
1 : 200	67	1070	1510	0,71
1 : 150	56	1005	1435	0,70
1 : 100	39	935	1230	0,76

Aus diesen rechnerisch gefundenen Ergebnissen geht hervor, daß die höchste Leistung der heutigen Heißdampflokomotiven zwischen 1600 und

1700 PS<sub>t</sub> liegt und daß sich Fahrgeschwindigkeiten bis zu etwa 110 km, diesen Leistungen entsprechend, erreichen lassen. Dabei ist zu beachten, daß die drei gekuppelten Achsen der Lokomotive S<sub>10v</sub> mit 51 t belastet sind, also jede Achse mit 17 t. Man könnte nun die Möglichkeit ins Auge fassen, die Leistungsfähigkeit der Lokomotiven durch Vergrößerung der Heizfläche  $F_H$  einerseits und der Rostfläche  $F_R$  anderseits zu erhöhen. Dem stehen aber folgende Bedenken entgegen.

Bei allen Dampflokomotiven liegt das Verhältnis  $\frac{F_H}{F_R}$  zwischen den Werten 50 und 100. Wächst  $\frac{F_H}{F_R}$  von 50 auf 100, so nimmt die Verdampfung auf 1 qm der Rostfläche nur um 6,5% zu, während die mittlere Verdampfung auf 1 qm Heizfläche sogar um beinahe 47% abnimmt. Würde man das Verhältnis  $\frac{F_H}{F_R}$  noch weiter vergrößern, so stände der Gewinn einer besseren Ausnutzung der Kohle in keinem Verhältnis mehr zu der unwirtschaftlichen Gewichtsvermehrung, denn für  $\frac{F_H}{F_R} = \infty$  ist die Verdampfung auf 1 qm Rostfläche bezogen nur um 7% größer als für  $\frac{F_H}{F_R} = 50$ . Der einzig gangbare Weg der Leistungssteigerung wäre also der, die Heizfläche und gleichzeitig die Rostfläche so zu vergrößern, daß ihr Verhältnis  $\frac{F_H}{F_R}$  höchstens den Wert 100 erreicht. Dann wird aber eine weitere Kuppelachse notwendig, zum Nachteil für die Beweglichkeit der Lokomotive in Gleiskrümmungen und das Gewicht würde gleichzeitig für Lokomotive und Tender wegen der größeren Kohlen- und Wasservorräte zunehmen. Der Verbrauch für die eigene Fortbewegung steigt damit ebenfalls und schließlich wird ein Heizer nicht mehr genügen, so daß eine Lokomotive drei Mann zu ihrer Bedienung erfordert.

Diese Betrachtungen dürften zur Genüge dargetan haben, daß, wenn auch mit der Dampflokomotive höhere Leistungen als etwa 1700 PS<sub>t</sub> zu erreichen sind, der wirtschaftliche Erfolg dieser Leistungserhöhung sehr in Frage gestellt wird.

Die Wirtschaftlichkeit der Zugbeförderung kann nur dadurch gehoben werden, daß das Lokomotivgewicht im Verhältnis zur Leistung so weit wie möglich herabgesetzt und daß die Bedienung der Lokomotiven einfacher wird, um an Kosten zu sparen. Diese Forderungen werden durch die elektrische Lokomotive in hohem Maße erfüllt.

## II. Die elektrische Lokomotive.

Während die Dampflokomotive in dem schweren Dampfkessel den Arbeitserzeuger mitschleppen muß, besitzt die elektrische Lokomotive nur die zur Umformung der zugeführten elektrischen Arbeit erforderlichen Teile, nämlich den Motor und bei Wechselstrombetrieb noch den Transformator.

Was nun zunächst die größte Leistung anbelangt, die einer Lokomotive zugeführt werden kann, so hat man von der Tatsache auszugehen, daß ein Stromabnehmer mit Sicherheit und dauernd 100 Ampere leiten kann. Eine Lokomotive läßt sich ohne Schwierigkeit mit 2 Stromabnehmern ausrüsten,

so daß ihr ein Gesamtstrom von 200 Ampere dauernd zugeführt werden kann. Bei einer Fahrdrachtspannung von 20 000 Volt ergäbe dies eine Leistung von 4000 Kilovoltampere, oder bei einer Phasenverschiebung von  $\cos \varphi = 0,95$  und einem Wirkungsgrad  $\eta = 0,92$  eine Leistung von 4750 PS an der Motorwelle, also etwa das Dreifache der Höchstleistung einer Heißdampf-Verbundlokomotive neuester Bauart.

Die auf die Einheit des Lokomotivgewichtes entfallende Leistung schwankt innerhalb weiter Grenzen. Das ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß die elektrotechnischen Firmen erst Erfahrungen im Bau von Vollbahnlokomotiven sammeln mußten. Man hat dabei den Umstand im Auge zu behalten, daß das Gewicht einer Lokomotive gegebener Leistung von der Zahl der diese Leistung erzeugenden Motoren abhängt. Eine Lokomotive, deren vier Achsen durch einzelne Achsmotoren von z. B. je 150 PS Leistung angetrieben werden, wird im allgemeinen schwerer ausfallen, als wenn die vier Achsen durch einen einzigen Motor von 600 PS angetrieben werden.

Die Entwicklung des Lokomotivbaues ging denn auch in der Richtung, den Einzelantrieb der Achsen durch deren Kupplung bei gemeinsamem Antrieb durch einen oder mehrere größere Motoren zu ersetzen.

Es ist ferner zu bedenken, daß die Gewichtersparnis um so bedeutungsvoller wird, je größer die Fahrgeschwindigkeit der Lokomotive ist. Für eine langsam fahrende Güterzuglokomotive tritt demnach die Forderung der Gewichtersparnis weniger in den Vordergrund als die Notwendigkeit, das Reibungsgewicht den bedeutenden Zugkräften anzupassen. Die nachfolgende Zusammenstellung<sup>1)</sup> wird zeigen, wie dieser Grundsatz beim Bau der einzelnen Lokomotiven berücksichtigt ist; ihr Hauptzweck ist aber der, nachzuweisen, wie weit man heute schon in der Ausnutzung des Lokomotivgewichtes gekommen ist.

Lokomotivgattung	Erbauer	Stromart und Spannung	Fahrgeschwindigkeit km/St	Zahl der Motoren	Gesamtleistung der Motoren PS (Stand.-Leistg.)	Größte Zugkraft am Radumfang kg	Gesamtgewicht der Lokomotive in t	PS bezogen auf 1 t d. Lokomotivgewichtes
0—D—0 Güterzuglokomotive	S. S. W.	Wechselstrom 15 000 Volt 16 $\frac{1}{2}$ Wellen	40—60	1	800	10 000	64	12,5
0—B—0 Güterzuglokomotive	S. S. W.	Wechselstrom 5500 Volt 16 Wellen	45	2	350	4 800	24	14,6
1—B—B—1 Personen- u. Güterzuglokomotive	A. E. G.	Wechselstrom 15 000 Volt 15 Wellen	75 max.	2	1600	13 500	93	17,2
2—B—2 Schnellzuglokomotive	S. S. W.	Wechselstrom 15 000 Volt 15 Wellen	100	1	1250	6 700	70	17,9
1—C—1 Personenzuglokomotive	A. E. G.	Wechselstrom 15 000 Volt 16 $\frac{1}{2}$ Wellen	75 max.	2	1600	12 500 am Haken	85	19,5

<sup>1)</sup> Helios 1912, S. 32 und 33.

Lokomotivgattung	Erbauer	Stromart und Spannung	Fahrgeschwindigkeit km/St.	Zahl der Motoren	Gesamtleistung der Motoren PS (Stund-Leistg.)	Größte Zugkraft am Radumfang kg	Gesamtwicht der Lokomotive in t	PS bezogen auf 1 t d. Lokomotivgewichts
1—C—1 Personen u. Güterzuglokomotive	S. S. W.	Wechselstrom 15 000 Volt 15 Wellen	60—75	2	1400	10 500	66	21,2
C—C Personen- und Güterzuglokomotive	Örlikon	Wechselstrom 6600 Volt 25 Wellen	42—70	2	2000	13 000 am Haken	90,2	22,2
1—E—1 Personen und Güterzuglokomotive	Örlikon	Wechselstrom 15 000 Volt 15 Wellen	50—75	2	2500	18 000	108	23,2
1—C—1 Schnellzuglokomotive	S. S. W.	10 000 Volt 16 $\frac{2}{3}$ Wellen	90—110	1	1800	10 500	75,5	23,8
0—D—0 Personen und Güterzuglokomotive	B.B.Cie.	Drehstrom 3000 Volt 15 Wellen	71	2	1700	12 000 am Haken	68	25
1—D—1 Güterzuglokomotive	S. S. W.	Wechselstrom 10 000 Volt 16 $\frac{2}{3}$ Wellen	70—83	2	2500	15 500	94	26,6
2—B—B—2 Schnellzuglokomotive	West	Gleichstrom 650 Volt Drehstrom 3000 Volt	97—128	2	4000	35 000	149	26,8
E Güterzuglokomotive	S. i. W.	15 Wellen	45	2	2000	11 650	60	33,3

## Erläuterungen der Zeichen und Abkürzungen.

In der ersten senkrechten Reihe bezeichnen die lateinischen großen Buchstaben die Zahl der Kuppelachsen, z. B. B = 2 Kuppelachsen, C = 3 Kuppelachsen, D = 4 Kuppelachsen.

Die arabischen Ziffern geben die Zahl der Laufachsen an. So hat z. B. die Lokomotive 1—C—1 eine führende Laufachse, drei Kuppelachsen und eine Schleppachse.

S. S. W. = Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.

A. E. G. = Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

Örlikon = Maschinenfabrik Örlikon, Örlikon b. Zürich.

B. B. Cie. = Brown, Boveri & Cie., Baden, Schweiz.

West. = Westinghouse El. and Man. Co., Pittsburg, Pa.

S. i. W. = Società Italiana Westinghouse, Vado-Ligure.

Die Zusammenstellung zeigt, daß es bereits heute möglich ist, eine Wechselstromlokomotive mit 26 bis 27 PS für die Tonne Lokomotivgewicht zu bauen. Da aber die in der Zusammenstellung angegebenen Leistungen Stundenleistungen an der Motorwelle darstellen, die für kurze Zeit wesentlich gesteigert werden können; da ferner die Leistung der Dampflokomotive für höchste Beanspruchung in PS<sub>1</sub> angegeben war, so ist man berechtigt, die nach dem heutigen Stande der Bauverfahren erreichbare Höchstleistung der elektrischen Lokomotive mit

30 PS<sub>1</sub> für die Tonne Lokomotivgewicht

festzulegen, gegenüber 11 bis 13 PS<sub>1</sub> bei der Heißdampf-Verbundlokomotive<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Auf Grund der früher mitgeteilten Reibungszahlen ist die höchste, überhaupt für 1 t des Lokomotivgewichtes erzielbare Leistung 37 PS, bezogen auf den Radumfang und unter der Voraussetzung, daß das gesamte Lokomotivgewicht Reibungsgewicht ist.

In Anbetracht der kurzen Entwicklungszeit der einphasigen Lokomotive wird man in der Vermutung nicht fehlgehen, daß man dieser bisher nur in einzelnen Fällen erreichten Höchstleistung in nicht allzuferner Zeit häufiger nahe kommen wird.

Die Zusammenstellung zeigt ferner, daß man bereits Leistungen von 4000 PS in einer elektrischen Lokomotive untergebracht hat. Es ist dies die 2—B+B—2 Gleichstromlokomotive von Westinghouse, welche zum Betrieb der Pennsylvania-Tunnel and Terminal Railroad dient. Sie besteht aus zwei gleichen Hälften der Bauart 2—B, von denen jede durch einen Motor von 2000 PS angetrieben wird, wobei die Kuppelachsen allerdings mit durchschnittlich je 25,5 t belastet sind. Die größten bisher gebauten Wechselstromlokomotiven enthalten Motoren mit einer Einzelleistung von 1250 PS, jedoch lassen sich heute bereits diese Motoren für Leistungen von 2000 PS<sub>4</sub> bauen und es besteht kein Zweifel, daß es möglich werden wird, eine Doppellokomotive, etwa von der Bauart 1—C+C—1 mit zwei Motoren von je 2000 PS<sub>4</sub> auszurüsten, so daß die Gesamtleistung der Lokomotive 4000 PS<sub>4</sub> betragen würde, wobei die Höchstleistung einer Kuppelachse mit 670 PS begrenzt ist, entsprechend einem höchstzulässigen Achsdruck von 17,8 t. Wenn es dann noch gelingt, durch geschickte bauliche Anordnung die Leistung von 30 PS<sub>4</sub> für die Tonne zu erreichen, so würde diese Lokomotive ein Gewicht von 133 t besitzen, von welchen 107 t auf die Kuppelachsen und 26 t auf die beiden Laufachsen entfallen würden.

Eine derartige Lokomotive hätte demnach mehr als die doppelte Leistungsfähigkeit einer neuzeitlichen Heißdampf-Verbundlokomotive, während ihr Gewicht nur  $\frac{133}{143} = 93\%$  desjenigen dieser Heißdampflokomotive ausmacht, die nur 1700 PS im Höchsthalle leistet. Wenn dabei der Achsdruck mit 17,8 t zugelassen wurde, so ist dabei zu bedenken, daß auch der Achsdruck der  $S_{10}v$ -Heißdampflokomotive 17 t beträgt. Die geringe Erhöhung auf 17,8 t ist dadurch gerechtfertigt, daß die elektrische Lokomotive viel ruhiger läuft, so daß die durch die Bewegung entstehenden zusätzlichen Druckwirkungen geringer ausfallen wie bei der Dampflokomotive.

Nach der von Hruschka aufgestellten Widerstandsformel für elektrische Lokomotiven würde diese Lokomotive bei  $V = 100$  km/St und bei einem mittelstarken Gegenwind (vgl. S. 82) etwa 550 PS zur eigenen Fortbewegung benötigen.

Die Heißdampfmaschine  $S_{10}v$  würde bei gleichen Annahmen der Geschwindigkeit und des Gegenwindes nach den Ermittlungen von Strahl 530 PS verzehren, so daß sich für diese Lokomotive mit der indizierten Höchstleistung von 1650 PS<sub>4</sub> ein Gesamtwirkungsgrad von 68% ergibt.

Bewertet man bei der elektrischen Lokomotive die Verluste in Motor und Transformator mit insgesamt 10%, so errechnet sich für diese ein Gesamtwirkungsgrad vom Stromabnehmer bis zum Zughaken von 76%.

Eine elektrische Lokomotive mit einer Leistung von 1650 PS<sub>4</sub>, d. h. also am Stromabnehmer gerechnet, die für eine Geschwindigkeit von 100 km geeignet wäre, könnte etwa die Bauform 1—C—1 besitzen. Die Belastung wäre etwa so zu verteilen, daß auf die drei Kuppelachsen ein Gesamtgewicht

von  $3 \times 16 = 48$  t und auf die beiden Laufachsen ein Gewicht von  $2 \times 11 = 22$  t entfällt. Die Maschine könnte dann im Höchsthalle  $3 \times 600 = 1800$  PS entwickeln.

Der Bewegungswiderstand dieser Lokomotive ergibt sich nach der Formel von Hruschka unter Berücksichtigung eines mittelstarken Seitenwindes von 12 km/St zu 763 kg und die entsprechende Leistung zu 283 PS. Von den 1650 indizierten Pferdestärken werden an der Motorwelle nutzbar 1485 PS, so daß am Zughaken noch  $1485 - 283 = 1202$  PS nutzbar sind. Der Wirkungsgrad, also das Verhältnis  $\frac{\text{Zughakenleistung}}{\text{Stromabnehmerleistung}}$  hat demnach den Wert  $\eta = \frac{1202}{1650} = 0,73$ .

Durch diese Rechnung ist der Nachweis dafür geführt, daß der gegen die elektrische Lokomotive oft erhobene Einwand, ihr Wirkungsgrad sei wegen der Umformungsverluste auf der Lokomotive kleiner als derjenige einer Dampflokomotive, nicht stichhaltig ist. In dem zuletzt durchgerechneten Beispiel beträgt ferner die Leistung für die Tonne Lokomotivgewicht  $\frac{1650}{70} = 23,6$  PS, ein Wert, der sich nach den bisherigen Ausführungen unter allen Umständen erreichen lassen wird.

Wenn oben gesagt wurde, daß einem Fahrzeug im Höchsthalle etwa 5000 PS<sub>e</sub> elektrisch zugeführt werden könnten, so ist dabei zu bedenken, daß unter Zugrundelegung einer Geschwindigkeit von  $V = 100$  km/St und bei einem Achsdruck von 16 t immerhin acht Kuppelachsen erforderlich wären.

Eine einzelne Lokomotive läßt sich aber aus Gründen der Lenkbarkeit nicht mit einer derartig großen Zahl von Kuppelachsen ausführen, so daß man die Leistung auf zwei Lokomotiven, die kurzgekuppelt werden können und die von einer gemeinsamen Stelle aus gesteuert werden, verteilen wird. Bei einem Wirkungsgrad der Lokomotiven von 75% würde dann am Zughaken eine Leistung von 3750 PS zur Verfügung stehen, entsprechend einer Zugkraft bei  $V = 100$  km/St von 10125 kg. Diese Lokomotive würde einen aus 41 vierachsigen, 44 t schweren Wagen bestehenden Zug schleppen können. Das ist aber eine Leistung, welche im Eisenbahnbetriebe nicht ausgenützt werden kann, da nach der B. O. ein Schnellzug höchstens 44 Achsen besitzen darf.

Die volle Ausnützung einer derartig hohen Leistung könnte daher erst bei sehr hoher Fahrgeschwindigkeit erreicht werden, die sich folgendermaßen schätzen läßt.

Zunächst kann man das Gewicht der beiden Lokomotiven auf zusammen  $\frac{5000}{30} = 170$  t schätzen.

Der Zug bestehe aus zehn vierachsigen Wagen von je 44 t Gewicht; der Wirkungsgrad des Motors sei 90%. Dann gilt die Gleichung

$$\left[2,5 + \frac{1}{40} \left(\frac{V}{10}\right)^2\right] \cdot 44 \cdot 10 + 170 \left[2,5 + \frac{1}{15} \left(\frac{V}{10}\right)^2\right] = 5000 \cdot 0,9 \cdot \frac{3,6 \cdot 75}{V}.$$

Hieraus berechnet sich  $V$  zu 163 km und die Zugkraft am Haken zu 4022 kg. Das entspricht einer Leistung am Zughaken von 2430 PS, d. h. die Lokomotive würde bei dieser hohen Geschwindigkeit nur einen Wirkungsgrad von  $\frac{2430}{5000} = 0,49\%$  besitzen. —

Wenn durch diese Rechnung der Nachweis geführt worden ist, daß der elektrische Lokomotivbetrieb eine ganz bedeutende Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zuläßt, soweit die Fahrt auf ebener Bahn in Frage kommt, so gilt dies noch viel mehr für die Fahrt auf großen Steigungen. Das soll an einem Beispiel erläutert werden.

Als Höchstleistung einer Dampflokomotive ist diejenige zu bezeichnen, welche sie bei vorteilhaftester Füllung und Fahrgeschwindigkeit zu entwickeln vermag. Wird diese vorteilhafteste Fahrgeschwindigkeit unter- oder überschritten, so wird diese Höchstleistung nicht mehr erreicht. Im ersteren Falle, also bei geringerer Geschwindigkeit, ist diese Erscheinung die Folge der größeren Füllungen und der geringeren Feueranfuchung, im letzteren Falle, also bei höherer Geschwindigkeit, wird die Drosselung des mit größerer Geschwindigkeit in die Zylinder einströmenden Dampfes vergrößert.

Man kann nach Strahl<sup>1)</sup> diese Leistungsverminderung durch die Gleichung

$$\frac{L_{\alpha}}{L'_i} = 0,6 \left( 2 - \frac{v}{v'} \right) \frac{v}{v'} + 0,4$$

ausdrücken, worin  $L'_i$  und  $v'$  die Werte der Höchstleistung und der vorteilhaftesten Geschwindigkeit,  $L_{\alpha}$  und  $v$  die Werte der erreichbaren Leistung bei der neuen Geschwindigkeit  $v$  darstellen.

Für die bereits vorher näher betrachtete leistungsfähigste Heißdampflokomotive der Bauart  $S_{10}$   $v$  beträgt die Höchstleistung 1650 PS<sub>i</sub> bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit von 104 km/St.

Dieselbe Lokomotive vermag auf einer Steigung von 10<sup>0</sup>/<sub>00</sub> nur noch die höchste Leistung von 1230 PS<sub>i</sub> zu entwickeln, und zwar wenn sie mit 39 km/St. fährt. Sie leistet dann am Zughaken 935 PS<sub>e</sub>, so daß ihr gesamter Wirkungsgrad 76% beträgt. Vorausgesetzt ist bei dieser Leistung ein mittelstarker Seitenwind, der in der Formel für den Bewegungswiderstand durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit um 12 km berücksichtigt ist.

Diese Leistung von 935 PS am Zughaken bei 39 km Geschwindigkeit entspricht einem Zuggewicht von 492 t; der Zug kann also aus elf Wagen zu 44 t bestehen.

Wenn nun die oben bereits besprochene elektrische Lokomotive, die bei einem Gewicht von 70 t ebenfalls die Höchstleistung von 1650 PS besitzt, das gleiche Zuggewicht von 492 t auf der Steigung von 10<sup>0</sup>/<sub>00</sub> schleppen soll, so ergibt sich ihre Geschwindigkeit aus der Gleichung

$$\left[ 2,5 + 10 + \frac{1}{40} \left( \frac{V + 12}{10} \right)^2 \right] \cdot 492 + 70 \left[ 2,5 + 10 + \frac{1}{15} \left( \frac{V + 12}{10} \right)^2 \right] \\ = 1650 \cdot 0,9 \cdot \frac{3,6 \cdot 75}{V} \text{ zu } V = \text{rd } 52 \text{ km/St.}$$

<sup>1)</sup> Z. V. d. I. 1913, S. 254.

Dieser Geschwindigkeit entspricht eine Leistung von 1280 PS für den fahrenden Zug und von 205 PS für den Eigenverbrauch der Lokomotive. Die Gesamtleistung ist also 1485 PS und entspricht bei einem Wirkungsgrad des Motors und Transformators von 90% der indizierten Leistung von 1650 PS.

Der Wirkungsgrad der Lokomotive hat den Wert  $\frac{1280}{1650} = 78\%$ .

#### Z u s a m m e n f a s s u n g.

Der Vergleich zwischen einer elektrischen und Dampflokomotive gleicher Höchstleistung zeigt, daß die elektrische Lokomotive einen Zug von 492 t auf einer Steigung von 10‰ mit einer Geschwindigkeit von 52 km und mit einem Wirkungsgrade von 78% zu ziehen vermag, während die Dampflokomotive nur eine Geschwindigkeit von 39 km bei einem Wirkungsgrade von 76% erreicht. Die Belastung der Kuppelachsen beträgt bei der elektrischen Lokomotive 16 t, dagegen bei der Dampflokomotive 17 t. Das tote Gewicht beträgt bei Verwendung der Dampflokomotive  $\frac{143}{492} = 29\%$ , bei Verwendung der elektrischen Lokomotive dagegen nur  $\frac{70}{492} = 14,2\%$  des zu schleppenden Zuggewichtes.

Diese auf rechnerischem Wege gefundenen Ergebnisse sind durch die Betriebserfahrung durchaus bestätigt worden. Als Beispiel hierfür sollen die Werte mitgeteilt werden, welche im Jahre 1905 auf der New York-Centralbahn durch Versuchsfahrten mit einer 2—C—1 Dampflokomotive der Pacificbauart und mit einer 1—D—1 elektrischen Lokomotive ermittelt worden sind. Die normale Leistung der elektrischen Lokomotive betrug 2200 PS, ihre höchste Leistung 3000 PS. Sie war mit vier Gleichstrommotoren von je 550 PS ausgerüstet und wurde mit 650 Volt betrieben<sup>1)</sup>.

	Dampf- lokomotive	Elektrische Lokomotive	Unterschied zugunsten der elektr. Lokom.
Gesamtlänge der Lokomotive in m	20,62	11,25	9,37
Gewicht in t . . . . .	155	91	64
Gewichtsbelastung einer Treib- achse in t . . . . .	21,4	16,14	5,26
Zuglast in t . . . . .	230	275,83	45,83
Verhältnis des Lokomotivgewich- tes zum Zuggewicht in % .	72	33	39
Beschleunigung in m/sec <sup>2</sup> . . . .	0,395	0,63	0,235
V = 80 km/St erreicht nach sec	203	127	76

Schließlich möge noch eine Rechnung Platz finden, welche nachweisen soll, wie sich das Lokomotivgewicht bei Dampf- und elektrischem Betrieb unter Annahme sehr hoher Geschwindigkeiten verhält. Die Grundlagen dieser Rechnung seien folgende:

Zuggewicht  $Q_z = 440$  t = 10 Wagen zu 44 t  
Geschwindigkeit  $V = 200$  km/St.

Zunächst erfordert das Zuggewicht bei  $V = 200$  eine Zugkraft von 5500 kg.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1905, S. 569.



Der Bewegungswiderstand der Lokomotive soll in beiden Fällen nach der Frankschen Formel

$$W = \left[ 2,5 + 0,0142 \left( \frac{V}{10} \right)^2 \right] \cdot Q_L + 0,54 \cdot 1,1 F' \left( \frac{V}{10} \right)^3$$

berechnet werden, wobei  $F'$  für eine moderne Heißdampflokomotive den Wert von 10 qm besitzt. Obgleich dieser Wert für eine elektrische Lokomotive reichlich groß erscheint, soll er doch zur Vereinfachung der Rechnung in beiden Fällen benutzt werden.

Wenn  $Q_L$  das Lokomotivgewicht in t bezeichnet, so ist die erreichbare Höchstleistung der Dampflokomotive mit  $Q_L \cdot 11 \text{ PS}_t$ , die der elektrischen Lokomotive mit  $Q_L \cdot 30 \text{ PS}_t$  zu bewerten.

Hieraus ergeben sich folgende Leistungsgleichungen:

1. Dampfbetrieb

$$Q_L \cdot 11 \cdot 270 = 5500 V + Q_L \cdot 2,5 \cdot V + Q_L \cdot 0,00005 V^3 + 0,06 V^3.$$

Hieraus folgt für  $V = 200$

$$Q_L = \frac{0,06 V^3 + 5500 V}{2970 - 500 - 400} = 763 \text{ t Lokomotivgewicht}$$

2. Elektrischer Betrieb.

$$Q_L \cdot 30 \cdot 270 = 5500 V + Q_L \cdot 2,5 V + Q_L \cdot 0,00005 V^3 + 0,06 V^3$$

Für  $V = 200$  wird wieder

$$Q_L = \frac{0,06 V^3 + 5500 V}{8100 - 500 - 400} = 219 \text{ t Lokomotivgewicht.}$$

Das Gewicht der Dampflokomotive müßte also in diesem Falle 3,5 mal so groß sein als das der elektrischen Lokomotive.

Dabei beträgt das Lokomotivgewicht

- bei Dampfbetrieb 173% des Zuggewichtes
- bei elektrischem Betrieb 50% des Zuggewichtes.

Die indizierte Leistung beträgt

- bei Dampfbetrieb  $763 \cdot 11 = 8393 \text{ PS}_t$
- bei elektrischem Betrieb  $219 \cdot 30 = 6570 \text{ PS}_t = 4835 \text{ kW}$ .

Der fahrende Zug beansprucht eine Leistung von 4070 PS; daher ist

der Wirkungsgrad der Dampflokomotive  $\frac{4070}{8393} = 47\%$

der Wirkungsgrad der elektrischen Lokomotive  $\frac{4070}{6570} = 62\%$ .

Es würde aus dem Rahmen dieses Buches herausfallen, wenn an dieser Stelle die technische Ausführbarkeit der beiden Fälle näher besprochen würde. Aus dem vorhergehenden dürfte sich indessen ergeben, daß nach dem heutigen Stand der Technik die Ausführbarkeit eines ev. zweiteiligen elektrischen Triebfahrzeugs für 6570 PS<sub>t</sub> bei  $V = 200 \text{ km/St}$  mit einem Gesamtgewicht von 219 t nicht unmöglich erscheint, während ein Triebfahrzeug von 763 t, dessen

Gewicht 173% der Nutzlast darstellt, sowohl vom technischen als auch vom wirtschaftlichen Standpunkt aus als unmöglich zu bezeichnen ist.

Jedenfalls dürften aber die verschiedenen Rechnungen den Nachweis erbracht haben dafür, daß die Leistungsfähigkeit der elektrischen Lokomotive die der vollkommensten Dampflokomotive um so mehr übertrifft, je größer die verlangten Zugkräfte und Geschwindigkeiten sind und daß bei sehr großen Geschwindigkeiten nach dem heutigen Stande der Technik nur der elektrische Vollbahnbetrieb in Frage kommen kann.

## 20. Dampflokomotive oder elektrische Lokomotive?

### Ein wirtschaftlicher Vergleich.

Die Entscheidung der Frage, ob für eine Vollbahnstrecke der elektrische Betrieb zweckmäßig ist, muß zunächst von wirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängig gemacht werden; denn in rein technischer Beziehung sind die Vorzüge der elektrischen Lokomotive gegenüber der Dampflokomotive, die in fast hundertjährigem Entwicklungsgang eine hohe Stufe der Vollkommenheit erreicht hat, nicht so schwerwiegend, daß sie abgesehen von verhältnismäßig wenigen Fällen, allein bestimmend sein könnten, den Betrieb durch die hohen Kosten für Verzinsung und Abschreibung der Neuanlage zu belasten.

Es wäre aber durchaus falsch, eine derartige wirtschaftliche Vergleichsrechnung nur auf die einzelnen Lokomotiven zu beziehen; denn beim elektrischen Betrieb bildet das Triebfahrzeug nur ein Glied im großen Ganzen, während die Dampflokomotive eine selbständige Betriebseinheit darstellt.

Es ist ferner bekannt, daß ein elektrisches Kraftwerk um so günstiger arbeitet, je größer seine Leistungsfähigkeit und seine Ausnutzung ist. Hieraus ergibt sich dann weiter, daß, da neben den reinen Stromerzeugungskosten auch die festen Kosten für Verzinsung, Tilgung und Rücklagen des Kraftwerkes auf die jährlichen Zugförderungskosten verteilt werden müssen, diese letzteren, bezogen auf die Einheit der Fahrleistung, also z. B. auf 1000 Tonnenkilometer, um so geringer werden, je größer die jährliche Stromarbeit ist und je gleichmäßiger sich diese zeitlich verteilt.

Die Zugförderungskosten bei elektrischem Betrieb sind ferner belastet durch die Abschreibung und Verzinsung der Oberleitungsanlage. Bei gegebenen Stromerzeugungskosten wird demnach eine bestimmte Strecke mit um so größerem wirtschaftlichen Erfolg elektrisch betrieben werden können, je dichter ihr Verkehr ist.

Um also zu einem maßgebenden Vergleich auf wirtschaftlicher Grundlage zu gelangen, wird man für beide Fälle die gesamten jährlichen Zugbeförderungskosten für eine bestimmte Strecke, unter Umständen für ein Netz zusammengehöriger Strecken ermitteln müssen. Man wird dann bei technischer Gleichwertigkeit derjenigen Betriebsart den Vorzug geben, welche die geringsten jährlichen Gesamtkosten erfordert.

Über diese Kosten gibt die vom Kgl. Bayerischen Staatsministerium für Verkehrsangelegenheiten im Jahre 1908 auf Grund sorgfältiger statistischer und rechnerischer Ermittlungen ausgearbeitete „Denkschrift über die Einführung des elektrischen Betriebes auf den bayerischen Staatsbahnen“

maßgebende Anhaltspunkte, deren Richtigkeit inzwischen durch die Betriebsergebnisse der Versuchsstrecke Dessau—Bitterfeld bestätigt worden ist.

Als Beispiel möge an dieser Stelle die vergleichende Berechnung für die Bahnlinie Salzburg—Bad Reichenhall—Berchtesgaden mitgeteilt werden.

Der Vergleich ist auf der Grundlage des Verkehrs, wie er auf dieser Strecke nach der bisherigen Verkehrssteigerung für das Jahr 1910 zu erwarten war, aufgestellt. Dabei ist es nötig, zum Verständnis des Folgenden einige betriebstechnische Erläuterungen vorzunehmen.

Bei der Bedienung des durchgehenden Verkehrs, z. B. der durchgehenden Wagen München—Berchtesgaden über Freilassing, Bad Reichenhall, macht sich die Verschiedenheit in den Streckenverhältnissen der beiden Linien in ungünstiger Weise geltend. Die Linie bis Reichenhall hat nur geringe Steigung und ist eine ausgesprochene Flachlandbahn. Die anschließende Zweigbahn nach Berchtesgaden dagegen beginnt unmittelbar hinter Kirchberg—Reichenhall mit einer 5,7 km langen Steigung von 40‰ und weist auch im weiteren Verlauf die Eigenarten einer Gebirgsbahn auf. Diese Strecke kann daher nur von Lokomotiven besonderer Bauart befahren werden, die bei geringem Gewicht eine möglichst große Zugkraft entwickeln; die schnellfahrenden Lokomotiven hingegen, welche die Züge zwischen Salzburg und Reichenhall befördern, können auf die Zweigbahn nicht übergehen. In Bad Reichenhall muß daher Maschinenwechsel stattfinden. Trotzdem ist es nicht möglich, wenigstens die Züge ohne Änderung ihrer Zusammensetzung durchzuführen.

Diese Umständlichkeit im Lokomotivdienst und in der Zugbildung, ferner die Schwierigkeiten, mit denen der Dampftrieb bei der Überwindung der großen Steigungen zu kämpfen hat, machten sich infolge der raschen Entwicklung des Verkehrs nach Berchtesgaden in erhöhtem Maße fühlbar. Sie führten zu der Frage, ob nicht die Einführung des elektrischen Betriebes Abhilfe schaffen könnte.

Die elektrische Lokomotive kann den Anforderungen beider Strecken, einerseits rascher Fahrt in der Ebene, andererseits großer Zugkraft auf den Steigungen, gerecht werden. Die Züge können daher ohne Maschinenwechsel von Salzburg über Reichenhall nach Berchtesgaden durchgeführt werden.

Die Folge dieser Neuordnung ist die, daß für den gesamten Betrieb der Strecke acht elektrische Lokomotiven, dagegen bei Dampftrieb auf der Strecke Salzburg—Bad Reichenhall sieben Lokomotiven der Bauart D XII und auf der Strecke Bad Reichenhall—Berchtesgaden neun Lokomotiven der Bauart D VIII in Betracht kommen.

Die sieben Lokomotiven der Bauart D XII leisten dabei sowohl auf der Strecke Salzburg—Bad Reichenhall, als auch auf der Strecke Salzburg—Rosenheim Dienst; daher ist in der nachfolgenden Vergleichsrechnung nur der Teil der jährlichen Gesamtkosten für diese sieben Lokomotiven eingestellt, der auf den Betrieb der ersten Strecke entfällt.

I. Kostenanschlag für Einführung des elektrischen Betriebes auf der Bahnlinie Salzburg—Bad Reichenhall—Berchtesgaden.

Zipp, Vollbahnlokomotiven.

8

<b>A. Fahrbetriebsmittel:</b>	
acht elektrische Lokomotiven . . . . .	780 000 $\mathcal{M}$
<b>B. Streckenausrüstung:</b>	
a) Fahrdrabtleitung einschließlich Maste und Verlegung	701 000 „
b) Speiseleitungen und Schienenrückleitungen . . . . .	120 000 „
c) Umlegung von Schwachstromleitungen, Änderung der Lokomotivschuppen . . . . .	169 000 „
	<u>Summa 1 770 000 <math>\mathcal{M}</math></u>

**II. Kosten des Dampfbetriebes.**

Die Jahresleistung beträgt für 1910 für die Strecke  
 Salzburg—Bad Reichenhall 133 925 Zugkilometer,  
 entsprechend 20 716 288 Tonnenkilometer;  
 Bad Reichenhall—Berchtesgaden 101 017 Zugkilometer,  
 entsprechend 7 970 231 Tonnenkilometer.

**A. Bezüge der Lokomotivmannschaften . . . . . 53 240  $\mathcal{M}$**

**B. Kosten der Betriebsstoffe.**

a) Strecke Salzburg—Bad Reichenhall  
 a) Brennstoff

An Brennstoff werden für 1000 Zugkilometer 15 t Ruhrkohle (Normalkohle) verbraucht.

1 t Ruhrkohle kostet in Freilassing:

Preis auf der Bahnversandstation . . . . .	16,50 $\mathcal{M}$
außerbayrische Fracht . . . . .	1,64 „
bayrische Fracht . . . . .	6,70 „
Entladung, Lagerung und Bekohlung . . . . .	0,76 „

Kosten für 1 t Ruhrkohle auf der Lokomotive Summa 25,60  $\mathcal{M}$

Für 133 925 Zugkilometer betragen also die Kosten des Brennstoffs

$$133\,925 \cdot \frac{15 \cdot 25,60}{1000} = 51\,428 \mathcal{M}.$$

β) Speisewasser.

Für 1000 Zugkilometer werden 124 m<sup>3</sup> Speisewasser zum Preise von 0,12  $\mathcal{M}$  für 1 m<sup>3</sup> verbraucht, also für 133 925 Zugkilometer betragen die Kosten für das Speisewasser . . . . . 2009  $\mathcal{M}$

γ) Schmieröl und sonstige Betriebsstoffe für die Lokomotive.

Diese kosten für 1000 Zugkilometer 20  $\mathcal{M}$ . Mithin ergibt sich für den Jahresverbrauch der Betrag von . . . . . 2680  $\mathcal{M}$

b) Strecke Bad Reichenhall—Berchtesgaden.

a) Brennstoff.

Auf dieser Strecke werden für 1000 Zugkilometer 21,6 t Ruhrkohle verbraucht. Deren Preis für die Tonne ergibt sich folgendermaßen:

Preis auf der Bahnversandstation . . . . .	16,50 $\mathcal{M}$
außerbayrische Fracht . . . . .	1,62 „
bayrische Fracht . . . . .	6,88 „
Entladung, Lagerung und Bekohlung . . . . .	1,00 „

Kosten für 1 t Ruhrkohle auf der Lokomotive in Station

Reichenhall . . . . . Summa 26,00  $\mathcal{M}$

Für 101 017 Zugkilometer werden also Kohlen im Gesamtbetrage von

$$101\ 017 \cdot \frac{21,6 \cdot 26}{1000} = 56\ 772 \text{ } \mathcal{M}$$

verbraucht.

β) Speisewasser.

Der Verbrauch auf dieser Strecke beträgt 181 m<sup>3</sup> für 1000 Zugkilometer. Gesamtbetrag . . . . . 2321  $\mathcal{M}$

γ) Schmieröl und sonstige Betriebsstoffe.

Auf 1000 Zugkilometer entfällt ein Betrag von 25  $\mathcal{M}$ , demnach auf 101 017 Zugkilometer . . . . . 2524  $\mathcal{M}$

C. **U n t e r h a l t u n g d e r L o k o m o t i v e n** (Hauptuntersuchungen, Laufuntersuchungen, größere Ausbesserungen).

a) Strecke Salzburg—Bad Reichenhall.

Die Unterhaltungskosten betragen auf dieser Strecke 127  $\mathcal{M}$  für 1000 Zugkilometer, also für 133 925 Zugkilometer . . . . 17 010  $\mathcal{M}$

b) Strecke Bad Reichenhall—Berchtesgaden.

Eine D VIII-Lokomotive erfordert auf dieser Strecke erfahrungsgemäß jährlich 2834  $\mathcal{M}$  Unterhaltungskosten, das ergibt für neun derartige Lokomotiven . . . . . 25 506  $\mathcal{M}$

D. **L a u f e n d e I n s t a n d h a l t u n g d e r L o k o m o t i v e n**.

(Reinigung, Entfernung der Rückstände, Reinigung der Maschinenhäuser, Beschaffungskosten der Putzwolle u. dgl.)

Diese betragen auf der Strecke Salzburg—Bad Reichenhall 32  $\mathcal{M}$  für 1000 Zugkilometer und auf der Strecke Bad Reichenhall—Berchtesgaden 64  $\mathcal{M}$  für 1000 Zugkilometer.

Hieraus errechnet sich der Gesamtbetrag zu . . . . 10 750  $\mathcal{M}$

E. **E r n e u e r u n g s r ü c k l a g e n f ü r d i e L o k o m o t i v e n**.

Man hat mit einer Lebensdauer von 25 Jahren zu rechnen. Bei einer Verzinsung von 4% betragen daher die jährlichen Rücklagen 2,4%. Eine D XII-Lokomotive kostet 55 700  $\mathcal{M}$ . Diese Lokomotiven — sieben an der Zahl — werden zu 66,15% ihrer jährlichen Gesamtbenutzungszeit auf der Strecke Salzburg—Bad Reichenhall verwendet, so daß diese Strecke mit einem Betrag von

$$7 \cdot 55\ 700 \cdot 0,024 \cdot 0,6615 = 6176 \text{ } \mathcal{M}$$

für Erneuerung der Lokomotiven zu belasten ist.

Die Beschaffungskosten der neun Lokomotiven D VIII betragen 348 300  $\mathcal{M}$ . Für sie beträgt die Rücklage 8359  $\mathcal{M}$ .

F. **V e r z i n s u n g d e r L o k o m o t i v e n**.

Bei einer Verzinsung von 4% und unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die sieben Lokomotiven der Bauart D XII mit 66,15% ihrer Benutzungszeit für die Strecke Salzburg—Bad Reichenhall in Betracht kommen, ergibt sich für diese Strecke ein Zinsenanteil von 10 293  $\mathcal{M}$ .

Die neun Lokomotiven der Bauart D VIII erfordern für Verzinsung den Betrag von 13 932  $\mathcal{M}$ .

III. Ermittlung des elektrischen Arbeitsverbrauches.

a) Nach dem in Abschnitt 18 in seinen Haupttrichtlinien angedeuteten zeichnerisch-rechnerischen Verfahren sind die mittleren Werte des elektrischen Arbeitsverbrauches für die verschiedenen Strecken gefunden worden, wobei diese Ermittlung getrennt für beide Fahrtrichtungen durchgeführt wurde.

Der Bedarf an elektrischer Arbeit — am Fahrdraht abgenommen — beträgt für 1 tkm

für die Strecke	Salzburg—Bad Reichenhall . . .	(Strecke A)	48,5	Wattstd.
„ „ „	Bad Reichenhall—Salzburg . . .	( „ B)	28,5	„
„ „ „	Bad Reichenhall—Berchtesgaden. ( „ C)		90,0	„
„ „ „	Berchtesgaden—Bad Reichenhall. ( „ D)		75,0	„

von der gesamten Fahrleistung entfallen

auf die Strecke	A	48,13%	von	20 716 288	tkm
„ „ „	B	51,87%	„	20 716 288	„
„ „ „	C	50,75%	„	7 970 231	„
„ „ „	D	49,25%	„	7 970 231	„

Hieraus ergibt sich folgender Jahresverbrauch der einzelnen Strecken:

Strecke	A . . . . .	483 580	kW-Stunden
„	B . . . . .	306 250	„
„	C . . . . .	364 040	„
„	D . . . . .	294 400	„

Summa 1 448 270 kW-Stunden im Jahre.

b) Für den Verschubdienst sind etwa 5% der im Streckendienst gefahrenen Lokomotivkilometer, also

$$(133\,925 + 101\,017) \cdot 0,05 = 11\,750 \text{ Lokomotivkilometer}$$

zu rechnen. Für 1 Lokomotivkilometer im Verschubdienst sind 2,5 kW-Stunden zu rechnen, so daß sich für den Verschubdienst ein jährlicher Arbeitsaufwand von

$$11\,750 \cdot 2,5 = 29\,370 \text{ kW-Stunden}$$

c) Für Erzeugung der Bremsluft werden 0,58 Wattstunden für 1 tkm verbraucht. Bei Güterzügen ist keine Bremsluft erforderlich. Von der Verkehrsleistung der Strecke A und B entfallen 80% auf Personenzüge, also 16 573 030 tkm; dagegen entfällt die ganze Leistung der Strecke C und D auf Personenzüge, also 7 970 231 tkm. Der Arbeitsbedarf für die Erzeugung der Bremsluft beträgt daher

$$\frac{(16\,573\,030 + 7\,970\,231) \cdot 0,58}{1000} = 14\,235 \text{ kW-Stunden.}$$

d) Für Beleuchtung und Heizung sind folgende Beträge zu rechnen. Für die Strecke A und B beträgt die jährliche Brennzeit aller Züge 1200 Stunden. Das ergibt bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 2 kW für Beleuchtung eines Zuges 2400 kW-Stunden. Für die Strecke C und D beträgt die Brennzeit aller Züge 1000 Stunden. Bei einem Verbrauch von 1,5 kW für jeden Zug ergibt sich der jährliche Verbrauch für Beleuchtung zu 1500 kW-Stunden.

Der jährliche Arbeitsbedarf für Heizung beträgt

für die Strecke A und B:

im Dezember, Januar, Februar . . .	35 700 kW-Stunden	
„ November und März . . . . .	19 900	„
„ Oktober und April . . . . .	7 900	„

für die Strecke C und D:

im Dezember, Januar, Februar . . .	9 630	„
„ November und März . . . . .	5 920	„
„ Oktober und April . . . . .	2 400	„

e) Zusammenstellung des Arbeitsbedarfes:

Beförderung der Züge . . .	1 448 270 kW-Stunden	
Verschubdienst . . . . .	29 370	„
Erzeugung der Bremsluft . . . . .	14 235	„
Beleuchtung der Züge . . . . .	3 900	„
Heizung der Züge . . . . .	81 350	„

Summa 1 577 124 kW-Stunden

Mittlerer Verlust in Fahr-

und Speiseleitungen . . . . . 118 876 „

Summa 1 696 000 kW-Stunden

Im Elektrizitätswerk sind also rund

1 700 000 kW-Stunden

jährlich zu erzeugen.

#### IV. Jährliche Kosten des elektrischen Betriebes.

##### A. Bezüge der Lokomotivmannschaften.

Für den Sommerdienst sind zehn Führer, für den Winterdienst acht Führer notwendig. Für diese ist ein Betrag von 28 620  $\mathcal{M}$  zu rechnen.

##### B. Kosten der Betriebsstoffe.

Für ein Zugkilometer verbraucht die elektrische Lokomotive etwa 15 g Schmieröl, also werden für 235 000 Zugkilometer 3525 kg Schmieröl zu 0,30  $\mathcal{M}$  verbraucht. Die Kosten des Schmieröls betragen daher 1058  $\mathcal{M}$ .

Für die übrigen Betriebsstoffe sind auf 1000 Zugkilometer 1,20  $\mathcal{M}$  zu rechnen, also insgesamt 282  $\mathcal{M}$ .

##### C. Unterhaltung der Lokomotiven.

Da für den elektrischen Lokomotivbetrieb noch keine sicheren Erfahrungsziffern vorlagen, ist auf Grund anderweitiger Erfahrungen angenommen, daß für die Unterhaltung 5% des Anschaffungswertes aufzuwenden sind. Da letzterer 780 000  $\mathcal{M}$  beträgt, ergibt sich der jährliche Betrag für Unterhaltung zu 39 000  $\mathcal{M}$ .

##### D. Laufende Instandhaltung der Lokomotiven.

An Instandhaltungskosten einschließlich kleinerer Unterhaltungsarbeiten, an Löhnen für die Reinigung der Lokomotiven und für die Reinigung der Lokomotivschuppen, sowie für Beschaffung der Putzstoffe wurden angesetzt:

für eine vierachsige elektrische Lokomotive jährlich 1000  $\mathcal{M}$

„ „ zweiachsige „ „ „ 500 „

Die Instandhaltung beträgt demnach für

vier vierachsige Lokomotiven 4000  $\mathcal{M}$   
 „ zweiachsige „ 2000 „

E. Erneuerungsrücklagen für die Lokomotiven.

Der Anlagewert von 780 000  $\mathcal{M}$  muß in 25 Jahren bei einer Verzinsung von 4% herausgewirtschaftet sein. Die jährliche Rücklage beträgt 2,4% der Anlagekosten, also 18 720  $\mathcal{M}$ .

F. Verzinsung der Lokomotiven.

4% von 780 000  $\mathcal{M}$  ergibt 31 200  $\mathcal{M}$ .

G. Erneuerung, Instandhaltung und Verzinsung der elektrischen Streckenausrüstung.

a) Erneuerung und Instandhaltung.

Bezeichnung	Anlagewert $\mathcal{M}$	Lebensdauer Jahre	Erneuerungsrücklagen		Instandhaltung	
			%	Betrag $\mathcal{M}$	%	Betrag $\mathcal{M}$
<b>Fahrleitungen:</b>						
Kupferwert des Fahrdrahtes . . . . .	84 000	15	2,69	2260	0,5	420
Übrige Ausrüstung . . . . .	617 000	50	0,654	4035	0,5	3085
<b>Speiseleitungen:</b>						
Kupferseil . . . . .	79 000	50	0,223	176	0,5	395
Übrige Ausrüstung . . . . .	41 000	50	0,654	268	0,5	205
Hierzu Löhne . . . . .						4320

Bemerkungen zu dieser Aufstellung.

Bei der Bemessung der Rücklagen für das Kupfer ist damit gerechnet, daß es nach Ablauf der Lebensdauer der Leitungen noch 66% vom Geldwert des neuen Kupfers besitzt.

Bei den Rücklagen für den Fahrdraht ist außerdem damit gerechnet, daß in 15 Jahren 30% seines Gewichtes abgeschliffen ist.

b) Verzinsung.

Die Anlagekosten der Streckenausrüstung betragen einschließlich des Umbaus der Schwachstromleitungen und sonstiger Umbauten 990 000  $\mathcal{M}$ .

Für 4% Verzinsung dieses Betrages sind aufzuwenden 39 600  $\mathcal{M}$ .

V. Übersicht über die jährlichen Betriebskosten der Zuförderung.

	Dampfbetrieb	Elektrischer Betrieb ohne elektrische Arbeit
Lokomotivmannschaft . . . . .	53 240 $\mathcal{M}$	28 620 $\mathcal{M}$
Betriebsstoffe . . . . .	117 734 „	1 340 „
Unterhaltung der Lokomotiven . . . . .	42 516 „	39 000 „
Laufende Instandhaltung der Lokomotiven . .	10 750 „	6 000 „
Erneuerungsrücklagen für die Lokomotiven . .	14 535 „	18 720 „
Verzinsung der Lokomotiven . . . . .	24 225 „	31 200 „
Erneuerung, Instandhaltung und Verzinsung der elektrischen Streckenausrüstung . . .	—	54 764 „
Summa	263 000 $\mathcal{M}$	179 644 $\mathcal{M}$



Mithin bleibt, unter der Voraussetzung, daß beide Betriebsarten gleiche jährliche Kosten verursachen, für die Kosten der elektrischen Arbeit ein Betrag von

$$\begin{array}{r} 263\ 000\ \mathcal{M} \\ - 179\ 644\ \text{,,} \\ \hline 83\ 356\ \mathcal{M} \end{array}$$

zur Verfügung. Ohne Beleuchtung und Heizung, die wegen der auch noch nicht elektrische Strecken durchlaufenden Wagen in der bisherigen Weise durchgeführt werden muß, sind jährlich rund 1 600 000 kW-Stunden zu erzeugen. Es dürfte also die kW-Stunde im Werke

$$\frac{8\ 335\ 600}{1\ 600\ 000} = 5,2\ \mathcal{S}$$

kosten.

An anderer Stelle ist nun in der Denkschrift der Nachweis dafür geführt, daß das für den elektrischen Betrieb der betrachteten Strecke zu erbauende Kraftwerk bei guter Ausnutzung durch Stromabgabe an die Privatindustrie unter Annahme eines Erlöses von 100  $\mathcal{M}$  für ein Pferdekraftjahr Betriebsüberschüsse erzielen kann, die den elektrischen Zugförderungskosten zugute gerechnet werden können und die es ermöglichen würden, den Strompreis für den Lokomotivbetrieb auf 1,5  $\mathcal{S}$  für die kW-Stunde herabzusetzen. Dies würde eine Ersparnis von über 50 000  $\mathcal{M}$  bei elektrischer Zugförderung bedeuten.

Die Denkschrift rechnet nun damit, daß in der südlichen Landeshälfte Bayerns durch Ausnützung der reichlichen Wasserkräfte die kW-Stunde mit 1 bis 2  $\mathcal{S}$  abgegeben werden kann, während dieser Betrag in der nördlichen Landeshälfte auf 2 bis 3  $\mathcal{S}$  sich erhöhen wird. Der Grund für diese Verteuerung liegt in der höheren Belastung durch Abschreibung und Verzinsung der langen Speiseleitungsstrecken. Umgekehrt sind in der nördlichen Landeshälfte die Ausgaben für Kohlen wegen der geringen Frachtkosten niedriger als in der südlichen Landeshälfte. Da ferner jede Strecke eine bestimmte Verkehrsdichte besitzen muß, damit der elektrische Betrieb wirtschaftlich wird, ergibt sich für jedes Kilometer einer bestimmten Strecke ein bestimmter, für die Wirtschaftlichkeit maßgebender Mindestverbrauch an kW-Stunden, wofür die folgende Tabelle einige Anhaltspunkte gibt.

Der erforderliche Mindestverbrauch in Kilowattstunden für 1 km Streckenlänge beträgt	In der Gegend Kempten—München—Rosenheim. Kohlenpreis 24 $\mathcal{M}/t$ kW-St. 1 bis 2 $\mathcal{S}$	In der Gegend Nürnberg—Bamberg. Kohlenpreis 21 $\mathcal{M}/t$ kW-St. 2 bis 3 $\mathcal{S}$
Bei zweigleisigen Hauptbahnen	145 bis 200 KW-St.	245 bis 475 KW-St.
Bei eingleisigen Hauptbahnen	80 „ 105 „	130 „ 230 „
Bei Zweig- und Nebenbahnen	40 „ 46 „	55 „ 65 „

Die Annahmen, auf welchen sich diese Rechnung aufbaut, sind durch anderweitige Betriebserfahrungen vollauf als richtig bestätigt worden.

Auf der elektrisch betriebenen Flachlandstrecke Dessau—Bitterfeld wurden nach dem „Bericht der Königlichen Eisenbahndirektion in Halle a. S. über das erste Jahr der elektrischen Zugförderung Dessau—Bitterfeld“ folgende Werte ermittelt.

Am Stromabnehmer der Lokomotiven gemessen verbrauchten Schnell- und Personenzüge im Durchschnitt 29,5 Wattstunden/tkm, Güterzüge im Mittel 16,5 Wattstunden/tkm gegenüber 20 Wattstunden, wie in der Vorausberechnung angenommen war.

Bei der im Entwurf des Jahres 1908 für die Strecke Halle—Leipzig—Magdeburg vorgesehenen Gesamtleistung von 488 000 000 tkm im Schnell- und Personenzugdienst und 800 000 000 tkm im Güterzugdienst ergibt sich daher ein mittlerer Verbrauch von 21,4 Wattstunden/tkm gegenüber der Annahme von 23,4 Wattstunden.

Die vertragsmäßig ausbedungene geringste Laufzeit ohne Ausbesserungen ist bei den Personenzuglokomotiven 5000 Lokomotivkilometer, bei den Güterzuglokomotiven 2000 Lokomotivkilometer. Tatsächlich haben Lokomotive E. S. 1 über 30 000, E. G. 502 über 20 000 Lokomotivkilometer geleistet, ohne irgendwelche Arbeit an den Kollektoren zu ergeben.

Im Kraftwerk Muldenstein wurde ferner folgendes durch Messungen festgestellt. Bei  $\frac{2}{3}$ -Belastung der Dampfturbinen wurde ein Verbrauch von 8,4 (8,5) kg Dampf, 2,8 (3,541) kg Kohle und 0,616  $\mathcal{L}$  (0,855  $\mathcal{L}$ ) Kohlenkosten für die an der Schalttafel gemessene kW-Stunde festgestellt. Die in Klammern beigefügten Zahlen waren der Vorausberechnung zugrunde gelegt. Aus diesen Zahlen geht hervor, daß, wenn man die Übertragungsverluste mit 10% und den Wirkungsgrad der elektrischen Lokomotive mit 70% bewertet, die Kohlenkosten für ein tkm 0,021  $\mathcal{L}$  betragen gegenüber 0,05 bis 0,09  $\mathcal{L}$  für die gleiche Leistung, wie für den Durchschnitt der Jahre 1895 bis 1905 auf den preußischen Staatsbahnen festgestellt worden ist<sup>1)</sup>.

Der Grund für diese geringen Kohlenkosten ist darin zu suchen, daß in dem Kraftwerk Muldenstein geringwertige Braunkohle aus dem Bitterfelder Bezirk, die sich wegen ihrer Geringwertigkeit für einen weiteren Versand nicht eignet, verbrannt wird.

Wenn also in Süddeutschland und in den Alpenländern die meist bedeutenden Wasserkräfte durch den elektrischen Bahnbetrieb wirtschaftlich ausgenutzt werden können, so bieten sich in Norddeutschland in den ausgedehnten, für lange Zeiten unerschöpflichen Braunkohlenlagern, unter Umständen auch in den der Entwässerung und des Abbaues harrenden Torfmöoren und vielleicht auch noch in den Abgasen der Hochöfen und Kokereien in unseren Industriegebieten, gewaltige Arbeitsquellen, deren Ausnutzung für den elektrischen Bahnbetrieb von größter volkswirtschaftlicher Bedeutung ist. —

Neben diesen mit großer Sicherheit zahlenmäßig faßbaren Gründen für die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Bahnbetriebes gibt es aber noch eine Anzahl von Vorteilen, die im Gefolge dieses Betriebes zwar sicher eintreten werden, deren zahlenmäßige Bewertung allerdings nicht ohne weiteres möglich ist. Es genügt an dieser Stelle auf diese hinzuweisen.

Durch den ruhigen Lauf der elektrischen Lokomotiven wird der Oberbau weniger angegriffen als bei Dampfbetrieb mit den vielen störenden Bewegungen der Dampflokomotive.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1908, Heft 30.

Da der Rauch fehlt, werden die Oberbauten, Eisenbauten, Tunnelmauerungen, die unter den im Rauche enthaltenen Säuren stark zu leiden haben, eine längere Lebensdauer besitzen. Beim Durchfahren der Tunnel fällt die Rauchbelästigung weg, die häufig durch besondere Lüftungsvorrichtungen gemildert werden muß.

Es werden ferner Entschädigungen für durch Funkenauswurf entstandene Waldbrände in Wegfall kommen.

Auf den Bahnhöfen werden Bekohlungsanlagen und Wassertürme entbehrlich, die nicht unbeträchtliche Kosten für Bedienung und Unterhaltung erfordern. Die Kohlenbeförderung für die eigenen Zwecke der Bahn fällt fort, wodurch die hierfür erforderlichen Güterwagen für andere Zwecke frei werden. Die elektrischen Lokomotiven können längere Zeit im Betrieb bleiben, da der Vorbereitungsdienst und die Nacharbeiten (Schlackenentfernung usw.) fortfallen. Die elektrische Lokomotive ist stets betriebsbereit und sie bedarf außer der Wartung einiger Lager fast keiner Unterhaltung.

Überhaupt gewinnt der ganze Bahnbetrieb durch die Einführung der elektrischen Triebkraft an Sauberkeit und wenn man noch die Möglichkeit elektrischer Zugheizung und Zugbeleuchtung hinzurechnet, so bedarf es keiner weiteren Begründung dafür, daß auch die Reisenden die Annehmlichkeiten des elektrischen Betriebes empfinden werden.

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, daß der elektrische Betrieb sich den wachsenden Verkehrsanforderungen besser anschmiegt als der Dampfbetrieb. Die Eigenschaft des Elektromotors, auf kürzere Zeit große Leistungssteigerungen zu ermöglichen, wird auf die Einhaltung der Fahrpläne insofern günstig einwirken, als sich Verspätungen schneller einholen lassen. Neben den von Lokomotiven gezogenen Zügen können nach Bedarf kurze Motorwagenzüge gefahren werden, die den oft stark schwankenden örtlichen Verkehr vermitteln, wozu sich die Dampflokomotive nicht eignet, die nur bei voller Ausnutzung, also wenn sie einen vollbesetzten Zug schleppt, wirtschaftlich arbeitet.

Es ist nicht zu viel behauptet, daß die Durchführung der elektrischen Zugförderung eine vollständige Umwälzung unserer Verkehrsverhältnisse im Gefolge haben wird und es lassen sich gewichtige Gründe dafür beibringen, daß eine derartige Umgestaltung notwendig werden muß und zum Teil schon notwendig geworden ist.

Der Grund hierfür ist einerseits in dem durch den gewaltigen wirtschaftlichen Aufschwung der letzten Jahrzehnte mächtig gesteigerten Verkehrsbedürfnis und in der daraus folgenden starken, bei vielen Strecken bereits bis zur Grenze ihrer Leistungsfähigkeit angewachsenen Belastung zu suchen, andererseits in den ständig wachsenden Löhnen und Kohlenkosten, die gebieterisch auf eine Ersparnis an Bedienungsmannschaften und an Brennstoff hinweisen.

Für die Steigerung der Leistungsfähigkeit der vielen stark beanspruchten Strecken bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten, nämlich entweder die Erbauung von gleichlaufenden Strecken oder die Erhöhung der Zuggeschwindigkeit und Vergrößerung des Zuggewichtes. Die erstere erfordert große Anlegekosten, ohne daß die Wirtschaftlichkeit des Betriebes verbessert würde;

die letztere ist heute schon vielfach nur durch die Einführung des elektrischen Betriebes zu verwirklichen und bringt gleichzeitig schwerwiegende wirtschaftliche Vorteile mit sich. Einige Beispiele mögen diese Tatsachen erläutern.

Auf der Gotthardbahn werden Personen- und Schnellzüge mit einer größten Anhängelast von 400 t über eine Steigung von  $26\text{‰}$  mit 40 km/St. gefahren. Wenn die Geschwindigkeit zur besseren Ausnutzung der kostspieligen Anlage auf 60 km/St. erhöht würde, müßte eine Leistung von etwa 3000 PS bei einer Zugkraft von 13 200 kg am Zughaken aufgewendet werden. Da die zulässige Beanspruchung des Zughakens bei den europäischen Bahnen mit 10 000 kg begrenzt ist, müßte eine Vorspannlokomotive mit einer Leistung von 2300 PS bei 10 000 kg Zugkraft und eine Schiebelokomotive für 3200 kg hinter dem Zug verwendet werden.

Die Leistung von 2300 PS kann aber in einer Dampflokomotive kaum erzeugt werden (vgl. Abschnitt 19), so daß zwei Lokomotiven vorgespannt werden müßten, wie es bei 40 km Geschwindigkeit bereits der Fall ist. Diese beiden Lokomotiven würden zusammen etwa 200 t wiegen, so daß sie allein schon die Hälfte des Zuggewichtes darstellen.

Sie könnten durch eine einzige elektrische Lokomotive, die etwa 100 t wiegen müßte und deren Motoren insgesamt etwa 3000 PS leisten müßten, ersetzt werden. Hierdurch würde sowohl das tote Gewicht bedeutend herabgesetzt als auch die Bedienungskosten (ein Lokomotivführer an Stelle von zwei Führern und zwei Heizern) wesentlich erniedrigt werden. —

Die schwedische, 129 km lange Strecke Kiruna—Riksgränsen dient hauptsächlich zur Förderung der aus den Gruben der Kirunavaara-Luosavaara A.-G. stammenden Eisenerze. Sie ist eingleisig gebaut und auf ihr wurden im Jahre 1908 1 660 000 t Erz befördert. Der Staat ist verpflichtet, im Jahre 1913 3 200 000 t und im Jahre 1918 3 850 000 t zu befördern.

Bereits im Jahre 1910 verkehrten auf dieser Bahn die schwersten Lokomotiven Schwedens, auf denen je 7200 kg Steinkohle täglich verfeuert werden. Dieser großen Leistung ist ein Heizer nicht gewachsen, so daß noch ein Hilfsheizer eingestellt werden mußte.

Dabei können von einer Lokomotive 28 Erzwagen von 11 t Leergewicht und 35 t Ladegewicht nebst einem zweiachsigen Güterwagen gezogen werden, wobei die Höchstgeschwindigkeit 40 km beträgt. Auf einer 8,5 km langen Steigung von  $10\text{‰}$  fahren diese Züge sogar nur mit einer Geschwindigkeit von 12 km.

Der elektrische Betrieb würde bei Verwendung von zwei Lokomotiven eine Zuglänge von 40 Erzwagen ermöglichen, wobei die Geschwindigkeit auf 50 bis 60 km hinauf- und auf der Steigung auf 30 km heraufgesetzt werden könnte. Das bedeutet aber eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Bahn um mehr als 50%. Dabei ist in dem Entwurf für die Elektrisierung der Strecke bei einer Erzbeförderung von 3 850 000 t eine Ersparnis von 472 000 *M* im Jahre gegenüber dem Dampfbetrieb unter Zugrundelegung der von den ausführenden Firmen übernommenen Gewährleistung für die Betriebskosten errechnet worden.<sup>1)</sup> —

<sup>1)</sup> E. K. B. 1910, Heft 25.

Die Union Traction Cy in Philadelphia<sup>1)</sup> hatte nach Einführung des elektrischen Betriebes auf ihren Strecken bei einer Steigerung der Roheinnahmen um 37% eine Verminderung der reinen Betriebsausgaben um 18% an Stelle einer Steigerung der reinen Betriebsausgaben zu verzeichnen. Während bei Dampfbetrieb das Verhältnis  $\frac{\text{Betriebsausgaben}}{\text{Roheinnahmen}}$ , die sog. Betriebsziffer, den Wert 0,67 besaß, sank sie nach der Elektrisierung auf 0,415.

Auch die Consolidated Traction Cy in Pittsburg erzielte durch die Elektrisierung ihrer Strecken eine Erniedrigung der Betriebsziffer von 0,6 auf 0,4.

Bei der Manhattan Elevated Cy in New York sanken nach der Elektrisierung die Betriebskosten für 1 Wagenkilometer von 32  $\mathcal{S}$  auf 24,7  $\mathcal{S}$ .

Schließlich sind in jüngster Zeit Erfahrungen veröffentlicht worden, die mit dem elektrischen Betrieb auf der New York, New Haven and Hartford-Bahn gesammelt worden sind<sup>2)</sup>. Auch hier wurde eine bedeutende Ersparnis am Kosten gegenüber dem Dampfbetrieb festgestellt, wobei der größere Anteil dieser Ersparnisse auf den Verschiebedienst entfällt. Hier verbrauchten die Dampflokomotiven durchschnittlich 2,9 kg Kohle für die PS-Stunde, ein verhältnismäßig hoher Wert, welcher auf die unwirtschaftliche Erzeugung kleiner Leistungen in Dampflokomotiven zurückzuführen ist, zumal da auch während der Ruhepausen Kohlen verbraucht werden. Der elektrische Verschiebedienst brachte eine Kohlenersparnis von 66%.

Innerhalb einer Beobachtungszeit von 18 Monaten wurden für je 100 000 Lokomotivkilometer bei Dampfbetrieb 13, bei elektrischem Betrieb aber nur 5,6 Betriebsschäden an den Lokomotiven festgestellt.

Für diese Bahn wird auf Grund der Betriebserfahrungen der einphasige Wechselstrom sowohl bezüglich der Anlagekosten als auch bezüglich der Betriebsausgaben als die bei weitem vorteilhafteste Stromart bezeichnet.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1907, Heft 11 bis 15.

<sup>2)</sup> E. T. Z. 1913, S. 1264.

---

---

### III. Kapitel.

## Die Lauffähigkeit der elektrischen Lokomotiven und Fragen des mechanischen Antriebs.

### 21. Die Zugkraft der elektrischen Lokomotive.

Bei einer Dampflokomotive ist das auf die Triebachse übertragene Drehmoment nicht gleichbleibend, vielmehr ändert sich dessen Größe mit der Kolbenstellung zwischen einem höchsten und niedrigsten Werte.

Man kann dieses schwankende Moment durch ein mittleres Moment  $D$  gleichbleibender Größe ersetzen, dessen Verhältnis zu dem auftretenden Höchstwert  $D_m$  von Wichtigkeit für die Beurteilung der Zugkraft ist.

Bezeichnet man das Verhältnis  $\frac{\text{Kolbenhub}}{\text{doppelte Länge der Schubstange}}$  durch den Buchstaben  $\lambda$ , so ist nach einem bekannten Gesetze des Kurbeltriebes bei einer Zweizylinderlokomotive

$$\frac{D_m}{D} = 1,11 + 0,78 \cdot \lambda.$$

Für Lokomotiven liegt der Wert von  $\lambda$  zwischen  $\frac{1}{5,5}$  und  $\frac{1}{9}$ , so daß im Mittel

$$\frac{D_m}{D} = 1,11 + 0,78 \cdot \frac{1}{7} = 1,21$$

sein wird. Das größte Drehmoment, also auch die größte Zugkraft am Radumfang liegt 21% über dem Mittelwert.

Damit die Räder nicht schleudern, muß der Widerstand gegen gleitende Reibung zwischen Rad und Schiene stets größer sein, als die größte Zugkraft  $Z_m$  am Radumfang.

Wenn also wieder  $Q'$  die Belastung einer Trieb- oder Kuppelachse in kg ist, so muß sein

$$\mu \cdot Q' \geq Z_m = Z \cdot 1,21$$

$$Z = \frac{\mu \cdot Q'}{1,21} = \mu \cdot (Q' \cdot 0,83).$$

Das Reibungsgewicht  $Q'$  jeder Trieb- oder Kuppelachse kann also bei der Dampflokomotive nur mit etwa 83% ausgenutzt werden, während es voll ausgenutzt werden könnte, wenn das Drehmoment während einer Umdrehung des Rades ungeändert bliebe.

Dem entspricht auch eine verminderte Leistungsfähigkeit der Trieb- und Kuppelachsen (vgl. S. 101). Während z. B. bei  $V = 100 \text{ km/St}$  und  $Q' =$

16 000 kg Achsbelastung eine Leistung von 600 PS bei gleichbleibendem Drehmoment übertragen werden kann, ist diese Leistung bei der Dampflokomotive mit etwa  $600 \cdot 0,83 = \text{rd. } 520$  PS begrenzt.

Diese schlechtere Ausnutzung des Reibungsgewichtes spielt besonders bei der Anfahrt der Lokomotive eine Rolle.

So wurden auf dem Bahnhof Murnau der mit einphasigem Strom betriebenen Bahn Murnau—Oberammergau Versuche über die Zugkraft einer elektrischen und einer Dampflokomotive angestellt, die folgendes ergaben.

I. Dampflokomotive mit einem Dienstgewicht von 26 t und mit drei gekuppelten Achsen. Da keine Laufräder vorhanden sind, ist also das ganze Dienstgewicht auch Reibungsgewicht. Wenn diese Lokomotive mit einem Zug von 202,3 t vorsichtig anfuhr, trat kein Schleudern der Räder ein. Als das Zuggewicht auf 221,0 t erhöht wurde, schleuderten die Räder bei vorsichtigem Anfahren.

II. Elektrische Lokomotive der Siemens-Schuckertwerke mit einem Dienstgewicht von 20 t und mit zwei gekuppelten Achsen. Da keine Laufräder vorhanden sind, ist auch hier das ganze Gewicht als Reibungsgewicht ausgenützt.

Diese Lokomotive fuhr mit dem Zuge von 202,3 t bereits auf der ersten Fahrstufe ohne Schleudern an. Erst nachdem das Zuggewicht auf 261,5 t erhöht war, fingen die Räder kaum sichtlich an zu schleudern.

Aus diesen Versuchen geht also hervor, daß die elektrische Lokomotive nur  $20 \cdot \frac{221,0}{261,5} = 17$  t zu wiegen braucht, um gleichfalls schon bei 221,0 t Zuggewicht zu schleudern. In diesem Falle müßte also die Dampflokomotive sogar  $\frac{26}{17} = 1,53$  mal so schwer als die elektrische Lokomotive gleicher Zugkraft sein.

Über diesen Vorzug der elektrischen Lokomotive vor der Dampflokomotive ist in dem von der Königlichen Eisenbahndirektion Halle über das erste Jahr der elektrischen Zugförderung Dessau—Bitterfeld erstatteten Bericht ebenfalls gesagt, daß, soweit die Zugkraft nur durch die Schienenreibung begrenzt ist, unter sonst gleichen Verhältnissen eine elektrische Lokomotive eine um wenigstens 25% größere Zugkraft ausüben kann, als eine Zweizylinder-Dampflokomotive.

Damit ist aber auch der folgende Einwand widerlegt, der hin und wieder gegen die elektrische Lokomotive erhoben wurde.

Das Drehmoment eines einphasigen Motors weist nämlich stets zeitliche Schwingungen auf (vgl. Abschnitt 2); es ist abhängig von dem Produkte  $\Phi_v \cdot i_2 \cos \psi$ , wobei  $\Phi_v$  der Drehmomentfluß,  $i_2$  der Ankerstrom ist und  $\cos \psi$  der Phasenverschiebung zwischen  $\Phi_v$  und  $i_2$  entspricht, die im allgemeinen bei den Reihenschlußmotoren vernachlässigt werden kann. Da nun  $\Phi_v$  und  $i_2$  in gleichem Puls und phasengleich schwingen, kann man den Augenblickswert des Drehmomentes  $D_t$  darstellen durch die Gleichung

$$D_t = c \cdot \bar{\Phi}_v \cdot \bar{i}_2 \sin^2 \omega t.$$

Für  $\omega t = 90^\circ$  ist  $\bar{D}_t = c \cdot \bar{\Phi}_v \cdot \bar{i}_2$ ,

also ist

$$D_t = \bar{D} \sin^2 \omega t = \frac{\bar{D}}{2} [1 - \cos(2\omega t)]$$

$$D_t = \frac{\bar{D}}{2} - \frac{\bar{D}}{2} \cos(2\omega t).$$

Diese Gleichung besagt, daß man sich das schwingende Drehmoment  $D_t$  ersetzt denken kann durch ein unveränderliches Moment von der Größe  $\frac{\bar{D}}{2}$ , welchem sich ein veränderliches Drehmoment vom Höchstwert  $\frac{\bar{D}}{2}$ , das mit doppelter Wellenzahl schwingt, überlagert.

Während sich also bei der Dampflokomotive das Drehmoment mit der Kurbel- und Radstellung ändert, tritt bei der einphasigen Wechselstromlokomotive eine zeitliche Änderung des Drehmomentes ein, und zwar liegt der Höchstwert dieses Drehmomentes doppelt so hoch als der Mittelwert.

Es sei nun die Annahme gemacht, daß der Wechselstrommotor einer Lokomotive am Triebumfang eine Zugkraft  $Z$  erzeugt, deren Mittelwert genau gleich dem Widerstand  $Q' \cdot \mu$  der gleitenden Reibung ist. Dabei ist  $Q'$  der Druck der Triebachse auf das Gleis und  $\mu$  die Kennziffer der gleitenden Reibung. Wenn ferner  $\sim$  die sekundliche Wellenzahl des Wechselstroms ist, so wird in jeder Sekunde  $2 \sim$  mal der Höchstwert  $\bar{Z} = 2 \cdot Q' \cdot \mu$  auftreten. Dieser Kraftüberschuß wird das Rad zum Gleiten bringen, da die Reibungsgrenze überschritten wird. Infolgedessen besteht unter diesen Voraussetzungen die Bewegung des Rades grundsätzlich bei Wechselstromantrieb aus einer regelmäßig wechselnden Roll- und Gleitbewegung. Während der Gleitbewegung besitzt das Rad eine größere Winkelgeschwindigkeit als sie der Rollbewegung entspricht. Wenn aber die Winkelgeschwindigkeit zunehmen soll, müssen die umlaufenden Massen der gekuppelten Räder und des Motors beschleunigt werden. Die Beschleunigung wird nun aber umso geringer sein, je größer das Trägheitsmoment der zu beschleunigenden Massen ist und da die einzelnen Beschleunigungszeiten nur von kurzer Dauer sind, z. B. bei  $16\frac{2}{3}$  Perioden  $\frac{1}{2 \cdot 16\frac{2}{3}}$  Sekunden, so wird in Anbetracht der großen rotierenden Massen einer Wechselstromlokomotive der in 1 Sekunde zurückgelegte Gleitweg nur sehr klein sein können.

Diese Erscheinung hat Ossanna<sup>1)</sup> durch eingehende Rechnungen klar gestellt und hat gefunden, daß für eine Lokomotive von 36 t, deren mittlere Zugkraft am Radumfang genau gleich dem Reibungswiderstand ist, die also an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit arbeitet, die durch das kurzdauernde Gleiten der Räder auf den Schienen verursachten Verluste nur etwa  $1\frac{0}{\infty}$  der gesamten Motorleistung ausmachen, also überhaupt belanglos sind. Der Gleitweg selbst besaß dabei nur die Größenordnung von einigen Millimetern in der Sekunde.

Trotz des schwingenden Drehmomentes arbeitet also eine Wechselstromlokomotive in bezug auf die Drehmomentbildung ebenso günstig wie eine Gleichstrom- oder Drehstromlokomotive, deren Drehmoment keine zeitlichen

<sup>1)</sup> E. K. B. 1906, S. 229.



Schwankungen besitzt. Auf dieses schwingende Drehmoment dürften die Zitterbewegungen zurückzuführen sein, welche eine elektrische Lokomotive besonders bei der Anfahrt ausführt.

## 22. Einfluß des Radstandes auf die Lauffähigkeit der elektrischen Lokomotiven.

Mit Rücksicht auf den ruhigen Gang der Lokomotiven muß die Entfernung der äußersten Achsen, d. h. der Gesamtradstand, möglichst groß gewählt werden.

Je größer aber der Abstand festgelagerter Achsen ist, desto mehr wird die Fahrt in Krümmungen erschwert, desto größer wird der Bahnwiderstand und die Abnützung der Räder und Schienen wird vermehrt. Dementsprechend ist in den „Technischen Vereinbarungen“ festgesetzt worden, daß der feste Radstand folgende Maße nicht überschreiten darf:

3,200 m	bei Krümmungen bis zu 180 m	Halbmesser		
3,800	„ „	„ „	250	„ „
4,800	„ „	„ „	400	„ „
5,400	„ „	„ „	500	„ „

Für Lokomotiven mit größeren Radständen ist die Verwendung von drehbaren oder verschiebbaren Achsen oder von Drehstellen erforderlich.

Die bauliche Anordnung und Ausführung derartiger verschiebbarer Achsen ist außerordentlich mannigfaltig; die einzelnen Ausführungsformen streben alle dem Ziele zu, die Einstellung der Achsen in die Richtung des Krümmungshalbmessers beim Durchfahren von Gleisbögen möglichst zu erleichtern.

Natürlich kann hier nicht der Platz dafür sein, die einzelnen Bauarten zu erläutern, es mag vielmehr genügen, auf die wichtigsten Ausführungsformen nach Wesen und Zweck hinzuweisen.

In erster Linie hat die Beweglichkeit für die erste führende Achse, die zumeist eine Laufachse ist, große Bedeutung.

Sie wird als drehbare Achse nach der Bauart Nowotny oder als seitlich verschiebbare Achse nach der Bauart von Webb und Adams ausgeführt.

Bei der ersteren Bauart dreht sich die Achse um einen festen senkrecht angeordneten Zapfen, während die Adamsachse nur seitlich verschiebbar ist.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß einzelne führende und bewegliche Laufachsen besonders bei höheren Geschwindigkeiten Neigung zu Schlingerbewegungen besitzen, durch die der ruhige Gang der Lokomotive gestört wird. Um diesem Übelstand zu begegnen, verwendet man an Stelle der Einzelachsen zweiachsige Drehgestelle z. B. bei der Bauform 2—B—1, bei welcher die beiden vorderen Laufachsen in einem Drehgestell untergebracht werden. Hat man nur eine Laufachse zur Verfügung, so kann man diese mit der nächsten Kuppelachse vermittelt eines deichselartigen Verbindungsgliedes zu einem Drehgestell vereinigen. Diese letztere Anordnung zeigt Fig. 153, welche das sog. Krauß-Helmholz-Drehgestell (DRP. 214 896) darstellt.

Die im Hauptrahmen gelagerte Kuppelachse dieses Drehgestells kann sich seitlich um  $2 \times 20$  mm verschieben. Außerdem kann sich die Laufachse in der Geraden innerhalb geringer Grenzen für sich allein drehen; sie kann in

wagerechtem Sinne etwas um einen über ihrer Achsmittle angebrachten senkrechten Drehzapfen schwingen. Hierdurch wird eine gleichmäßige Abnutzung der beiden Spurkränze der Laufäder erzielt.

Um bei der Fahrt in der Geraden die Laufachse rechtwinklig zur Fahrtrichtung zu halten, wird die Drehgestelldeichsel samt der Laufachse mittels einer Anpreßfeder, die gleichzeitig als Rückstellfeder dient, gegen zwei am Hauptrahmen vor dem Lagergehäuse der Laufachse angebrachte Widerlager angedrückt.

Um ferner den Seitenstoß beim Einfahren in eine Krümmung zu mildern, ist der Drehzapfen unter der elastischen Gegenwirkung dieser Feder im Drehgestellrahmen um jederseits 15 mm verschiebbar gelagert.

Da die Kuppelachse des Drehgestells verschiebbar ist, muß der

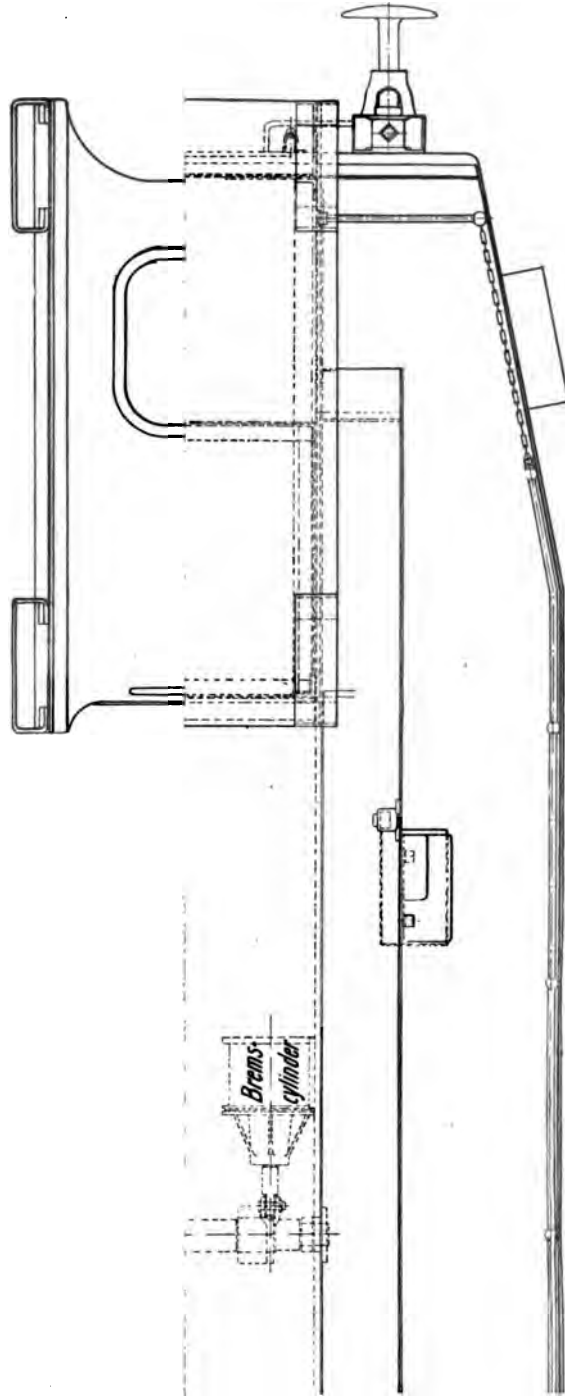
Kurbelzapfen dieser Welle als Kugelzapfen ausgebildet und die entsprechende Kuppelstange mit einem senkrechten Drehzapfen ausgestattet werden, damit sie den Verschiebungen der Kuppelachse folgen kann.

Eine etwas andere Bauart eines Deichselgestells zeigt Fig. 154 nach einer Ausführung von J. A. Maffei in München-Hirschau (DRP. 254 547).

Das Wesen dieser Bauart beruht darin, daß der Wagenkasten unabhängig vom Drehzapfen mittels Stützzapfen auf Lagerpfannen des Deichselgestellrahmens ruht.

Fig. 153.





Verlag von Oskar Leiner in Leipzig.

Fig. 155.

Zipp, Vollbahnlokomotiven.



Mit *a* ist der Hauptrahmen der Lokomotive, mit *b* das Deichselgestell bezeichnet. Der Hauptrahmen *a* ruht mittels zweier Stützzapfen *c* auf Lagerpfannen *o* des Deichselgestellrahmens *b*, während das Gestell durch den Drehzapfen *d* geführt wird, der gewöhnlich außerhalb der Ebene der Stützzapfen liegt. Seine Lage ist durch den Krümmungshalbmesser der Strecke und den Radstand der Lokomotive bestimmt. Die Lage der Stützzapfen ergibt sich aus der jeweilig vorgeschriebenen Achslast der Lauf- und der ersten Kuppelachse. Die Stützzapfen *c* sind halbkugelig ausgebildet, so daß sie beim Verdrehen des Deichselgestells je nach dem Krümmungshalbmesser der Strecke in den Lagerpfannen *o* gleiten können. Zur Sicherung eines guten Laufs in der Geraden dient eine Einstellvorrichtung, die aus Pufferfedern *e*

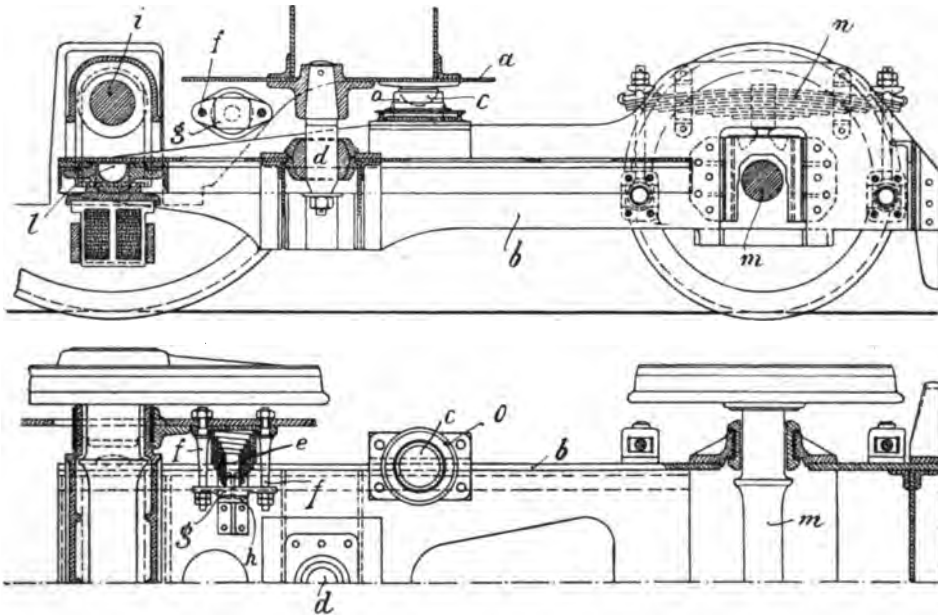
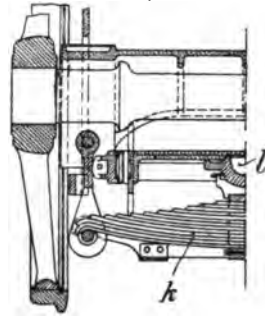


Fig. 154.

und aus einem durch Bolzen *f* geführten Gleitstück *g* besteht. Dieses Gleitstück wird durch die Federn *e* gegen einen am Deichselgestellrahmen *b* sitzenden Anschlag *k* gedrückt und sucht nach dem Ausschlagen des Rahmens *b* diesen wieder in seine Mittellage zu bringen. Der Ausschlag des Gestelles *b* an dieser Stelle ist gering, die Federn *e* legen somit beim Auslenken der Deichsel einen kurzen Weg zurück und ändern daher auch nur wenig ihre Belastung, so daß dadurch die Beweglichkeit des Gestelles nicht beeinflußt wird.

Die Deichselspitze *l* ist gegen die Kuppelachse *i* und deren Lager mittels Tragfeder *k* abgestützt. Das hintere Ende des Deichselgestellrahmens ruht mittels der Tragfedern *n* auf den Lagern der Laufachsen *m*. Ein Ausführungsbeispiel der genannten Firma für dieses Deichselgestell gibt Fig. 155.

Diese Figur läßt außerdem erkennen, daß die Kuppelachse eine geringe Verschiebbarkeit — um 22 mm nach jeder Seite — besitzt; dementsprechend kann das Kuppelstangenlager auf dem zylindrischen Kurbelzapfen der Kuppelachse gleiten. Man nennt derartige Achsen mit seitlicher Verschiebbarkeit Gölsdorf-Achsen. Durch ihre Anwendung wird, wie die schematische Darstellung in Fig. 156 zeigt, die Aufgabe, mehrfach gekuppelte Lokomotiven kurvenbeweglich zu machen, in einfachster Weise gelöst. Man ordnet einige der Kuppelachsen mit fester Lagerung an, während die übrigen verschiebbar sind.

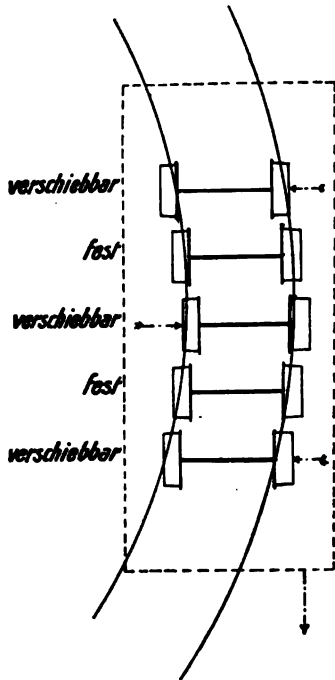


Fig. 156.

Schließlich ist noch zu bemerken, daß der elektrische Betrieb es gestattet, bei Lokomotiven mit einer verhältnismäßig großen Zahl von Kuppelachsen eine gute Lauffähigkeit dadurch zu sichern, daß die Lokomotive aus zwei kurzgekuppelten Einzelfahrzeugen zusammengesetzt ist, die beide von einem Führerstand aus gesteuert werden können, wie es z. B. bei der Lötchberg-Lokomotive (Kapitel V) der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft der Fall ist.

Weitere Einzelheiten über die bauliche Anordnung und Ausführung von Lauf- und Kuppelachsen sind aus den Abbildungen ausgeführter Lokomotiven im letzten Kapitel zu entnehmen.

### 23. Der Einfluß der Schwerpunktslage auf die Lauffähigkeit.

Vor etwa 20 Jahren tauchten Bestrebungen im Lokomotivbau auf, die darauf hinausliefen, den nach alter Überlieferung tief liegenden Schwerpunkt der Lokomotiven höher zu legen. Man ließ sich früher von der Vorstellung leiten, daß ein Körper von bestimmter Bodenfläche und bestimmtem Gewicht um so eher kippt, je höher sein Schwerpunkt liegt. Diese an sich richtige aber einseitige Vorstellung berücksichtigt indessen nicht die Federwirkungen, deren den Gang der Lokomotive beruhigender Einfluß um so stärker hervortritt, je höher der Schwerpunkt liegt. Die Federn haben bekanntlich den Zweck, die unvermeidlichen schnell wechselnden in der Senkrechten wirkenden Stöße, denen das Untergestell infolge kleiner Ungleichmäßigkeiten in der Höhenlage der Schienen ausgesetzt ist, aufzunehmen und von dem abgedehnten Teil der Lokomotive fernzuhalten. Wären keine Federn vorhanden, so müßte die ganze Masse der Lokomotive, den Stößen entsprechend, beschleunigt werden, was zu außerordentlich großen, die Schienen zusätzlich beanspruchenden Beschleunigungsdrücken Veranlassung geben würde. Der gefederte Teil der Lokomotive folgt aber den durch die Federn übertragenen Stößen um so langsamer, je größer sein Trägheitsmoment ist. Dieses nimmt aber mit der Höhenlage des Schwerpunktes zu.

Eingehende Berechnungen zu dieser Frage sind von J. Jahn angestellt worden, die den großen Vorteil hoher Schwerpunktlage in bezug auf die Schonung von Schienen und Oberbau nachgewiesen haben und auf die zum eingehenderen Studium verwiesen werden möge<sup>1)</sup>.

Aber nicht nur gegen senkrechte, sondern auch gegen seitliche Stöße wirkt die Federung um so mehr ausgleichend, je höher der Schwerpunkt liegt. Die Gründe sind die gleichen, wie sie bereits oben angeführt sind. Je größer das Trägheitsmoment des abgefederten Lokomotivteils bezogen auf seine wagerechte Längsachse ist, desto langsamer wird seine Eigenschwingung und desto weniger wird er von etwaigen Seitenstößen, die quer zum Gleis gerichtet sind, beeinflußt, desto ruhiger muß also die Lokomotive fahren. Denn da der Schwerpunkt der abgefederten Lokomotivmassen Schwingungen quer zum Gleis ausführen kann, da er also eine gewisse Beweglichkeit in der Richtung der Achsen besitzt, so sind letztere ebensogut gegenüber dem feststehend gedachten Schwerpunkt quer zum Gleis verschiebbar, und zwar wird diese Verschiebbarkeit um so größer sein, je höher der Schwerpunkt liegt.

Hieraus folgt aber ohne weiteres, daß die Schienen um so mehr von seitlichen Beschleunigungsdrücken entlastet werden, je höher der Schwerpunkt des abgefederten Lokomotivteils liegt. Daraus ergibt sich eine Verminderung der Stoßverluste und eine bedeutende Schonung des Oberbaues. Die Federung der Lokomotive wird also Stöße, die in der Richtung der Achsen wirken, um so vollkommener aufnehmen, je höher der Schwerpunkt der abgefederten Massen liegt. Solche seitliche Stöße treten beispielsweise beim Einfahren in Krümmungen und Weichen auf oder beim Schlingern des Fahrzeuges.

Man hat nun der elektrischen Lokomotive hin und wieder den Vorwurf gemacht, ihr Schwerpunkt liege zu tief. Wenn auch dieser Vorwurf im Hinblick auf die älteren Formen der elektrischen Lokomotive mit tiefliegenden Motoren, deren unabgefederte Massen alle auftretenden Stoßbewegungen mitmachen müssen, vollkommen berechtigt ist, so trifft er auf die neuen Lokomotivbauarten mit hochliegenden Motoren, die im abgefederten Lokomotivteil untergebracht sind, nicht mehr zu.

Die hohe Lage des Schwerpunktes hat für die gute Lauffähigkeit elektrischer Lokomotiven aus folgendem Grunde noch eine besondere Bedeutung. Bei Schwingungen des Untergestells um eine wagerechte Längsachse infolge von Höhenunterschieden der beiden Schienen entsteht durch die sog. Kreiselwirkung des Motorläufers ein Kräftepaar, welches die Lokomotive quer zum Gleis zu stellen bestrebt ist; mit anderen Worten: Wenn die Lokomotive „wankt“, werden durch Vermittlung der Kreiselwirkung Schlingerbewegungen ausgelöst und umgekehrt lösen Schlingerbewegungen infolge der Kreiselwirkung Wankbewegungen aus. Das durch die Kreiselwirkung hervorgerufene Moment ist dabei nach den Ausführungen auf S. 132 um so größer, je größer die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_2$  der Ablenkung aus der Gleichgewichtslage des umlaufenden Läufers ist.

Die Schwingungszahl der abgefederten Lokomotivmassen ist aber um so kleiner, und damit auch die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_2$ , je größer deren Trägheitsmoment ist, je höher also der Schwerpunkt liegt.

<sup>1)</sup> Z. d. V. D. I. 1909, S. 521.

Hieraus folgt dann ohne weiteres, daß auch die auf die Kreiselwirkungen zurückzuführenden störenden Bewegungen um so besser gedämpft werden, je höher der Schwerpunkt liegt.

#### 24. Kreiselwirkungen bei elektrischen Lokomotiven.

Man hat den elektrischen Lokomotiven, die ja alle gegenüber der Dampflokomotive verhältnismäßig große umlaufende Massen besitzen, den weiteren Vorwurf gemacht, daß ihre Betriebssicherheit durch die Kreiselwirkungen stark herabgesetzt werde; es ist daher nötig, auf das Wesen dieser Kreiselwirkungen und auf die Größenordnung des durch sie erzeugten Kippmomentes kurz einzugehen.

Das grundlegende Gesetz der Kreiselbewegung lautet folgendermaßen: „Wenn die Ebene einer umlaufenden Masse, deren auf die Umlaufachse bezogenes polares Trägheitsmoment  $J$  und deren Winkelgeschwindigkeit  $\omega_1$  ist, mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_2$  gedreht wird, so wirkt auf die Umlaufachse der Masse ein Kräftepaar, dessen Ebene senkrecht zur Ebene der aufgezungenen Drehung steht und welches das Bestreben hat, die Achse der umlaufenden Masse so zu drehen, daß die Umlaufachse der Masse mit der Richtung der erzwungenen Drehung übereinstimmt.“ Dieses Kräftepaar erzeugt das sog. gyrostatische oder Kreisel-Kippmoment, das sich durch den Ausdruck

$$D_g = \omega_1 \cdot J \cdot \omega_2 \text{ mkg}$$

darstellen läßt<sup>1)</sup>.

Man bezeichnet das Produkt  $\omega_1 \cdot J$  als „Impuls“ der umlaufenden Masse.

Aus diesem Gesetz der Kreiselbewegung lassen sich nun mit Bezug auf ein Fahrzeug mit umlaufenden Massen, also im vorliegenden Fall auf eine elektrische Lokomotive, folgende Schlüsse ziehen. Wenn das Fahrzeug irgendwelche Richtungsänderungen in der Weise erfährt, daß die Ebene resp. die Ebenen der umlaufenden Massen, also in erster Linie der Räder und Motorläufer gedreht werden, so müssen Kreisel-Kippmomente auftreten.

Solche Richtungsänderungen werden dem Fahrzeug aufgezungen, wenn es eine Krümmung durchfährt, wobei den Achsen der umlaufenden Massen eine Drehung in einer wagerechten Ebene aufgezungen wird. Das Kräftepaar des Kreiselmomentes wirkt demnach in einer senkrechten Ebene und hebt das Fahrzeug von der Innenschiene ab, so daß der Druck auf die äußere Schiene vermehrt wird.

Fährt die Lokomotive in der Krümmung mit dem Halbmesser  $R_{\text{km}}$  mit der Geschwindigkeit  $V_{\text{km/St}}$ , so hat die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_2$  der aufgezungenen Drehung den Wert

$$\omega_2 = \frac{V}{R \cdot 3,6} \text{ sec}^{-1}.$$

Da ferner in den Krümmungen die äußere Schiene gegenüber der inneren überhöht ist, werden die Achsen der umlaufenden Massen beim Einfahren in eine Krümmung auch in senkrechte Ebenen gedreht. Dadurch entsteht ein Kreiselkräftepaar, welches, in einer wagerechten Ebene wirkend,

<sup>1)</sup> Näheres über Kreiselwirkungen in Z. d. V. D. I. 1908, S. 464 und Föppl, Techn. Mechanik, Band IV.



bestrebt ist, die Ebenen der umlaufenden Massen quer zum Gleis zu stellen. Seine Größe hängt von dem Steigungsverhältnis der überhöhten Schiene ab, das im allgemeinen sehr klein ist, so daß dieses Kräftepaar verschwindend klein ist gegen den übrigen Verstellungskräfte; außerdem läßt sich nachweisen daß dieses in wagerechter Ebene wirkende Kräftepaar, das eine Verdrehung der ganzen Lokomotive um ihre senkrechte Achse bewirkt, günstig auf die Einfahrt in den Gleisbogen einwirkt<sup>1)</sup>.

Für eine etwaige Entgleisungsgefahr kommt nur das in einer senkrechten Ebene beim Durchfahren einer Krümmung auftretende Kippmoment  $D_\theta$  in Frage, das sich demnach gemäß den obigen Ausführungen durch den Ausdruck

$$D_\theta = J \cdot \omega_1 \cdot \frac{V}{R \cdot 3,6} \text{ mkg}$$

darstellen läßt.

Für die Berechnung von  $D_\theta$  ist folgendes zu beachten. Der Wert des Bruches  $\frac{V}{R}$  ist zunächst durch die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung festgelegt, in welcher die für bestimmte Krümmungshalbmesser  $R$  zulässigen Fahrgeschwindigkeiten  $V$  gegeben sind.

Der Impuls  $J \cdot \omega_1$  hat für die verschiedenen Lokomotivgattungen ganz verschiedene Werte. Man berechnet ihn, indem man für ein bestimmtes Fahrzeug die Summe der Einzelimpulse aller umlaufenden Massen bildet. Dabei ist darauf zu achten, ob alle Massen in gleichem Sinne umlaufen oder nicht. So drehen sich bei Motoren mit Zahnradvorgelege die Motoranker und die Treibräder in umgekehrter Richtung, so daß sich ihre Kreiselwirkungen zum Teil aufheben. Dagegen laufen bei Verwendung von Achsmotoren oder von hochliegenden Motoren mit Parallelkurbeltrieb sämtliche Massen in gleicher Richtung um.

Dabei läßt sich rechnerisch nachweisen, daß bei gegebener Leistung der Lokomotive die Verwendung hochliegender Motoren im allgemeinen die größte Impulssumme ergibt.

Wiesinger hat die bei einer 2—B—1 Schnellzugslokomotive der Felten und Guilleaume-Lahmeyerwerke mit einer Stundenleistung von 1000 PS auftretenden Kreiselwirkungen berechnet<sup>2)</sup> und gelangt dabei durch Vergleichung des Kreiselkippmomentes mit dem durch die Wirkung der Fliehkraft auf die Lokomotive entstehenden Kippmomenten zu folgenden Ergebnissen.

Die Fliehkraft  $C$  berechnet sich aus der bekannten Gleichung

$$C = \frac{M v^2}{r} \quad (v \text{ und } r \text{ in m/sec resp. in m einzusetzen);$$

und da  $\frac{v}{r} = \omega_2$  ist, erhält man

$$C = M \cdot v \cdot \omega_2.$$

Liegt der Schwerpunkt  $H$  Meter über Schienenoberkante, so läßt sich das durch die Fliehkraft erzeugte Kippmoment, welches mit dem Kreiselmoment gleiche Richtung hat, durch den Ausdruck

$$D_C = H \cdot M \cdot v \cdot \omega_2 \text{ mkg}$$

berechnen.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1910, S. 147.

<sup>2)</sup> E. K. B. 1910, S. 361.

Das gesamte Kippmoment  $D_K$  hat demnach die Größe

$$D_K = D_G + D_C = \frac{V}{3,6 R} \left( J \cdot \omega_1 + H \cdot M \cdot \frac{V}{3,6} \right) \text{ mkg.}$$

Unter Annahme eines Durchmessers von 2000 mm für die Treibräder und bei einem Gesamtgewicht der Lokomotive von 65 t, wobei das gesamte Trägheitsmoment der umlaufenden Massen 860 mkg/sec<sup>2</sup> beträgt, ergaben sich die in folgender Zahlentafel zusammengestellten Werte:

Krümmungshalbmesser der Kurven m	Zulässige Fahrgeschwindigkeiten km/St	Winkelgeschwindigkeit $\omega_2$	Kreisel-Kippmoment $D_G$	Fliehkraft-Kippmoment $D_C$	Gesamtes Kippmoment $D_K$
180	45	0,0695	746	10 700	11 446
200	50	0,0696	832	11 900	12 732
250	60	0,0667	950	13 650	14 600
400	75	0,0521	931	13 300	14 231
500	80	0,0444	847	12 100	12 947
600	85	0,0394	800	11 400	12 200
700	90	0,0357	765	11 000	11 765
800	95	0,0333	750	10 750	11 500
900	100	0,0309	735	10 550	11 285
1100	110	0,0278	730	10 450	11 180
1300	120	0,0257	735	10 650	11 394
1500	130	0,0241	747	11 100	11 875
1675	140	0,0232	775	11 950	12 785
1850	150	0,0225	805	12 800	13 695
2000	160	0,0222	845	13 650	14 600
2150	170	0,0219	886	14 500	15 510
2300	180	0,0217	935	15 350	16 425
2450	190	0,0215	970	16 200	17 325
2600	200	0,0214	1020	17 100	18 290

Aus diesen Zahlenwerten läßt sich die für die Beurteilung des elektrischen Lokomotivbetriebes wichtige Tatsache entnehmen, daß das Kreisel-Kippmoment nur etwa 7% des Fliehkraft-Kippmomentes beträgt. Es liegt demnach keine Veranlassung vor, in der Kreiselwirkung elektrischer Lokomotiven irgend eine Gefährdung der Betriebssicherheit zu erblicken. —

Über die Größenordnung der Kreiselwirkungen, welche beim Schlingern und Wanken der Lokomotive auftreten und über die hierdurch eingeleiteten Schwingungen der abgedeuteten Lokomotivmassen hat Brecht<sup>1)</sup> eingehende Berechnungen angestellt, die ebenfalls nachweisen, daß sie auf die Lauffähigkeit der elektrischen Lokomotive bis etwa 200 km/St ohne wesentlichen Einfluß sind.

## 25. Die Kraftübertragung zwischen Motor und Treibachsen.

1. Unmittelbarer Antrieb. Diese Antriebsart, bei welcher der Motorläufer unmittelbar auf der Treibachse sitzt, stellt die einfachste Form dar. Es sind keine Zwischenglieder für die Kraftübertragung erforderlich und die Drehzahl des Motors ist diejenige der Achsen. Die Nachteile dieser Anordnung liegen indessen auf der Hand.

Da nämlich der Ständer ebenfalls vermittelt der Lager auf der Achse ruht, muß diese das ganze unabgedeutete Gewicht des Motors tragen und dieser

<sup>1)</sup> E. K. B. 1910, S. 147, 161.

muß alle störenden Bewegungen mitmachen, was nach dem in Abschnitt 23 gesagten große zusätzliche Beanspruchungen des Gleises zur Folge hat.

Hierzu kommt ferner, daß wegen der Beschränkung des Raumes für die Unterbringung des Motors und wegen der Beschränkung des zulässigen Achsdruckes auch der Motor in seinen Abmessungen und in seinem Gewicht, also in seiner Leistung einer bestimmten Begrenzung unterliegt, die mit etwa 350 PS anzunehmen ist.

Bei einer Lokomotive großer Leistungsfähigkeit müßten also mehrere Treibachsen mit Motoren ausgerüstet werden, wodurch sich eine Zunahme der oben erwähnten Schwierigkeiten ergibt.

Man suchte diese dadurch zu umgehen, daß man das ganze Motorgewicht an dem abgefederten Lokomotivrahmen aufhing und eine nachgiebige federnde Verbindung zwischen Läufer und Treibachse herstellte. Dies gelang durch die Verwendung einer hohlen Läuferachse, die mit gewissem Spiel die Treibachse umfaßt und ihr Drehmoment auf diese durch federnde Kupplungen überträgt.

Diese Hilfsmittel haben indessen nur eine untergeordnete Bedeutung, da die schwerwiegenden Bedenken gegen die Tieflage des Schwerpunkts bestehen bleiben.

Die Schwierigkeiten des direkten Antriebes sind noch in einer anderen Richtung zu suchen. Um das Gewicht der Lokomotiven nach Möglichkeit zu verringern, ist es in erster Linie erforderlich, die Motorleistung voll auszunützen. Maßgebend für diese Höchstleistung eines Motors von gegebenen Abmessungen ist die höchst zulässige Umfangsgeschwindigkeit des Läufers, die etwa mit 35 m/sec anzunehmen ist. Man wird also dahin streben müssen, den Motor mit einer dementsprechenden Umlaufzahl zu betreiben. Nun kann man annehmen, daß der Motoranker etwa den halben Durchmesser des Treibrades besitzt, so daß demnach das Rad eine Umfangsgeschwindigkeit von 70 m haben müßte, wenn der Motor richtig ausgenützt werden soll. Dieser Umfangsgeschwindigkeit entspricht aber eine Fahrgeschwindigkeit von rund 250 km in der Stunde.

Hieraus folgt, daß bei allen geringeren Fahrgeschwindigkeiten der Motor nur unvollkommen ausgenützt wird, so daß das Gewicht des Motors für die Leistungseinheit bei den gebräuchlichen Zuggeschwindigkeiten verhältnismäßig groß ausfällt.

Dieses Mißverhältnis läßt sich nun durch die Zwischenschaltung eines Vorgeleges zwischen Motor und Treibachse ausgleichen.

2. Antrieb durch Zahnradvorgelege. Hier sind zwei Anordnungen möglich. Die eine ist aus dem Straßenbahnbetrieb bekannt und ist dadurch gekennzeichnet, daß der Ständer des Motors einerseits durch Tatzenlager auf der Treibachse ruht, andererseits federnd am Gestellrahmen der Lokomotive aufgehängt ist. Neben dem Motor muß noch das Vorgelege untergebracht werden, so daß der Raum für die Unterbringung des Motors selbst eine weitere Beschränkung erfährt. Wenn auch an und für sich bei passender Wahl des Vorgeleges der Motor jetzt voll ausgenützt werden kann, ist seine Leistung noch enger begrenzt als beim Achsmotor und außerdem haftet auch dieser Anordnung der Fehler des tiefliegenden Schwerpunktes

an. Diesen Fehler vermeidet die zweite Anordnungsmöglichkeit, nämlich der Einbau des Motors senkrecht über der Treibachse im abgefederten Lokomotivteil, eine Anordnung, welche gleichzeitig den weiteren Vorteil größerer Übersichtlichkeit des ganzen Antriebs und besserer Lüftung des Motors mit sich bringt.

Zunächst ist hier die Frage nach dem günstigsten Übersetzungsverhältnis zu beantworten.

Wenn  $n_m$  die Drehzahl des Motors und  $n_a$  diejenige der Treibachse ist, so ist

$$\varphi = \frac{n_a}{n_m}$$

das Übersetzungsverhältnis.

Nun ist in den „Technischen Vereinbarungen“ die Umlaufzahl der Treibräder mit Rücksicht auf die Fliehkräfte der umlaufenden Massen der Kuppelstangen mit 300 in der Minute begrenzt, wobei indessen die Möglichkeit gegeben ist, unter Umständen, wenn ein völliger Ausgleich dieser Massen möglich ist, die Grenze auf 400 Umdrehungen in der Minute zu verschieben. Da eine elektrische Lokomotive überhaupt keine hin- und herwandernden Massenpunkte, wie die Dampflokomotive in den Kolbenstangen und Kolben besitzt, da vielmehr jeder Massenpunkt der an der Bewegung teilnehmenden Getriebe auf einem Kreisumfang umläuft, so läßt sich dementsprechend bei der elektrischen Lokomotive ein vollkommener Massenausgleich durch umlaufende Gegengewichte erzielen. Die Voraussetzungen für die Erhöhung der zulässigen Drehzahl treffen also zu.

Es ist ferner

$$V = \frac{2 R \pi \cdot n_a \cdot 3600}{1000 \cdot 60},$$

woraus folgt, daß

$$n_a = \frac{V}{R} \cdot 2,65$$

ist, worin  $V$  die Fahrgeschwindigkeit in Stundenkilometer und  $R$  der Halbmesser des Treibrades in m ist.

Es ist also

$$\varphi = \frac{V}{R} \cdot 2,65 \cdot \frac{1}{n_m},$$

wobei der Wert  $\frac{V}{R} \cdot 2,65$  höchstens den Wert 400 annehmen darf.

Der Wert des Bruches  $\frac{V}{R}$  unterliegt aber noch einer anderen Begrenzung, und zwar dann, wenn mehrere Treibachsen mittelst einer Kuppelstange gleichzeitig angetrieben werden. Der kleinste Treibradhalbmesser ist dann durch die Forderung bestimmt, daß die Kuppelstangenköpfe in ihrer tiefsten Stellung noch einen genügenden Abstand von der Schienenoberkante besitzen müssen. Hierdurch bestimmt sich der geringste Wert von  $R$  zu 0,55 m. Mit Rädern solchen Durchmessers läßt sich bei 400 Umdrehungen in der Minute eine Stundengeschwindigkeit von 83 km erreichen. Mithin ergibt sich für diesen Fall, der später noch eingehender zu behandeln ist, daß bei Verwendung des kleinsten Treibradhalbmessers der Bruch  $\frac{V}{R}$  bis zur Geschwindigkeit

$V = 83$  km den Wert  $\frac{V}{0,55}$  besitzt. Das günstigste Übersetzungsverhältnis für diesen Fall errechnet sich daher aus der Gleichung

$$\varphi = V \cdot \frac{2,65}{0,55} \cdot \frac{1}{n_m} = 4,82 \frac{V}{n_m}.$$

Berücksichtigt man ferner, daß der Durchmesser des Läufers  $\delta$ , seine Umfangsgeschwindigkeit  $W$  und seine minutliche Drehzahl  $n_m$  gemäß dem Ausdruck

$$n_m = \frac{W \cdot 60}{\delta \cdot \pi}$$

zusammenhängen, so erhält man für  $w = 35$  m/sec die weitere Gleichung

$$\varphi = 2,65 \frac{V}{R} \cdot \frac{\delta \cdot \pi}{W \cdot 60} = 0,004 \frac{V}{R} \cdot \delta$$

aus welcher sich die lehrreiche Tatsache ergibt, daß das günstigste Übersetzungsverhältnis auch vom Durchmesser des Motorläufers abhängt.

Für die bauliche Ausführung eines derartigen Zahntriebes mit übereinanderliegenden Achsen ist zu berücksichtigen, daß die Treibachse und die im abgedeckten Lokomotivteil untergebrachte Motorachse infolge des Federspiels eine gewisse Verschiebbarkeit gegeneinander in der Ebene ihrer Achsen, also in senkrechter Richtung besitzen müssen.

Bei den meisten Ausführungen sucht man dieser Forderung dadurch gerecht zu werden, daß man in den Zahntrieb federnde Zwischenglieder einbaut.

Beispielsweise läßt sich dies dadurch erreichen, daß das große Zahnrad auf einer Hohlwelle sitzt, die am Motorgehäuse fest gelagert ist, so daß Motor und Zahnradgetriebe ein starres Ganzes bilden. Die Hohlachse umfaßt mit entsprechendem Spiel die Treibachse und die Kupplung zwischen Treibrad und Zahnrad erfolgt durch Federn<sup>1)</sup>.

Eine Schwierigkeit beim Zahnradantrieb liegt in der großen einseitigen Lagerbelastung des Motors. Diese setzt sich für das zwischen Ritzel und Motor liegende Lager aus dem durch den Zahndruck hervorgerufenen Gegen- und dem auf dieses Lager entfallenden Anteil des Ankergewichts zusammen. Diese Lagerbelastung wächst infolge der Hebelwirkung rascher als der Zahndruck selbst und führt mit steigenden Zahndrücken zu einer Verlängerung der Lager und zu einer Vergrößerung des Zapfendurchmessers. Dadurch wird einerseits der Raum für die Unterbringung des Motorläufers beschränkt, andererseits die Reibungsarbeit vergrößert. Man vermeidet diese Übelstände wirksam dadurch, daß man den Zahntrieb verdoppelt, indem man auf jeder Seite des Motors einen Zahntrieb anbringt. Dadurch wird die Belastung des Lagers auf die Hälfte herabgesetzt und da der Zapfendurchmesser selbst entsprechend der dritten Wurzel aus der Beanspruchung sich ändert, ergeben sich bedeutend kürzere Lager und ein kleinerer Wellendurchmesser.

Bei diesem Doppelantrieb ist es natürlich erforderlich, daß sich die Belastung auch wirklich gleichmäßig auf die beiden Zahntriebe verteilt. Die

<sup>1)</sup> E. T. Z. 1912, S. 1075.

Voraussetzung hierfür ist, daß die Zahnflanken rechts und links gleichmäßig aufliegen. Ist diese gleichmäßige Zahnaufgabe von vornherein nicht vorhanden, so wird das stärker beanspruchte Rad sich schneller abnutzen, so daß hierdurch von selbst die Gleichheit des Eingriffs auf beiden Seiten hergestellt wird.

Allerdings wirkt auch die federnde Nachgiebigkeit der Motorwelle bis zu einem gewissen Maße ausgleichend, indessen setzt doch der doppelte Zahntrieb eine sehr sorgfältige Werkstattarbeit voraus, wenn man den einseitigen Verschleiß des Zahntriebes vermeiden will.

Welche Leistungen bereits mit einfachem Zahntrieb erreicht worden sind, läßt sich an der von der Maschinenfabrik Oerlikon erbauten Lötschberg-

Lokomotive zeigen, die zwei Motoren von je 1000 PS besitzt, und die ihr Drehmoment durch einen Zahntrieb auf die Triebachsen überträgt.



Fig. 157.

Die Form des Zahntriebs ist aus Fig. 157 ersichtlich. Der Zahnkolben und das Zahnrad sind aus geschmiedetem Siemens-Martinstahl hergestellt und besitzen eine Breite von 250 mm.

Das Übersetzungsverhältnis ist 1:3,25. Die größte Zahngeschwindigkeit beträgt 22 m und der höchste Zahndruck 260 kg auf 1 cm<sup>2</sup>.

Es möge hier noch bemerkt werden, daß die genannte Fabrik kürzlich eine noch größere Type gleicher Bauart in Betrieb gebracht hat, deren Motoren je 1250 PS leisten<sup>1)</sup>. Näheres hierüber findet sich im letzten Kapitel.

Die Beweglichkeit in senkrechter Richtung zwischen Motorachse und Treibachse läßt sich noch auf andere Art erreichen, wenn der Motor gleichzeitig zwei Treibachsen antreibt. Man verwendet dann einen sog. Mitnehmer, wie es aus Abb. 158 ersichtlich ist. Dieser wird von den beiden Treibradkurbeln getragen und erhält seinen Antrieb durch eine Kurbel, welche an der unterhalb des Motors eingebauten Vorgelegewelle sitzt.

<sup>1)</sup> E. T. Z. 1912, S. 229.

Der Stein, in welchem sich der Zapfen dieser Kurbel dreht, kann sich in seinem Lager im Mitnehmer senkrecht verschieben, so daß sich die Höhenlage zwischen Treibradachse und Motorachse ändern kann.

Dieser Zahnrad-Mitnehmerantrieb ist bisher ausschließlich auf ausländischen Bahnen zur Anwendung gelangt<sup>1)</sup>.

Der deutsche Lokomotivbau verließ schon bald nach den ersten Ausführungen den Zahnradantrieb aus Gründen, die im folgenden Abschnitt noch zu erörtern sind und ging beim Bau von schnellfahrenden Lokomotiven für Personen- und Güterbeförderung zum Parallelkurbelgetriebe über. In



Fig. 158.

allerjüngster Zeit hat sich aber hierin ein Umschwung vollzogen, da für die schlesischen Strecken Güterzuglokomotiven mit Zahnradantrieb erbaut worden sind<sup>2)</sup>.

### 3. Die Kurbelantriebe.

#### a) Allgemeines.

Der reine Kurbelantrieb der Treibachsen vom Motor aus hat mit der Antriebsart durch Achsmotoren das gemeinsame, daß die Drehzahl  $n_m$  des Motors gleich der Drehzahl  $n_a$  der Treibachsen ist.

Ist nun  $W$  die zulässige Umfangsgeschwindigkeit des Läufers, die man möglichst einhalten wird, um das Motorgewicht voll auszunutzen; ist ferner  $\delta$  der Durchmesser des Läufers, so ist

$$n_m = \frac{60 \cdot W}{\pi \delta} = n_a.$$

Um ferner möglichst große Zugkräfte am Radumfang zu erzielen, wird man den Durchmesser der Treibräder möglichst klein und ihre Drehzahl möglichst hoch wählen. Letztere ist bei elektrischen Lokomotiven mit 400

<sup>1)</sup> Helios 1912, S. 32.

<sup>2)</sup> E. K. B. 1913, S. 213.

in der Minute begrenzt. Unter der weiteren Annahme, daß  $W_{\max} = 35$  m/sec ist, erhält man

$$\delta = \frac{60 W}{\pi n_a} = \frac{60 \cdot 35}{\pi \cdot 400} = 1,68 \text{ m};$$

d. h. also, daß Motoren mit kleinerem Läuferdurchmesser als 1,68 m bei reinem Kurbelantrieb nicht mit der ihrem Gewichte entsprechenden Leistung ausgenutzt werden können.

Aber von der Möglichkeit höchster Ausnutzung des Motorgewichtes allein darf die Wahl des Antriebs nicht abhängig gemacht werden, denn das würde mit anderen Worten sagen, daß bei Verwendung kleinerer Läuferdurchmesser der Zahnradantrieb gewählt werden müsse. Hierbei ist indessen zu bedenken, daß die Ersparnis an Motorgewicht mehr oder weniger durch das Mehrgewicht des Zahntriebes gegenüber der Kurbelstange aufgewogen wird, wenigstens für Läuferdurchmesser, die nicht allzuweit unterhalb des oben errechneten kritischen Wertes liegen. Berücksichtigt man dies also bei diesem Vergleich, der sich lediglich auf die höchsterzielbare Ausnutzung des Triebwerkgewichtes (Motor und Übertragungsglieder) bezieht, so gelangt man zu einem kleineren Grenzwert für den Durchmesser des Läufers, den er bei Anwendung des reinen Kurbelantriebs besitzen muß.

In den meisten Fällen liegen die Verhältnisse auch so, daß mit einem Motor gegebener Leistung eine möglichst hohe Zugkraft erzielt werden soll, oder mit anderen Worten, es kommt nicht allein darauf an, die Leistungsfähigkeit des Motors voll auszunutzen, sondern auch sein Drehmoment.

Untersucht man nach dieser Richtung hin den Zahnradantrieb und die Kurbelübertragung, so gelangt man zu dem bemerkenswerten Ergebnis, daß von einer bestimmten Zugkraft ab, die an den Treibrädern auftreten soll, bei gegebener Fahrgeschwindigkeit die Kurbelübertragung zweckmäßiger ist als der Zahnradantrieb.

Nach den Untersuchungen von Heyden<sup>1)</sup> läßt sich das Drehmoment eines Motors durch die Gleichung

$$D_m = 10\,000 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\delta}{2} \cdot a = 5000 \pi \delta^2 \lambda_1 a \text{ mkg}$$

darstellen, wenn

$\delta$  der Läuferdurchmesser in m

$\lambda_1$  die Breite des Läuferseisens in m

$a$  die Umfangszugkraft bezogen auf 1 cm<sup>2</sup> der Läuferoberfläche

ist.

Bei Zahnradübertragung mit dem Übersetzungsverhältnis  $\varphi = \frac{n_a}{n_m}$  ( $n_a =$  minutliche Drehzahl der Treibachsen,  $n_m =$  minutliche Drehzahl des Läufers) tritt dann an der Treibachse das Drehmoment

$$D_{a1} = \frac{D_m \cdot \eta_1}{\varphi} \text{ mkg}$$

auf, wobei  $\eta_1$  der Wirkungsgrad der Zahnradübertragung ist.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1909, Heft 16.



Die Zugkraft  $Z_1$ , die am Radumfang mit dem Halbmesser  $R$  auftritt, hat also den Wert

$$Z_1 = \frac{D_m \cdot \eta_1}{\varphi \cdot R} \text{ kg.}$$

Wie bereits oben erwähnt, ist

$$\varphi = \frac{n_a}{n_m} = \frac{n_a \cdot \delta \cdot \pi}{60 \cdot W},$$

woraus sich

$$Z_1 = \frac{300\,000 \cdot \eta_1 \cdot \alpha \cdot W \cdot \lambda_1 \cdot \delta}{R \cdot n_a} \text{ kg}$$

ergibt.

Bei Kurbelantrieb ist  $D_{a_2} = D_m \cdot \eta_2$

worin  $D_{a_2}$  das Drehmoment der Treibachse und  $\eta_2$  der Wirkungsgrad der Kurbelstangenübertragung ist.

Dementsprechend hat die Zugkraft den Wert

$$Z_2 = \frac{D_m \cdot \eta_2}{R} = \frac{15\,700 \cdot \alpha \cdot \lambda_2 \cdot \delta^2 \cdot \eta_2}{R} \text{ kg,}$$

wobei  $\lambda_2$  die Eisenbreite des Läufers bei Kurbelstangenantrieb ist.

Hieraus ergibt sich das Verhältnis

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{19,15 \cdot \eta_1 \cdot W \cdot \lambda_1}{\eta_2 \cdot n_a \cdot \lambda_2 \cdot \delta},$$

dessen Wert nach Heyden folgendermaßen zu berechnen ist. Wenn man den auf einer Lokomotive für die Motorbreite zur Verfügung stehenden Raum ausnützt, so kann man  $\lambda_2$  etwa zu 0,45 m und  $\lambda_1$  zu 0,25 m annehmen. Der geringere Wert von  $\lambda_1$  ergibt sich aus der Tatsache, daß der Raum in der Achsenrichtung zum Teil durch die Zahnräder beansprucht wird.

Es ist ferner  $\eta_1$  mit 0,9 und  $\eta_2$  mit 0,95 einzusetzen, schließlich  $W$  mit 35 m/sec, so daß

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{352,5}{n_a \cdot \delta}$$

wird.

Die Drehzahl  $n_a$  läßt sich durch die kilometrische Stundengeschwindigkeit  $V$  und den Radhalbmesser  $R$  vermittelst der Gleichung

$$R = 2,65 \frac{V}{n_a}$$

ausdrücken, so daß man schließlich die Gleichung

$$\frac{Z_1}{Z_2} = 133 \frac{R}{V} \cdot \frac{1}{\delta}$$

erhält.

Da bei den gegebenen Breitenabmessungen des Lokomotivmotors dessen Leistung durch den Durchmesser  $\delta$  bestimmt ist, läßt sich an Hand dieser letzten Gleichung folgende für die Beurteilung des Antriebs wichtige Schlußfolgerung ziehen.

Bleibt die Motorleistung unterhalb eines bestimmten Wertes, der durch den Durchmesser-Grenzwert

$$\delta_K = 133 \frac{R}{V} \text{ m}$$

gekennzeichnet ist, so ist  $\frac{Z_1}{Z_2} > 1$ , d. h. der Zahnradantrieb liefert größere Zugkräfte als der Kurbelstangenantrieb. Wird  $\delta$  größer als  $\delta_K$ , so liegen die Verhältnisse zugunsten des Kurbelstangenantriebs.

Nun war bereits früher (S. 136) erläutert worden, daß bei Kuppelstangenantrieb als Mindesthalbmesser  $R = 0,55$  m in Frage kommt. Da ferner das Treibrad mit höchstens 400 minutlichen Umdrehungen rollen darf, ergab sich die Tatsache, daß für alle Werte von  $V$  unterhalb 83 km/St  $R$  den gleichbleibenden Wert von 0,55 m besitzt.

Es ist also für alle Werte von  $V$  unterhalb 83 km

$$\delta_K = \frac{133 \cdot 0,55}{V} \text{ m,}$$

so daß man folgende Größen des Grenzdurchmessers erhält:

$V_{\text{km/St}}$	20	30	40	50	60	70	80	83
$\delta_K$ m	3,66	2,43	1,826	1,465	1,217	1,047	0,917	0,882

Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten als 83 km muß der Radhalbmesser wachsen, da die Drehzahl des Rades mit 400 in der Minute begrenzt ist.

Es ist

$$R_{\min} = 2,65 \frac{V}{n_{a \max}} = \frac{2,65 \cdot V}{400},$$

und hieraus erhält man für  $\delta_K$  den Wert

$$\delta_K = \frac{133 \cdot 2,65 V}{400 \cdot V} = 0,882,$$

d. h. für alle Geschwindigkeiten oberhalb 83 km ist unter der Annahme, daß man den der höchsten Drehzahl der Treibachsen entsprechenden kleinsten Radhalbmesser, der die Erreichung der größtmöglichen Zugkraft gewährleistet, verwendet, der Grenzdurchmesser durch den unveränderlichen Wert 0,882 m gegeben.

Diese Betrachtung lehrt, daß schon von einer verhältnismäßig geringen Leistung ab, welcher der Läuferdurchmesser  $\delta_K = 0,882$  entspricht, der Kurbelstangenantrieb günstiger wird, als der Zahnradantrieb. Wenn auch der Wert  $\delta_K$  infolge kleiner Abweichungen in den Maßen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  nicht genau allgemein festgelegt werden kann, so leistet doch diese Betrachtungsweise einen wichtigen Dienst insofern, als sie zeigt, daß für höhere Leistungen bei großen Geschwindigkeiten der Kurbelstangenantrieb vorzuziehen ist. Heyden hat nun unter Benutzung dieser Rechnungsergebnisse ein Schaubild geschaffen, das in Fig. 159 dargestellt ist und das für die schnelle Beurteilung der Antriebsfragen wertvolle Dienste leistet.

Auf der Abzisse sind die Höchstgeschwindigkeiten abzulesen, während die Ordinaten den höchsten Zugkräften entsprechen.

Soll beispielsweise der Geschwindigkeit  $V = 40$  km die Höchstzugkraft  $Z = 10\,000$  kg entsprechen, so liegt der Punkt, der durch diese beiden zusammengehörigen Werte bestimmt ist, innerhalb des Schaubildgebietes, für welches Zahnradübertragung in Frage kommt.

Soll dagegen der Motor die gleiche Leistung bei  $V = 80$  km abgeben, so daß  $Z = 5000$  kg wird, so liegt der durch diese beiden Werte bestimmte Punkt innerhalb des Gebietes im Schaubild, das für Kurbelstangenantrieb maßgebend ist.

Oder wenn ein Lokomotivmotor bei  $V = 100$  km eine Zugkraft  $Z = 6000$  kg entwickeln soll, so ist unbedingt dem Kurbelstangenantrieb der Vorzug zu geben.

b) Bauliche Ausführung der Kurbelantriebe.

Man unterscheidet zwei Hauptformen dieses Antriebs, je nachdem als Übertragungsglied zwischen Motor und Treibachsen, die stets zu mehreren gekuppelt sind, eine sog. Blindwelle oder ein sog. Mitnehmer angewendet wird.

Die Verwendung der Blindwelle, wie sie in Deutschland sich eingebürgert hat, zeigt Fig. 160, welche die 2—B—1 Schnellzuglokomotive der Siemens-Schuckert-Werke für die preußische Staatsbahn darstellt. Der Motor arbeitet zunächst auf die zwischen den Treibachsen fest im abgefederten Lokomotivrahmen gelagerte Blindwelle, von deren Kurbelzapfen aus das Drehmoment auf die Treibräder durch Kuppelstangen übertragen wird. Die Kuppelstange des auf der Abbildung links gelegenen Treibrades besitzt neben dem Kurbelzapfen der Blindwelle ein Gelenk mit wagerechter Achse, um welche das Treibrad kleine Schwingungen ausführen kann, wenn dieses infolge von Ungleichmäßigkeiten des Gleises seine Höhenlage ändert.

Die Blindwelle selbst muß möglichst in gleicher Höhe mit den Treibachsen gelagert sein, da nur unter dieser Voraussetzung die infolge der Federung des Lokomotivgestells auftretenden kleinen Änderungen der Höhenlage zwischen Treibachsen und Blindwelle so kleine Längenänderungen der Entfernung zwischen Blindwelle und Treibachsen im Gefolge haben, daß sie durch das Lagerspiel aufgenommen werden können.

Diese Tatsache ergibt sich aus folgender einfacher Überlegung.

In Fig. 161 stellt  $a$  die Blindwelle und  $b$  eine der Treibachsen dar. Wenn sich durch das Federspiel die Höhe  $h$  um den Betrag  $d h$  vergrößert, muß sich die wagerechte Entfernung  $m$  um den Betrag  $d m$  verkürzen. Nun ist

$$h^2 + m^2 = l^2$$

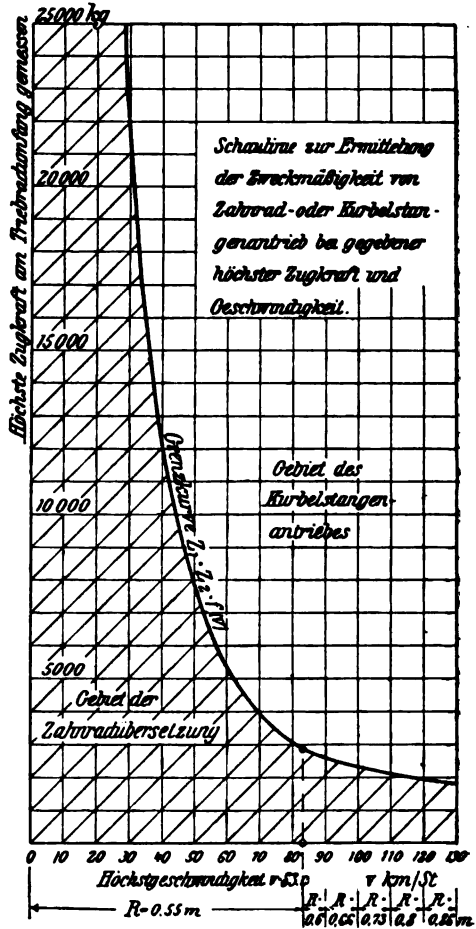


Fig. 169.

worin  $l$  die gegebene Länge der Kuppelstange ist. Durch Differenzierung erhält man die Gleichung

$$\frac{dm}{dh} = -\frac{h}{m} = -\operatorname{tg} \alpha,$$

welche besagt, daß bei gegebenen Höhenänderungen  $dh$  die Längenänderungen  $dm$  um so kleiner ausfallen, je kleiner  $\operatorname{tg} \alpha$  ist, daß sie also am kleinsten werden, wenn  $a$  und  $b$  auf einer horizontalen Linie liegen. Die folgenden Abbildungen zeigen die gebräuchlichen Anwendungsformen der Blindwellen.

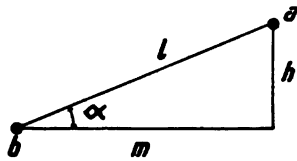


Fig. 161.

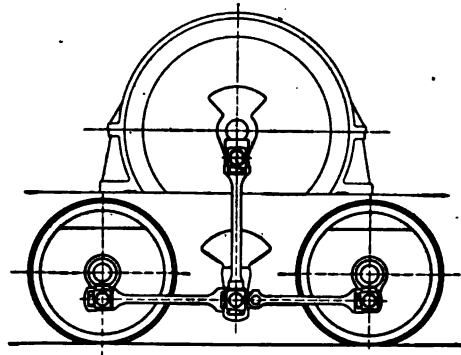


Fig. 162.

Nach Fig. 162 liegt die Blindwelle senkrecht unter der Motorwelle, während die Verbindungslinie dieser beiden Wellen nach Fig. 163 gegen die Wagerechte geneigt ist.

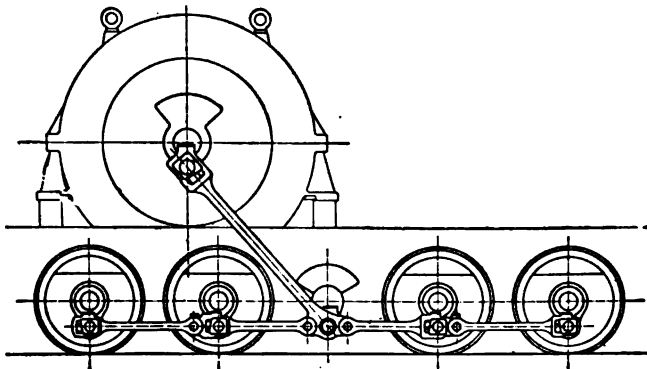


Fig. 163.

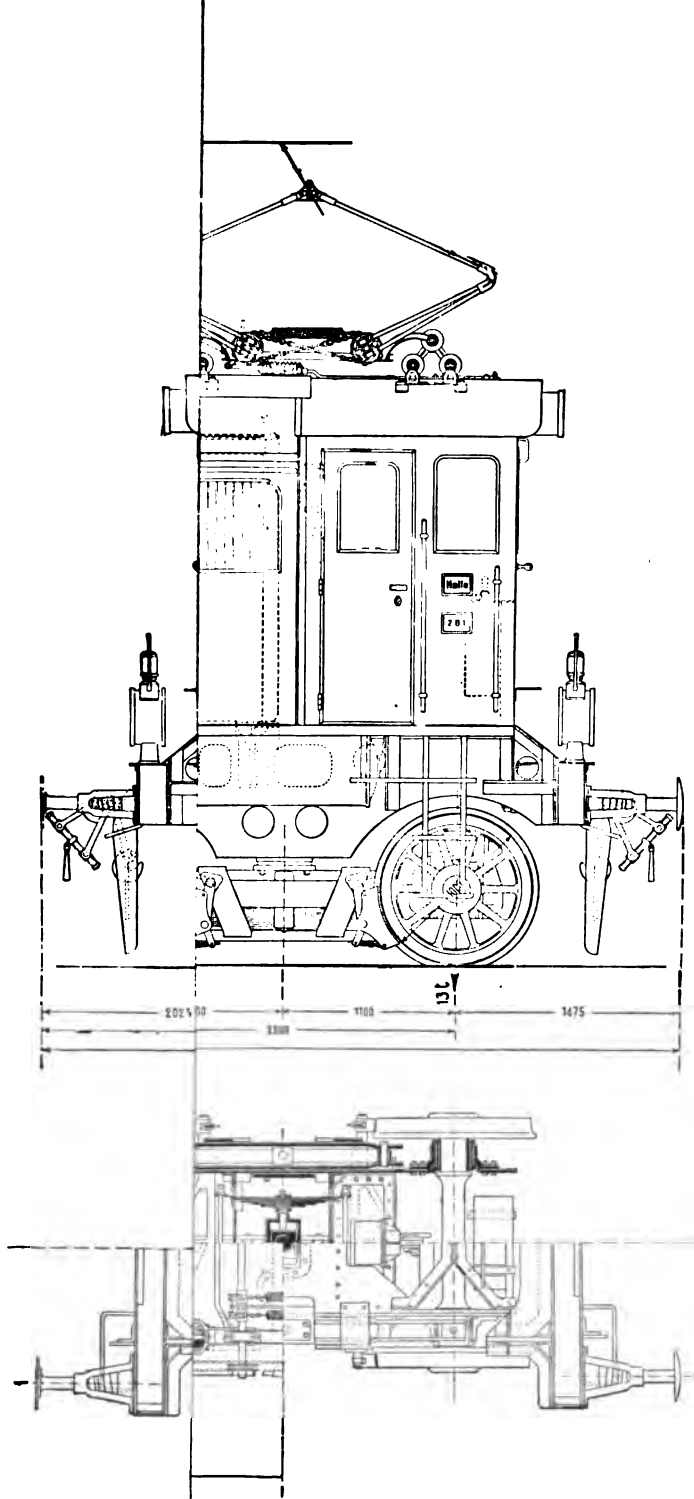
In Fig. 164 treibt jeder der beiden an den Enden der Lokomotive gelagerten Motoren je eine Blindwelle durch geneigte Kurbelstangen an.

Schließlich arbeiten nach Fig. 165 die beiden Motoren auf eine gemeinsame Blindwelle.

Die bei den verschiedenen Anordnungen in der Blindwelle auftretenden Beanspruchungen sind von Kleinow eingehend untersucht worden<sup>1)</sup>. Die Ergebnisse dieser rechnerischen Ermittlungen sind folgende.

Die Tatsache, daß an den Kurbelzapfen der Blindwelle wagerecht und senkrecht wirkende Stangenkräfte angreifen, führt auf rechnerischem Wege zunächst zu dem Ergebnis, daß der Kurbelzapfendruck bei unverändertem Drehmoment gleichbleibt, und zwar wandert dieser Zapfendruck einmal links um den Zapfen, während sich dieser einmal im Kreise rechts herum dreht. Da demnach ein eigentlicher Druckwechsel nicht vorliegt, können auch keine Triebwerkstöße eintreten. Es ist aber auch aus diesem Grunde zweck-

<sup>1)</sup> E. K. B. 1910, S. 495.



Zipp, Vollbahnd

Verlag von Oskar Leiner in Leipzig.



los, das Stangenlager nur in einer Richtung nachstellbar zu bauen. Da aber eine Nachstellung in verschiedenen Richtungen zu umständlich wird, verzichtet man zweckmäßig auf die Nachstellung des Lagers und läßt den Kurbelzapfen in einer in den Stangenkopf hineingepreßten Lagerbüchse laufen.

Beim Parallelkurbelgetriebe sind keine hin- und hergehenden Massen, sondern nur umlaufende Massen vorhanden, die demnach durch Gegengewichte vollkommen ausgewuchtet werden können. Die Kurbelwellenlager werden also durch irgendwelche Fliehkräfte nicht beeinflußt. Wie beim Kurbelzapfenlager läuft auch beim Kurbelwellenlager ein gleichbleibender Lagerdruck um das Lager herum, wodurch auch hier eine gleichmäßige Abnutzung des Lagers hervorgerufen wird.

Auch hier gelten also die Gründe, die für den Verzicht auf Nachstellbarkeit in einer Richtung sprechen. Zweckmäßig ist es dagegen, das Blindwellenlager so zu bauen, daß es in zwei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen nachgestellt werden kann.

Fig. 166 zeigt eine Ausführungsform des Blindwellenlagers, wie es von J. A. Maffei in München für die Kgl. bayrischen Staatsbahnen gebaut wird.

In einem die ganze Blindwellenlänge umfassenden Lagerkörper aus Stahlguß sind beiderseitig die eigentlichen Lager aus Rotmetall eingesetzt. Das aus einer oberen und unteren Schale zusammengesetzte Lager wird durch einen Keil aus Flußeisen zusammengehalten. Der Lagerkörper selbst wird durch Verschraubung mit dem Lokomotivrahmen verbunden. —

Die Beanspruchung der Blindwelle selbst ist sehr ungünstig. Die Versetzung der an den beiden Enden der Blindwelle arbeitenden Kurbeln um  $90^\circ$  bringt es mit sich, daß wenn die eine in der Totlage steht, die Welle einen Höchstwert des Drehmomentes übertragen muß, und zwar schwankt dieses Drehmoment während einer Umdrehung der Welle zweimal zwischen einem positiven und negativen Höchstwert.

Mit anderen Worten: Die Beanspruchung der Welle auf Verdrehung wechselt fortwährend ihre Richtung. Dazu treten noch Biegungsbe-

Zipp, Vollbahnlokomotiven.

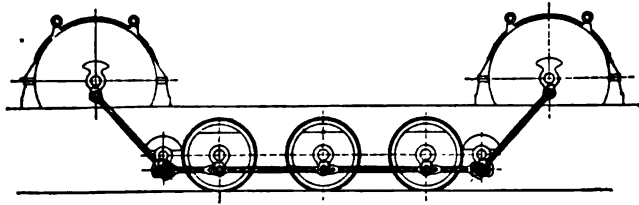


Fig. 164.

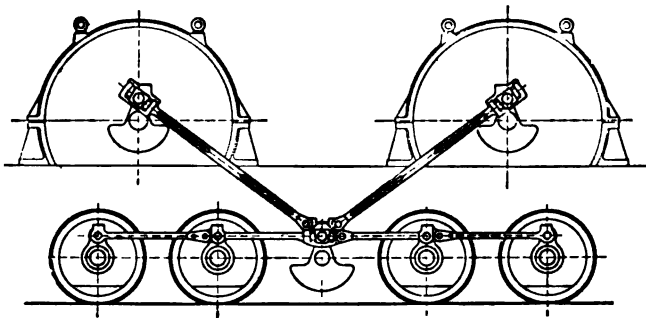


Fig. 165.





anspruchungen durch die am Kurbelzapfen angreifenden Kräfte, durch welche jede Faser des gefährlichen Querschnittes während einer Umdrehung der Kurbel zweimal die höchste Zug- und zweimal die höchste Druckbeanspruchung erfährt.

Infolge dieser sehr ungünstigen Beanspruchungen muß die Welle sehr kräftig ausgeführt werden und als Baustoff kommt nur Martinstahl, Tiegelgußstahl oder Nickelstahl in Betracht. Die ständig wechselnde Beanspruchung bringt schließlich die Gefahr mit sich, daß aufgepreßte Kurbeln sich lockern, so daß nur die eine Möglichkeit bleibt, die Blindwelle mit Kurbeln aus einem Stück herzustellen.

Die weiteren Untersuchungen Kleinows lehren, daß der schräge Antrieb der Blindwelle vom Motor aus (Fig. 163) in bezug auf die Beanspruchung der

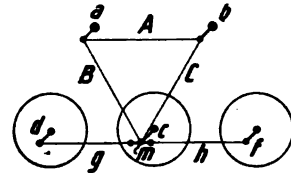


Fig. 167.

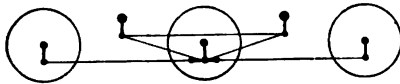


Fig. 168.

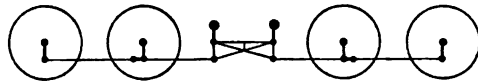


Fig. 169.

Blindwelle bedeutend günstiger ist als der senkrechte Antrieb (Fig. 162). Schließt die Verbindungslinie von Motorwelle und Blindwelle mit der Senkrechten einen Winkel  $\beta$  ein, so werden alle Drücke, Momente und Beanspruchungen im Verhältnis  $\cos \beta : 1$  kleiner wie beim senkrechten Blindwellenantrieb.

Für  $\beta = 30^\circ$  sinkt also die Beanspruchung um 13,4% und für  $\beta = 60^\circ$  um 50%. In gleichem Verhältnis vermindert sich auch die Abnutzung der Lager.

Noch günstiger wird die Beanspruchung, wenn zwei Motoren auf eine gemeinsame Blindwelle mit schrägem Antrieb arbeiten (Fig. 165). Hier sinken alle Beanspruchungen im Verhältnis  $\cos^2 \beta : 1$ , also für  $\beta = 30^\circ$  um 25% und für  $\beta = 60^\circ$  um 75%.

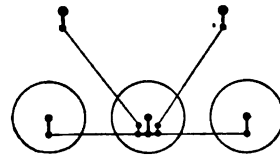


Fig. 170.

Für Lokomotiven großer Leistung, die auf zwei Motoren verteilt werden muß, bietet also der doppeltschräge Antrieb einer Blindwelle ganz bedeutende Vorteile, um so mehr als die Anordnung der beiden Motoren, zwischen denen der Transformator steht, eine sehr günstige Gesamtanordnung und Gewichtsverteilung ermöglicht. —



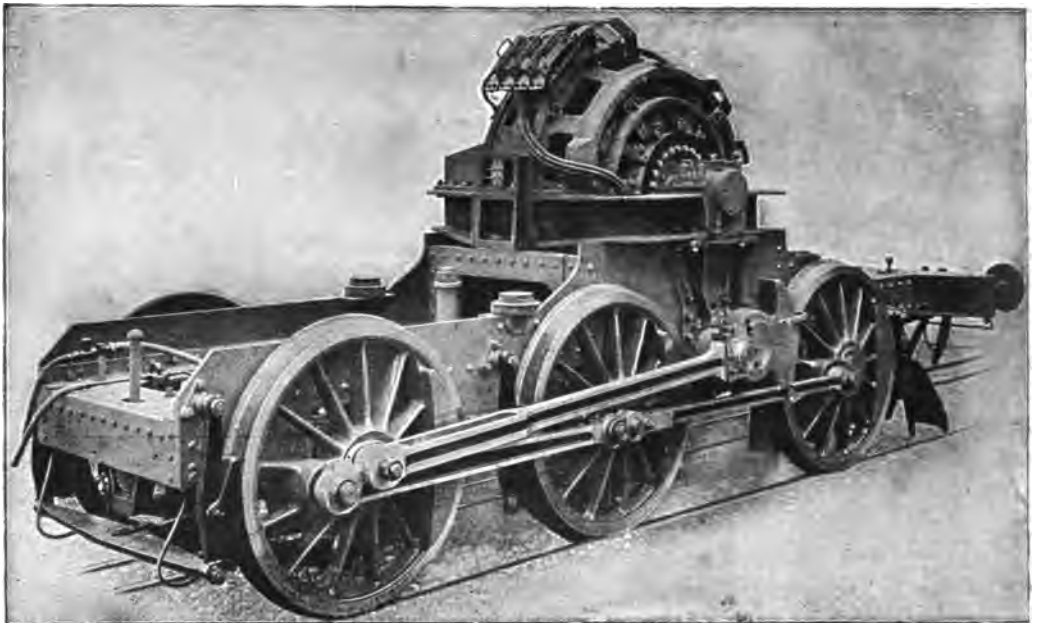
Fig. 171.

Während in Deutschland das Parallelkurbelgetriebe fast allgemein angewendet wird, hat sich im Ausland der sog. Kuppelrahmen, dessen Anwendung keine Blindwelle erfordert, Eingang verschafft. Der Vollständigkeit halber sollen hier die wichtigsten Formen seiner Anordnung erwähnt werden.

Eingehende Betrachtungen über die verwickelten Kraftverhältnisse bei diesem Getriebe hat Kleinow angestellt, auf die hier verwiesen werden muß<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> E. K. B. 1913, S. 337.

Der Kuppelrahmen ist nur bei Antrieb durch zwei Motoren anwendbar, oder man müßte, wenn nur ein Motor vorhanden ist, den zweiten Motor durch eine Blindwelle ersetzen. Das Wesen dieses Kuppelrahmens besteht darin, daß die Kurbeln der beiden in gleicher Höhe im Fahrzeug gelagerten Motoren durch einen steifen Rahmen verbunden sind. Dementsprechend bewegt sich jeder Massenpunkt dieses Rahmens auf einer kreisförmigen Bahn. In Fig. 167 sei  $A B C$  der dreieckförmige Kuppelrahmen, der von den Motorkurbeln  $a$  und  $b$  angetrieben wird. Der Punkt  $m$  des Rahmens beschreibt einen Kreis um die Mitte der Treibachse  $c$ . Dieser Punkt  $m$  kann daher als Angriffspunkt wagerechter Kuppelstangen zum Antrieb der Kuppelachsen dienen und die



Maschinenfabrik Oerlikon, Oerlikon b. Zürich.

Fig. 172.

Treibachse  $c$  vertritt die Blindwelle. Da aber jetzt die im abgefederten Lokomotivteil gelagerten Motorwellen  $a$  und  $b$  senkrechttes Spiel gegenüber der Treibachse  $c$  besitzen, muß das Lager, in welchem sich der Kurbelzapfen  $m$  dreht, ebenfalls senkrechttes Spiel besitzen.

Je nachdem die Motoren hoch oder niedrig gelagert sind, erhält man die in den Fig. 167 bis 169 dargestellten Anordnungen. Schließlich zeigt Fig. 170 noch einen Antrieb, der sich aus dem Kuppelrahmen entwickelt hat und der dadurch gekennzeichnet ist, daß der starre Rahmen durch zwei gelenkig miteinander verbundene Stangen ersetzt ist. Auch hier muß das Lager, in welchem sich der Kurbelzapfen der Treibachse dreht, senkrechttes Spiel besitzen.

Auch dieser, durch die Firma Brown, Boveri & Co. eingeführte Antrieb ist von Kleinow<sup>1)</sup> eingehend untersucht worden, mit dem Ergebnis,

<sup>1)</sup> l. c.

daß dieser nur dann dem Kuppelrahmen überlegen ist, wenn der Winkel, den die schrägliegenden Triebstangen mit der Senkrechten einschließen, klein ist, d. h. wenn die Motoren hochgelagert sind. — Einen sog. umgekehrten Kuppelrahmen zeigt Fig. 171, der bei Antrieb durch einen Motor anwendbar ist.

Schließlich ist noch eine Art des Kurbelantriebs zu erwähnen, die in Fig. 172 dargestellt ist und von der Maschinenfabrik Oerlikon ausgebildet worden ist. Die Blindwelle wird hier durch einen Zahnradtrieb vom Motor aus angetrieben und liegt etwas höher als die Treibachsen. Die Treibstange ist an ihrem Ende gabelförmig ausgebildet und greift an einem von der Kuppelstange vorspringenden Auge an. Durch die fast wagerechte Lage der Treibstange wird die Bedingung, daß die durch die senkrechten Schwingungen des abgederten Lokomotivteils auftretenden Längenänderungen so klein sein müssen, daß sie durch das Lagerspiel aufgenommen werden können, erfüllt.

---

## IV. Kapitel.

# Die Einrichtungen der einphasigen Vollbahnlokomotiven.

### **26. Die wichtigsten Gesichtspunkte für die Raumeinteilung der Lokomotive.**

Die einzelnen Betriebsmittel einer elektrischen Lokomotive müssen so auf den an und für sich sehr beschränkten Raum innerhalb der Lokomotive verteilt werden, daß in erster Linie die Übersichtlichkeit und leichte Zugänglichkeit aller Teile erreicht wird. Außer dem Raum für die beiden Führerstände müssen noch zwei Gänge freigelassen werden, die zwischen den beiden Führerständen an den inneren Längswänden verlaufen.

Die Verteilung der einzelnen Betriebsmittel muß ferner von dem Gesichtspunkte zweckmäßiger Gewichtsverteilung vorgenommen werden, die gemäß den früheren Erörterungen von wesentlichem Einfluß auf die Lauffähigkeit der Lokomotive ist.

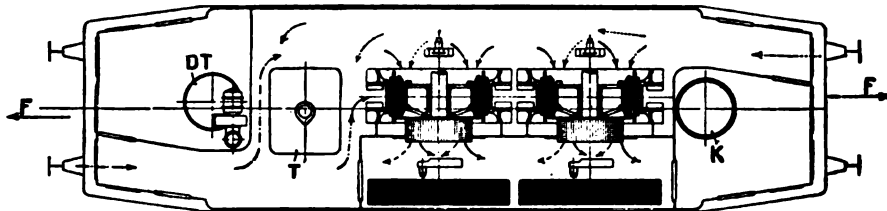
Da bei Lokomotiven großer Leistungsfähigkeit im Motorstromkreise Ströme von mehreren tausend Ampere fließen, deren Leitung große Kupferquerschnitte erfordert, ist es aus Gründen der Ersparnis von Kupfer zweckmäßig, den Motor, den Transformator und die Schalteinrichtungen des Sekundärkreises möglichst nahe zusammenzurücken. Sämtliche Betriebs-elemente des Hochspannungskreises, also auch der Transformator selbst, müssen in einem abgeschlossenen Raum untergebracht werden, der zur schnellen Abführung der vom Transformator abgegebenen Wärme wirksam gelüftet werden muß.

Überhaupt spielt die Lüftung einer elektrischen Lokomotive eine so wichtige Rolle, daß die Raumverteilung durch sie wesentlich mitbestimmt wird.

Je wirksamer die Motoren und Transformatoren gelüftet werden, desto höher liegt ihre Dauerleistung und desto größer ist ihre Überlastbarkeit, die bei der stark schwankenden Beanspruchung im Bahnbetrieb von großer Bedeutung ist.

Aus diesem Grunde muß in der abgeschlossenen Hochspannungskammer ein dauernder Luftstrom von unten nach oben unterhalten werden. Man erreicht dies entweder dadurch, daß man durch einen Ventilator von unten Frischluft in diese Kammer einbläst, die nach oben durch Lüftungsöffnungen am Dache entweicht, oder man benutzt den durch die Fahrt selbst erzeugten natürlichen Luftzug, indem man am unteren Teile der Kammer angebrachte

Klappen in der Fahrtrichtung öffnet. Die Luft durchstreicht dann die schachtartige Kammer und entweicht durch einen Lüftungsaufsatz auf dem Dache der Lokomotive, der nach der Rückseite der Lokomotive hin geöffnet ist.



F = Fahrtrichtung  
 K = Heizkessel  
 DT = Drehtransformator  
 T = Transformator

Fig. 173.

$\longleftrightarrow$  F Fahrtrichtung  
 $\curvearrowright$  Oberwind  
 $\curvearrowleft$  Unterwind

Diese natürliche Lüftung versagt indessen unter Umständen, wenn beispielsweise bei langsamer Fahrt dem Transformator bedeutende Leistungen entnommen werden, wie z. B. im Verschiebedienst oder bei langsamer Bergfahrt. In solchen Fällen wird man zur künstlichen Lüftung greifen müssen.

Auch für die Motoren — wenigstens für solche größerer Leistung — wird mit Vorteil ein kammerartiger Einbau gewählt. Wenn auch die Motoren



Fig. 174.

selbst mit Eigenlüftung durch Ventilatorwirkung des Läufers ausgestattet sind (vgl. Abschnitt 28), so ist es doch noch erforderlich, die Motorwärme schnell nach außen abzuführen. Als Beispiel für eine derartige Lüftung möge eine Anordnung der Siemens-Schuckert-Werke erläutert werden.

Die vollkommen eingekapselten Motoren werden durch Eigenventilatoren gelüftet, wobei die erwärmte Luft in eine schachtartige Zelle (Fig. 173) ausgeblasen wird. Diese Zelle ist durch einen Dachaufsatz entlüftet und hat im Fußboden große Öffnungen, die mit Gittern überdeckt sind. Durch diese Anordnung entsteht eine kräftige Schornsteinwirkung, welche der schnellen Abführung der erwärmten Luft förderlich ist. Sollte bei besonders ungünstigen Belastungsverhältnissen die auf diese Weise durchgeführte Kühlung noch nicht ausreichen, so kann den gekapselten Motoren noch vermittelt eines Gebläses Frischluft zugeführt werden. In jedem Falle ist dafür zu sorgen, daß die Kühlluft möglichst hoch über dem Bahnbett entnommen wird, damit sie möglichst staubfrei ist. Unter Umständen muß sie vor Eintritt in die Lokomotivräume noch ein Staubfilter durchlaufen.

Da die Motoren infolge der Kapselung regensicher sind, liegt der Gedanke nahe, den Motorraum der Lokomotiven unmittelbar mit der Außenluft in

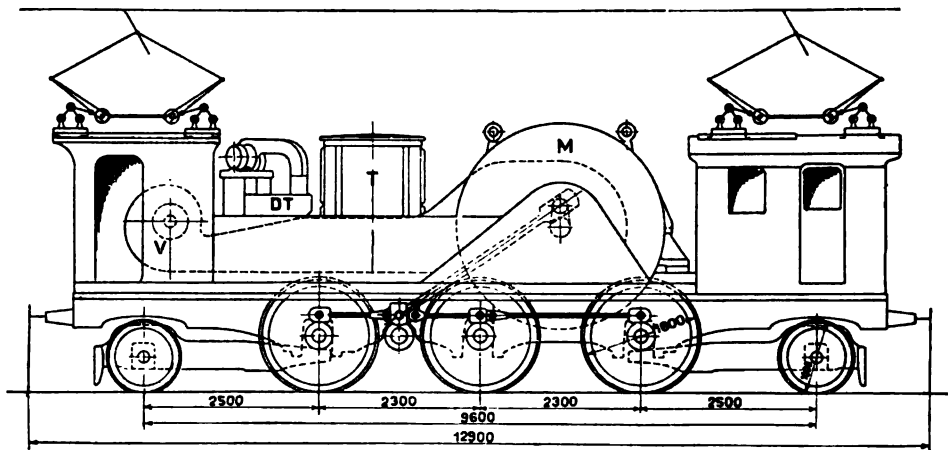


Fig. 175.

Verbindung zu bringen. Auf diese Weise entstehen Anordnungen, wie sie in Fig. 174 (halboffene Bauart) und in Fig. 175 (ganz offene Bauart) dargestellt sind.

Beide Bauformen sind von den Siemens-Schuckertwerken entwickelt worden und sind für den Betrieb auf der preußischen Staatsbahn bestimmt.

### 27. Der Stromabnehmer.

Als Stromabnehmer wird im Vollbahnbetrieb ausnahmslos der aus dem Straßenbahnbetrieb bekannte Schleifbügel verwendet, allerdings in einer Form, die den besonderen Verhältnissen des Hochspannungsbetriebes angepaßt ist.

Die Schnellbahnversuche auf der Strecke Berlin—Zossen haben gezeigt, daß für die höchsten Geschwindigkeiten — 200 km und darüber — der Schleifbügel eine durchaus sichere Stromzuführung gewährleistet. Rollenstromabnehmer können bei größeren Geschwindigkeiten aus leicht begreiflichen Gründen nicht in Betracht kommen.

Die eigentliche Stromabnahme vermittelt ein Aluminiumbügel, welcher entweder massiv ist, oder Längsnuten zur Aufnahme von Schmierfett besitzt. Das zu diesem Zwecke verwendete Aluminium erhält einen geringen Kupferzusatz (etwa 6%), wodurch es eine gewisse Härte erlangt und wodurch gleichzeitig der Vorteil erreicht wird, daß die Bügeloberfläche blank bleibt, im Gegensatz zum reinen Aluminium, dessen Oberfläche oxydiert, wodurch ein hoher Übergangswiderstand entsteht. Es bilden sich infolgedessen an der Übertrittsstelle des Stromes kleine Lichtbögen, die den Bügel und den Fahr-

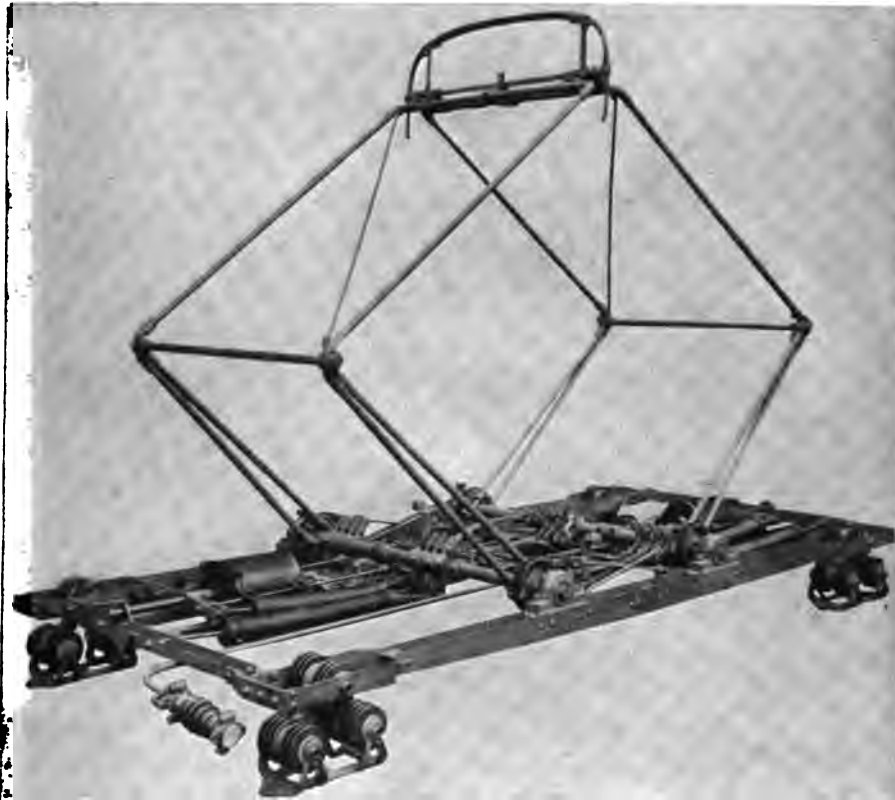


Fig. 176.

draht angreifen. Außerdem wirkt das Aluminiumoxyd (Tonerde) schleifend auf den Fahrdraht.

Die Lebensdauer des Fahrdrahtes und des Bügels wird also durch den Kupferzusatz wesentlich erhöht. Nach den bisherigen Erfahrungen beträgt diese für den Bügel bei Personen- und Schnellzugsbetrieb etwa 10 000 km, bei Güterzugsbetrieb etwa 8500 km<sup>1</sup>).

Der Aluminiumbügel selbst wird am Stromabnehmer durch Schrauben befestigt.

<sup>1</sup>) Z. d. V. D. I. 1911, S. 1913.

Der Stromabnehmer wird in drei Formen ausgeführt, nämlich als Scherenabnehmer, Bügelabnehmer und in vereinzelt Fällen als Rutenabnehmer.

Als Ausführungsbeispiel für den am häufigsten verwendeten Scherenstromabnehmer diene Fig. 176.

Der Stromabnehmer ruht auf einem von vier Hochspannungs-Isolatorböcken getragenen Rahmen; die Isolation ist dabei eine doppelte und wird durch Rillenisolatoren gebildet. Auf dem Rahmen sind zwei die Scherenhebel tragende Wellen gelagert, die durch einen verschränkten Kettenantrieb derart miteinander verbunden sind, daß sich beide stets im entgegengesetzten Sinne um den gleichen Winkel drehen müssen. An den Scherenhebeln sind zwei

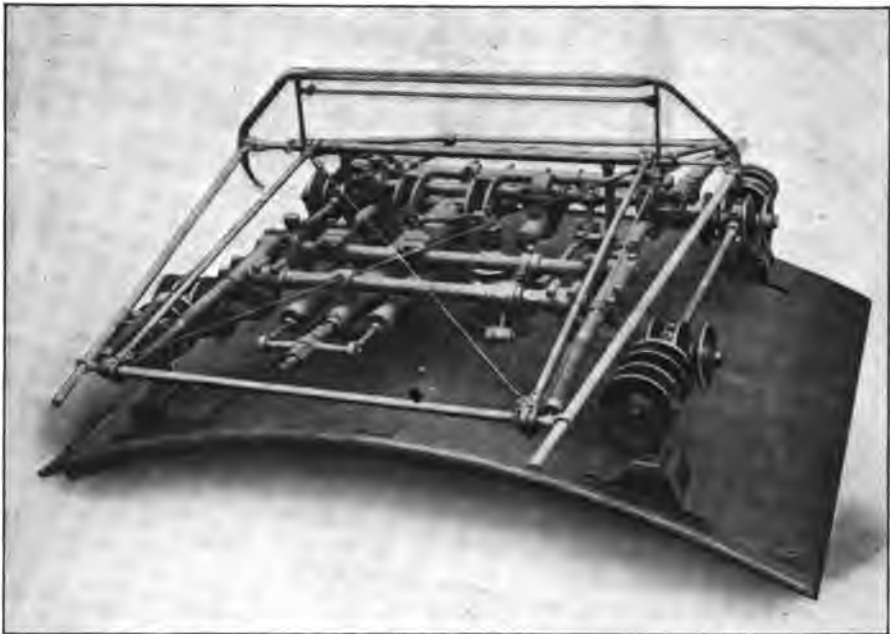


Fig. 176a.

oben durch Gelenke verbundene, aus Rohren hergestellte Rahmen drehbar befestigt und auf diesen sitzt der eigentliche Schleifbügel, und zwar so, daß er für sich allein federn kann. In der Ruhelage steht er senkrecht; bei der Fahrt stellt er sich schräg nach hinten. Beim Wechsel der Fahrtrichtung schlägt er von selbst auf die andere Seite um. Wegen seiner geringen Masse folgt er den kleinen Unregelmäßigkeiten des Fahrdrahtes sehr schnell. Bei größeren Höhenunterschieden federt das ganze Scherengestell. Der Scherenrahmen wird durch Druckluftzylinder aufgerichtet, die vom Führerstand aus gesteuert werden. Diese Zylinder sind in dem isolierten Rahmen untergebracht, so daß die beim Aufrichten des Stromabnehmers tätigen Kräfte in diesem Rahmen ausgeglichen sind. Die Isolatoren werden also auf diese Weise entlastet.

Durch die vorgehenden Kolben der Zylinder werden Spiralfedern gespannt, welche vermittelt Ketten und Scheiben die Scherenwellen zu drehen suchen.



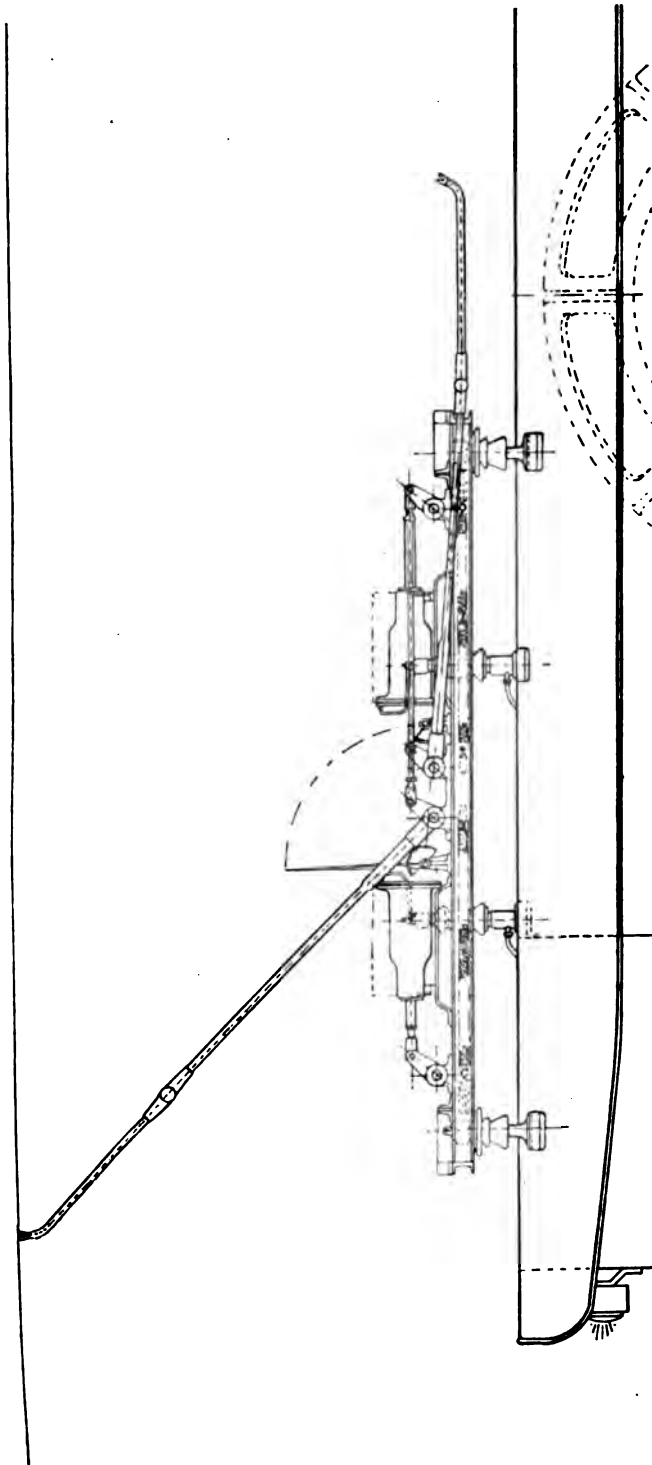


Fig. 177.

Diese Scheiben sind so geformt, daß der Anpressungsdruck des Bügels in allen Höhenlagen möglichst gleich — etwa 3 bis 4 kg — ist. In der Ruhestellung liegt der Schleifbügel tief und die Scherenrahmen sind hierbei zusammengeklappt, so daß die Rahmen wagerecht liegen.

In dieser Lage wäre es infolge des kleinen Hebelarms nicht möglich, den Stromabnehmer allein durch die Luftdruckzylinder aufzurichten. Um dies zu ermöglichen, sind besondere Aufwurffedern vorhanden, die von den Luftzylindern betätigt werden.

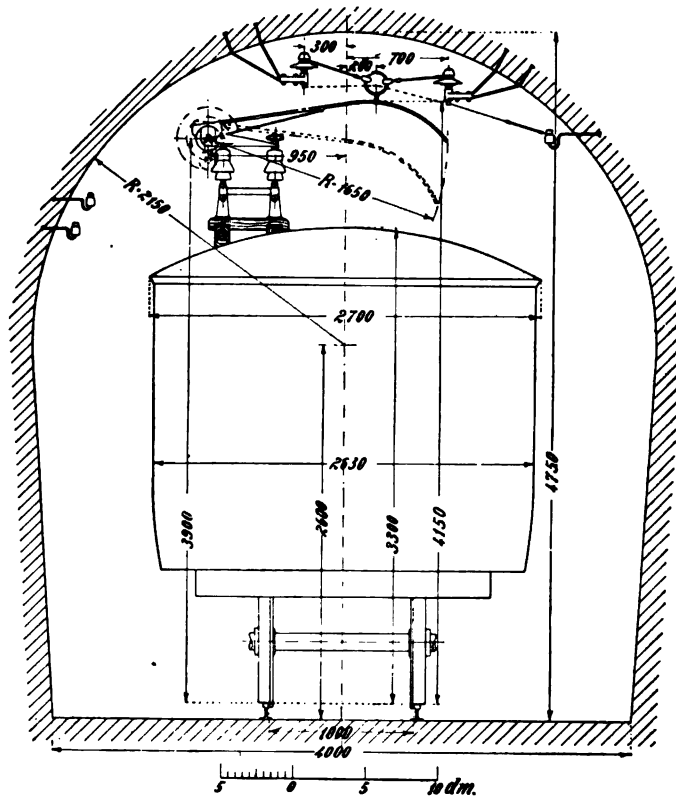


Fig. 178.

Weil die Luftzylinder unter elektrischer Spannung stehen, ist in die Luftleitung ein mit Rillen versehenes Porzellanrohr eingeschaltet.

Da nun Preßluft erst dann durch den motorisch angetriebenen Verdichter erzeugt werden kann, wenn die Lokomotive unter Spannung steht, muß für die erste Inbetriebsetzung und für die Inbetriebnahme nach längeren Pausen dafür gesorgt werden, daß auf anderem Wege Druckluft erzeugt werden kann. Diesem Zweck dient eine Handluftpumpe, die in der Lokomotive untergebracht ist. Eine etwas andere Form des Scherenstromabnehmers zeigt Fig. 176a nach einer Ausführung von Brown, Boveri & Cie. Die Abbildung erläutert sich von selbst.

Einen Bügelstromabnehmer zeigt Fig. 177. Jedes Stromabnehmergestell trägt zwei Stromabnehmer, von denen je einer für die Vorwärtsfahrt und die anderen für die Rückwärtsfahrt dienen. Auch diese Stromabnehmer werden durch Druckluft betätigt, und zwar werden die Stromabnehmer selbsttätig umgestellt, wenn der Führer den Fahrtrichtungsschalter im Motorstromkreis wendet. Zum Ausgleich des Luftdruckes, der den Stromabnehmer vom Fahrdraht wegzudrücken bestrebt ist, sind Windflügel vorgesehen, die so auf die Welle des Rahmens einwirken, daß sie den Stromabnehmer an den Fahrdraht pressen.

Bedingung für die Benutzung dieser beiden beschriebenen Stromabnehmer ist die, daß der Fahrdraht über dem Gleis hängt.

Die Maschinenfabrik Oerlikon hat nun für solche Fälle, wo aus irgendwelchen Gründen der Fahrdraht neben dem Gleis aufgehängt werden muß, den sog. Rutenstromabnehmer ausgebildet, dessen Wirkungsweise sich aus der Fig. 178 ergibt.

Die Stromabnehmerrute schwingt um eine Welle, auf die eine Spiralfeder so einwirkt, daß die Rute an den Fahrdraht gepreßt wird, wobei sich für die Lage des Fahrdrahtes ein großer Spielraum ergibt. —

Die Zahl der für eine Lokomotive zu verwendenden Stromabnehmer richtet sich zunächst nach der Stromstärke, die das Schleifstück mit Sicherheit führen kann. Wie bereits in Abschnitt 19 erwähnt, beträgt dieser Strom 100 Ampere, so daß also bei 15 000 Volt Betriebsspannung bei Lokomotivleistungen bis zu 1500 KW ein Stromabnehmer genügen würde.

Indessen wird man aus Gründen der Betriebssicherheit für dieses wichtige Glied der Lokomotive zweckmäßig zwei Stromabnehmer einbauen, soweit es die räumlichen Verhältnisse erlauben.

## 28. Transformatoren und Motoren.

1. Die Frage, ob Transformatoren mit Luft- oder Ölkühlung für den Vollbahnbetrieb wirtschaftlicher sind, kann nur auf Grund langjähriger Betriebserfahrungen, die bisher noch nicht vorliegen, entschieden werden. Die von deutschen Firmen gebauten Lokomotiven sind durchweg mit ölgekühlten Transformatoren ausgerüstet, während die Maschinenfabrik Oerlikon bei den von ihr erbauten großen Löttschbergbahn-Lokomotiven auch mit Luftkühlung der Transformatoren gute Erfahrungen gemacht hat.

Es ist zuzugeben, daß der Ölkessel und die Ölfüllung das Gewicht der Lokomotive erhöht und dadurch ihren Wirkungsgrad herabsetzt. Auf der anderen Seite beansprucht aber auch die unbedingt erforderliche künstliche Kühlung der Trockentransformatoren durch Preßluft eine bestimmte Leistung, durch welche ebenfalls der Gesamtwirkungsgrad der Lokomotive herabgesetzt wird. Allerdings sind die in beiden Fällen aufzuwendenden Leistungen verhältnismäßig klein, so daß sie nicht allein für die Wahl der einen oder der anderen Bauart maßgebend sein können. Dagegen spricht für die Verwendung des Öltransformators unbedingt die Tatsache, daß dieser größere Überlastungen eher verträgt als der luftgekühlte Transformator. Der Grund hierfür liegt in der bedeutenden Wärmeaufnahmefähigkeit des Öls.

Die Ableitung der in den Transformatorwicklungen erzeugten Wärme erfolgt aber um so schneller, je tiefer die Öltemperatur selbst ist. Das Öl muß demnach die aufgenommene Wärme schnell abgeben können, was dadurch erreicht wird, daß der Ölkessel Kühlrippen erhält. In einigen Fällen ist auch eine künstliche Ölumlaufrückführung in der Weise durchgeführt worden, daß das warme Öl durch eine Flügelpumpe aus dem Transformatorölkessel abgesaugt, durch außerhalb der Lokomotive verlaufende Rohrleitungen gepreßt und dann in abgekühltem Zustande dem Ölkessel wieder zugeführt wird.

Die Niederspannungswicklung des Transformators besitzt Anzapfungen, um dem Motor durch Vermittlung geeigneter Schalter verschiedene Betriebsspannungen zuführen zu können.

Auch der für die Heizung, Beleuchtung, Steuerung und für den Betrieb des Luftverdichters erforderliche Strom wird zumeist dem Haupttransformator entnommen, und zwar entweder durch Anzapfungen der Niederspannungsspule oder aus einer besonderen zweiten Niederspannungsspule. —

Besonderer Wert bei der Anordnung der Wicklungen ist auf deren Sicherung gegen mechanische Beanspruchungen durch die bei Überlastungen auftretenden großen Kräfte elektrodynamischen Ursprungs zu legen; sie müssen durch besondere Versteifungen in ihrer Lage unverrückbar fest gehalten werden. Fig. 179 stellt einen Öltransformator der Siemens-Schuckertwerke dar.

2. Über die Anordnung der Motorwicklungen ist bereits im I. Kapitel ausführlich gesprochen worden.

Über den mechanischen Aufbau des Motors ist folgendes zu bemerken. Zunächst ist einer vorzüglichen Luftführung durch die Anordnung möglichst zahlreicher Luftkanäle Rechnung zu tragen. Die Luft muß die Möglichkeit haben, zu allen Teilen der Ständer- und Läuferwicklung zu gelangen. Dabei wird der Läufer zweckmäßig mit besonderen Lüftungsflügeln ausgerüstet, welche die Luft in der Richtung der Achse durch den Motor treiben. Grundsätzlich ist dabei die Luft so zu führen, daß sie an der dem Kollektor abgewandten Motorseite eintritt und am Kollektor austritt, so daß die vom Luftstrom mitgerissenen Kohleteilchen der Bürsten nicht in das Innere des Motors gelangen können.

Den scharfen Anforderungen entsprechend, die an den Bahnmotor gestellt werden, muß er eine besonders hohe Widerstandsfähigkeit und Festigkeit sowohl in mechanischer wie auch in elektrischer Hinsicht besitzen. Besonders wichtig ist diese Forderung für alle Lokomotiven, die nur mit einem Motor, also ohne Antriebsreserve, ausgerüstet sind. Diese Festigkeit kann aus Gründen der Gewichtersparnis nur durch hochwertige Baustoffe (z. B. Stahlguß für das Gestell des Ständers) erreicht werden.

Daneben ist zu fordern, daß der Motor in allen seinen Teilen leicht zugänglich ist, um etwa nötig werdende Ausbesserungen schnell bewirken zu können.

Die Technik ist heutzutage im Bau von Motoren für die im Vollbahnbetrieb in Betracht kommenden Spannungen so weit fortgeschritten, daß Betriebsstörungen durch Beschädigungen der elektrischen Teile des Motors, wie die Erfahrung auch lehrt, so gut wie ausgeschlossen erscheinen. Der Motor besitzt außerdem nur wenige, dem Verschleiß ausgesetzte Teile durch deren Ab-

nutzung Betriebsstörungen zu erwarten sind, nämlich Bürsten, Kollektor und die Lager.

Was nun zunächst den Kollektor anbelangt, so zeigt die Erfahrung<sup>1)</sup>, daß dieser erst nach durchschnittlich 30 000 km Fahrt einer Nacharbeitung bedarf. Dieses sehr günstige Ergebnis wird dadurch erreicht, daß man dem Läufer geringes Spiel — etwa 2 bis 2,5 mm nach jeder Seite — gibt, wodurch eine auf die ganze Kollektorbreite gleichmäßig verteilte Abnutzung durch die schleifenden Bürsten erzielt wird.

Um ferner die Abnutzung der Bürsten beobachten zu können, sind die Bürstenhalter an einem drehbaren Ring befestigt, durch welchen auch die unten liegenden Bürsten nach oben gebracht werden können.

Es sei hier bemerkt, daß nach den bisherigen Beobachtungen<sup>2)</sup> der Bürstenverschleiß im Mittel etwa 0,5  $\mathcal{L}$  für ein Lokomotivkilometer beträgt;

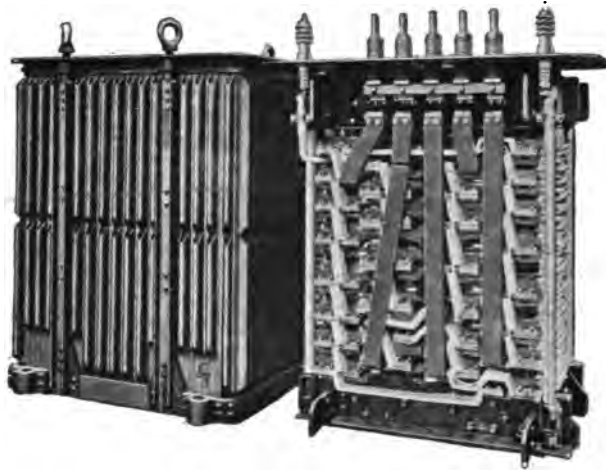


Fig. 179.

teilweise sind indessen bedeutend geringere Werte festgestellt worden, die bis 0,1  $\mathcal{L}$  herabgingen. —

Von größtem Einfluß auf die Betriebssicherheit der Lokomotive ist die Lagerung des Motors.

Bei dem geringen Spielraum zwischen Läufer und Ständer ist darauf Rücksicht zu nehmen, daß der Ständer dem Verschleiß der Lager entsprechend zentriert werden kann; man erreicht dies dadurch, daß man zwischen den Füßen und Auflagern des Ständers Keile und Druckschrauben anordnet.

Gegen das Heißlaufen der Lager kann man sich durch Schmelzsicherungen schützen, welche im ungeschmolzenen Zustand eine Lärmvorrichtung sperren.

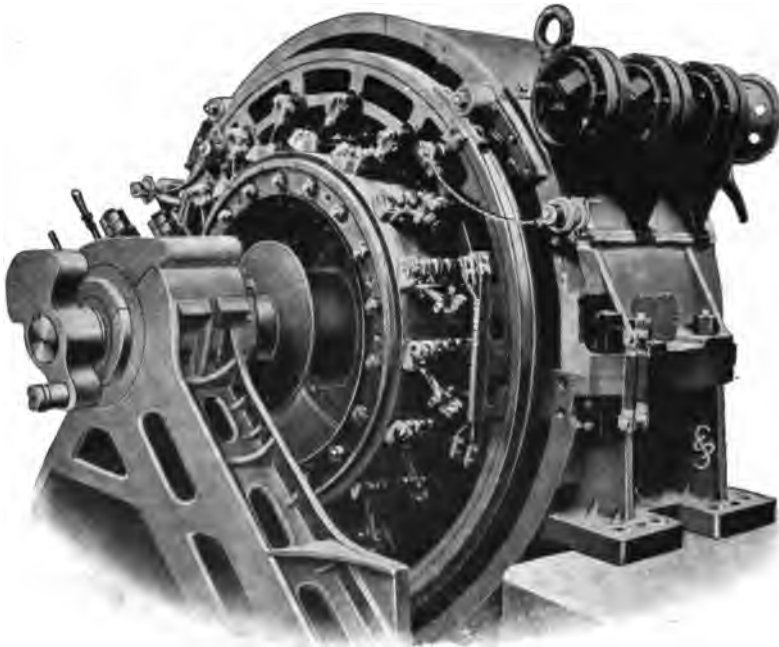
Damit ferner die Lagerschalen leicht erneuert werden können, wird der Ständer zweiteilig ausgeführt, so daß dessen obere Hälfte abgehoben werden kann. Der freiliegende Anker kann dann aus den Lagerschalen gehoben werden.

<sup>1)</sup> E. T. Z. 1913, S. 373.

<sup>2)</sup> Z. V. d. I. 1911, S. 1913 ff.

Wenn der Motor durch eine Triebstange auf eine Blindwelle arbeitet, muß darauf geachtet werden, daß die Motorwelle und Blindwelle genau parallel liegen. Das läßt sich zweckmäßig dadurch erreichen, daß beide Wellen in einem kräftigen, starren Stahlgußformstück gelagert werden, das mit dem Lokomotivrahmen starr verbunden wird. Läufer und Ständer sind demnach unabhängig voneinander gelagert.

Die Ansicht eines nach diesen Grundsätzen aufgebauten Bahnmotors der Siemens-Schuckertwerke von 1700 PS Stundenleistung bei 400 minutlichen Umdrehungen zeigt Fig. 180. Man erkennt die oben beschriebene Lagerung der Motorwelle, ferner den Bürstenring. Außerdem ist auf



*Fig. 180.*

dem Ständer ein Umschalter angebracht, der zur Umkehr der Fahrtrichtung dient.

Fig. 181 zeigt einen 250 PS-Motor der Maschinenfabrik Oerlikon in Ansicht und Schnitt. Dieser Motor ist mit der Zahnradvorgelegewelle zu einem starren Ganzen vereinigt. Er besitzt im Gegensatz zu dem Motor der Siemens-Schuckertwerke ausgeprägte Pole (vgl. Abschnitt 4).

Den Ständer eines 1000 PS-Motors der gleichen Firma zeigt Fig. 214. Der dazu gehörige Läufer ist in Fig. 157 abgebildet. Der Ständer trägt verteilte Erreger- und Ausgleichswicklungen.

Der Aufbau der Repulsionsmotoren zeigt keine wesentlichen Abweichungen von der beschriebenen Motorbauart. Die Einrichtungen für die Bürstenverschiebung, wie sie beim Déri-Motor erforderlich ist, sind in Kapitel V näher beschrieben.

Zu erwähnen ist schließlich noch die von den Maffei-Schwartzkopffwerken ausgeführte Bauart eines Motors mit zwei Kollektoren und zwei Wicklungen, die über die Kollektoren in Reihe geschaltet sind. Der Vorteil dieser Anord-

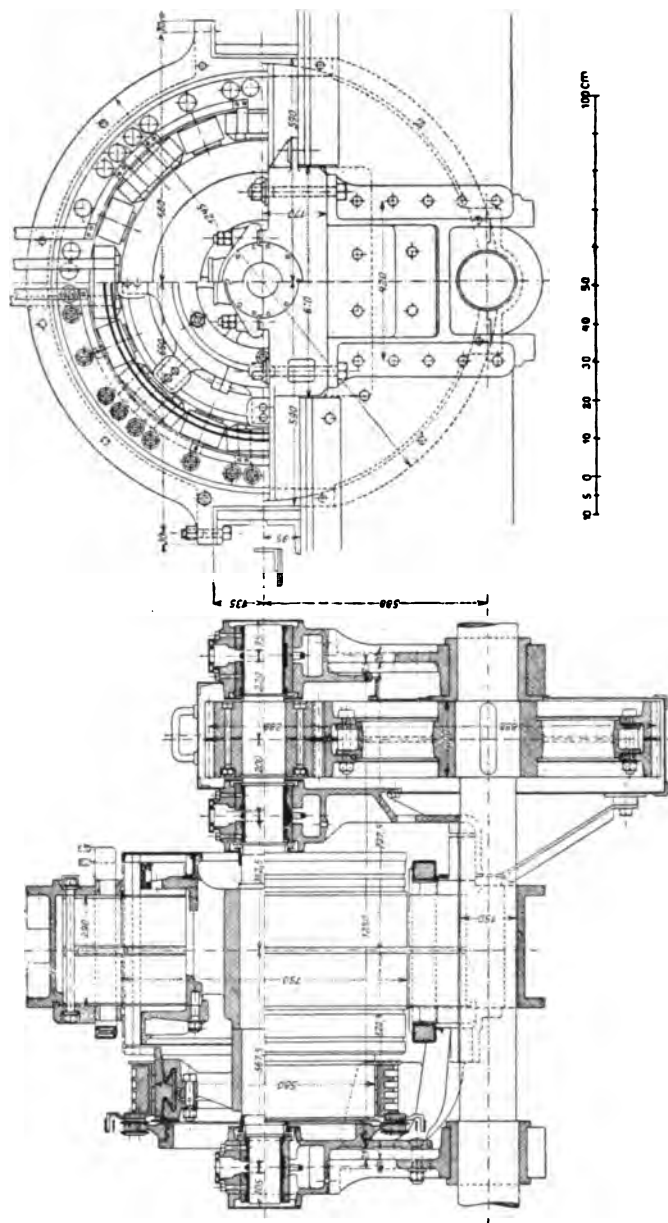


Fig. 181.

nung, über welche in dem unten angeführten Aufsätze<sup>1)</sup> nähere Angaben gemacht sind, besteht darin, daß ein derartiger Motor nur den halben Strom führt gegenüber einem Motor gleicher Leistung mit nur einem Kommutator.

<sup>1)</sup> E. T. Z. 1913, S. 867.

Zipp, Vollbahnlokomotiven.

Infolgedessen fallen die Schaltapparate leichter aus und die Betriebssicherheit der Schalteinrichtung gewinnt.

Die Bauart des Bahnmotors ist von großem Einfluß auf die induktiven Störungen von Schwachstromleitungen, die der Bahn entlang verlaufen. Wenn auch die Wellenzahl des Wechselstroms so niedrig gewählt wird, daß die

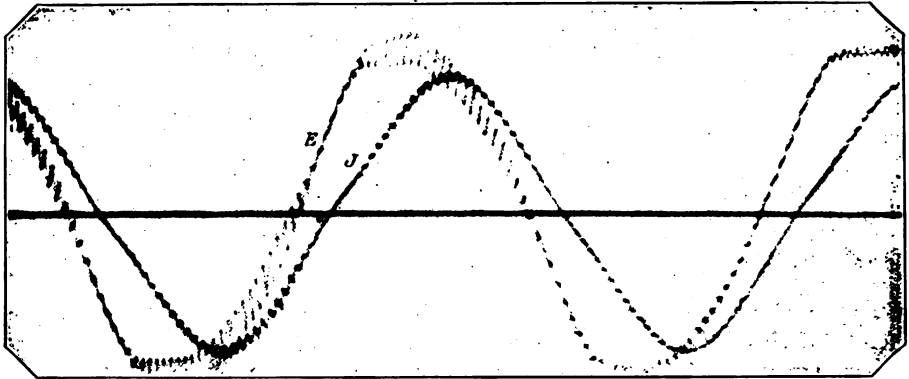


Fig. 182.

induzierten Schwingungen unterhalb der Gehörgrenze bleiben, so treten doch unter Umständen bei laufendem Motor Oberschwingungen hoher Wellenzahl auf, welche induktiv auf die Schwachstromleitungen übertragen werden und deren Betrieb empfindlich beeinträchtigen können. Bereits im Jahre 1904

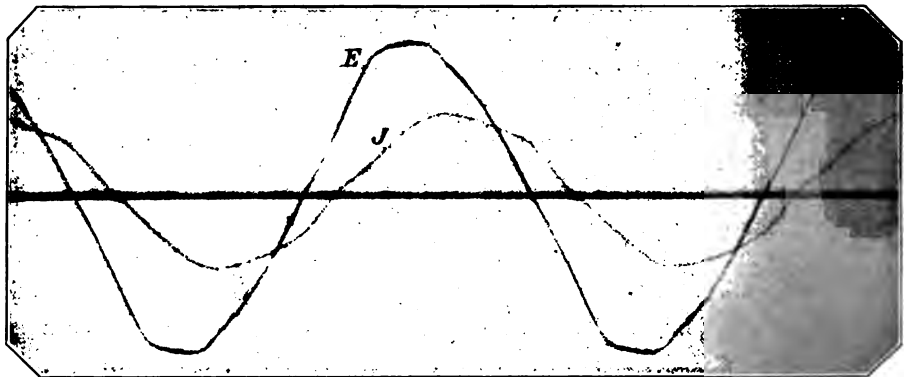


Fig. 183.

wurden seitens der Maschinenfabrik Oerlikon (Behn-Eschenburg) diese Induktionswirkungen eingehend untersucht, wobei sich die Tatsache herausstellte, daß die störenden Oberschwingungen auf Schwingungen des magnetischen Flusses, hervorgerufen durch die offenen Ankernuten, zurückzuführen sind. Die Störungen wurden sehr verringert, nachdem man die Anker mit offenen Nuten durch solche mit geschlossenen Nuten ersetzte, bei denen gleichzeitig die Nuten schräggestellt waren.



Aus den Schaulinien in Fig. 182 und 183 ist dieser Einfluß der Motorbauart auf die Entstehung von Oberschwingungen deutlich zu erkennen. Fig. 182 zeigt die Strom- und Spannungswellen nach oszillographischen Aufnahmen bei Verwendung eines Motors mit offenen Nuten, Fig. 183 die entsprechenden Wellen bei Verwendung eines Läufers mit geschlossenen schräggestellten Nuten.

Ein weiteres Mittel zur Verkleinerung dieser Oberschwingungen besteht darin, daß man statt der ausgeprägten Pole verteilte Polwicklungen verwendet.

Nach diesen Grundsätzen sind sämtliche neueren Bahnmotoren gebaut.

### 29. Die Einrichtungen zur Regelung von Zugkraft und Fahrgeschwindigkeit.

Für diese Regelung kommen abgesehen von der Änderung der Bürstenstellung beim Déri-Motor für den Vollbahnbetrieb zwei Möglichkeiten in Betracht, nämlich die Verwendung von Stufentransformatoren oder von Zusatztransformatoren.

Letztere können mit festen oder verdrehbaren Wicklungen (Induktionsregler) ausgestattet sein.

a) Stufentransformatoren.

Die Sekundärwicklung des Transformators ist mit einer der

Zahl der gewünschten Spannungsstufen entsprechenden Zahl von Abzweigungen versehen. Soll nun die Motorspannung geändert werden, so muß der Anschluß des Motors von der einen nach der anderen Abzweigung verlegt werden, ähnlich wie der bekannte Zellschalter im Akkumulatorenbetrieb den Netzanschluß von der einen zur nächsten Schaltzelle verlegt. Ebenso wie beim Zellschalter beim Übergang von einer zur anderen Schaltzelle ein Kurzschluß der abzuschaltenden Zelle eintritt, so tritt auch beim Stufentransformator beim Übergang von der einen zur nächsten Stufe ein Kurzschluß der zwischen den beiden Abzweigungen liegenden Transformatorabteilung auf, den man in ähnlicher Weise, wie es beim Zellschalter bekannt ist, durch Schaltwiderstände begrenzen kann.

An einigen Beispielen soll der Schaltvorgang erläutert werden. In Fig. 184 ist *T* der Haupttransformator, *A* eine Drosselspule, die als Spannungsteiler wirkt, und *M* der Motor. Es sei zunächst Schalter *a* und *m* geschlossen, so daß *M* die volle Transformatorspannung erhält. Um die Spannung ohne Stromunterbrechung zu erniedrigen, wird *b* eingeschaltet und *m* geöffnet; jetzt ist die Windungsabteilung, welche zwischen *a* und *b* liegt, durch *A* geschlossen; darauf wird *a* geöffnet und *n* eingeschaltet, so daß nunmehr *M* unter der der Abzweigung *b* entsprechenden Spannung steht.

Bei Verwendung von zwei Motoren ist die in Fig. 185 dargestellte Schaltung anwendbar. Die beiden Transformatoren liegen vermittelt der Leitung *o* an

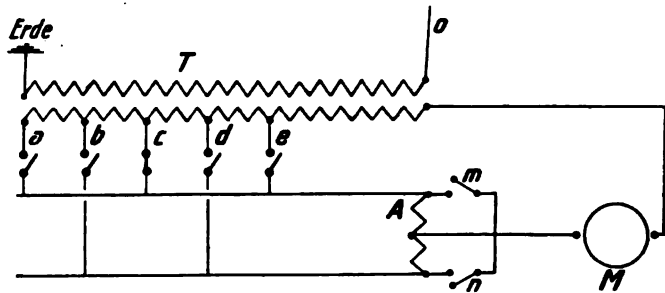


Fig. 184.

der Oberleitung;  $R$  ist ein Schaltwiderstand. Beim Übergang von der niedrigsten Schaltstufe  $a$  resp.  $a'$  zur nächst höheren  $b$  resp.  $b'$  ergeben sich folgende Zwischenschaltungen.

1. Stufe:  $a$   $a'$  geschlossen,  $R$  stromlos, beide Motoren haben gleiche Spannung.

2. Stufe:  $a$  offen,  $a'$  geschlossen; Strom fließt aus Stufe  $a'$  des Transformators  $T_2$  unmittelbar in den Motor  $M_2$  und über  $R$  und  $m$  nach  $M_1$ . Die Spannung an  $M_1$  ist um den Abfall in  $R$  kleiner als die an  $M_2$  herrschende.

3. Stufe:  $a'$  und  $b$  eingeschaltet. Motor  $M_1$  bekommt Strom aus  $T_1$  und ebenso Motor  $M_2$  über  $R$  und  $m$ . Jetzt ist die Spannung an Motor  $M_2$  kleiner als die an  $M_1$  herrschende. Außerdem fließt ein Kurzschlußstrom aus  $T_1$  über  $b$ ,  $R$ ,  $a'$  und  $m$ , der durch  $R$  begrenzt wird.

4. Stufe:  $a'$  offen,  $b'$  eingeschaltet. Jeder Motor erhält jetzt die gleiche, den eingeschalteten Abteilungen  $b$  und  $b'$  entsprechende Spannung und  $R$  ist stromlos.

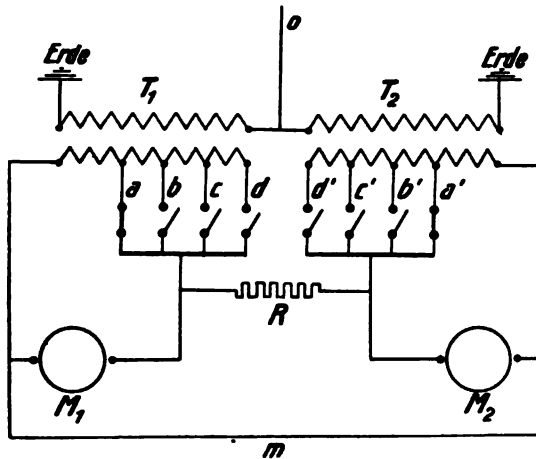


Fig. 185.

b) Induktionsregler.

Das Bestreben, die Änderung der Motorspannung nichtsprunghaft, sondern allmählich zu bewirken, führte zur Verwendung der sog. Induktionsregler, als welche man Transformatoren mit drehbarer Primär- oder Sekundärspule bezeichnet.

Über die Wirkungsweise derartiger Drehtransformatoren ist bereits in Abschnitt 8 ausführlich gesprochen worden, so daß es hier genügt, auf ihre Schaltung näher einzugehen. In Fig. 186 wird die gesamte Lei-

stung für den Betrieb des Motors  $M$  aus dem festen Transformator  $T$  und aus dem mit  $T$  hintereinandergeschalteten Drehtransformator  $D$  entnommen. Die Sekundärspule von  $D$  ist drehbar gedacht und ihre Spannung  $E'_2$  vergrößert entweder je nach ihrer Stellung  $E_2$  oder verkleinert sie. Die Motorspannung kann also innerhalb der Grenzen  $E_2 - E'_2$  und  $E_2 + E'_2$  ganz allmählich verändert werden.

Soll beispielsweise die Spannung im Verhältnis 1:2 änderbar sein, so muß  $E_2 - E'_2 = \frac{1}{2} (E_2 + E'_2)$  sein, daher ergibt sich die Zusatzspannung  $E'_2$  zu  $\frac{1}{3} E_2$ , und da ferner in beiden Sekundärwicklungen der gleiche Strom fließt, ist auch die Leistung von  $D$  ein Drittel von  $T$ .

Aus den Erörterungen in Abschnitt 8 geht hervor, daß bei Schrägstellung der Sekundärspule von  $D$  gegenüber der Primärspule sich nur ein Anteil der sekundären magnetomotorischen Kraft mit der primären verkettet, während der andere Anteil ein Streufeld erzeugt, das eine Phasenverschiebung

zwischen  $E_2'$  und  $i_2$  hervorruft und auch die Phasenverschiebung im primären Stromkreise vergrößert. Um diesem Übelstande abzuhelpfen, sind verschiedene Mittel vorgeschlagen worden, von denen als Beispiel das folgende erläutert werden soll.

Die Phasenverschiebung wächst um so mehr, je mehr sich der Verdrehungswinkel dem Werte  $90^\circ$  nähert, da in diesem Falle die magnetische Verkettung immer kleiner wird, so daß die sekundäre magnetomotorische Kraft vorwiegend ein Streufeld erzeugt. Dieses Streufeld kann man dadurch vernichten, daß man es auf eine kurzgeschlossene Spule transformatorisch wirken läßt. In Fig. 187 ist die grundsätzliche Anordnung eines Induktionsreglers im Schnitt dargestellt; 1—1 ist die feststehende primäre Spule und 2—2 die drehbare sekundäre Spule. Senkrecht zu 1—1 ist im Ständer des Reglers die kurzgeschlossene Spule  $K$ — $K$  angeordnet, welche ebenso wirkt wie die kurzgeschlossene Ausgleichsspule des direkt gespeisten Reihenschlußmotors: das Streufeld wird durch sekundäre Rückwirkung bis zu demjenigen

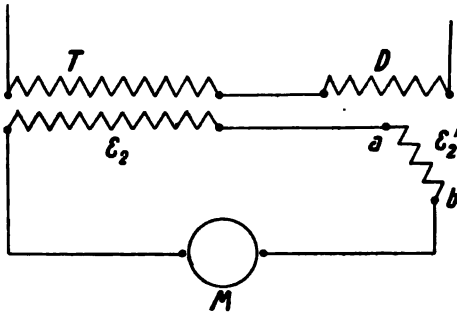


Fig. 186.

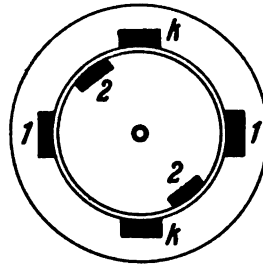


Fig. 187.

Betrage vernichtet, der nötig ist, um die für die Bestreitung der in  $KK$  auftretenden Spannungsabfälle erforderliche EMK zu induzieren. Dagegen kann die primäre Wicklung 1—1 nicht induktiv auf  $KK$  einwirken.

Wenn der Drehtransformator große Sekundärströme zu führen hat, wie sie im Vollbahnbetrieb auftreten, so empfiehlt es sich, die Wicklungsanordnung insofern zu vertauschen, daß die Sekundärspule feststeht und die Primärspule gedreht wird.

Die Verwendung eines Induktionsreglers bringt immerhin eine nicht unbedeutliche Gewichtsvermehrung der elektrischen Lokomotiveinrichtung mit sich. Eine Verringerung dieses Gewichts läßt sich dadurch erreichen, daß man den Induktionsregler in Verbindung mit einem Stufentransformator benutzt, in welcher Anordnung der Regler dazu dient, einen allmählichen Übergang von einer zur anderen Schaltstufe zu bewirken.

Als Beispiel einer derartigen Anordnung diene Fig. 188.

Stufe 1. Die Abzweigungen  $a$  und  $d$  der Sekundärwicklungen der beiden Haupttransformatoren sind geschlossen und die Sekundärwicklung  $D$  des Drehtransformators ist so geschaltet, daß  $E_2$  gegen  $E_1$  gerichtet ist. Jeder Motor erhält die Spannung

$$e_1 = \frac{E_1 a + E_1 d - 2 E_2}{2}.$$

Stufe 2. Durch allmähliche Drehung von  $D$  um  $180^\circ$  elektrische Grade wächst die Motorspannung auf den Wert

$$e_2 = \frac{E_1 a + E_1 d + 2 E_2}{2}.$$

Stufe 3. Die Abzweigungen  $b$  und  $c$  werden eingeschaltet. Ein Kurzschlußstrom kann nicht entstehen, weil im Kurzschlußstromkreis  $a-b-c-d-D$  die elektromotorischen Kräfte gegengeschaltet sind. Hierbei ist Voraussetzung, daß die in den zwischen den Anschlüssen  $a-b$  resp.  $c-d$  auftretenden elektromotorischen Kräfte gleich denjenigen sind, die in den beiden Hälften der Sekundärwicklung  $D$  entstehen.

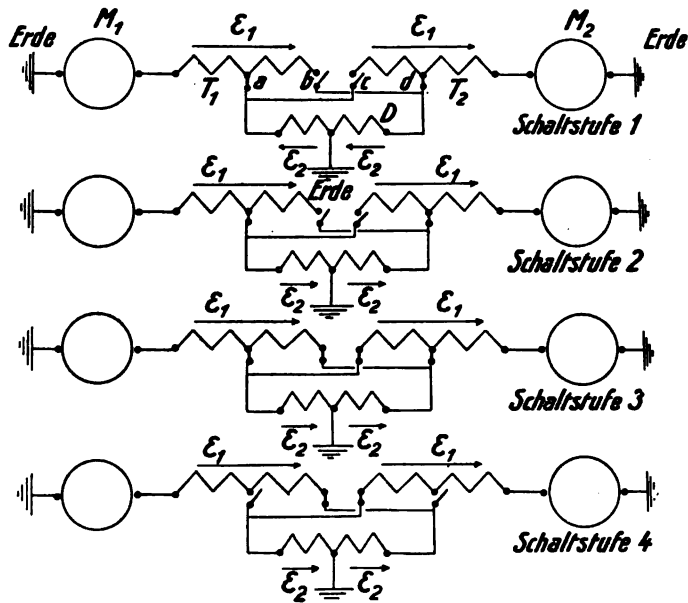


Fig. 188.

Stufe 4. Die Schalter  $a$  und  $d$  können jetzt funkenlos geöffnet werden. Da  $D$  noch in der Stellung der Stufe 3 steht, ist  $E_2$  der EMK  $E_1$  entgegengerichtet und die Motorspannung hat den Wert

$$e_3 = \frac{E_1 b + E_1 c - 2 E_2}{2} = e_2,$$

d. h. den gleichen Wert wie in Schaltstufe 3.

Durch allmähliche Verdrehung von  $D$  um  $180^\circ$  wird

$$e_4 = \frac{E_1 b + E_1 c + 2 E_2}{2}$$

usf.

In diesem Beispiel ist angenommen, daß die Leistung des Induktionsreglers  $\frac{1}{8}$  der Gesamtleistung der beiden Transformatoren darstellt. Dann ergibt sich durch diese Schaltung die Möglichkeit, die Spannung im Verhältnis 1:2 zu ändern.

Würde man drei Schaltstufen verwenden, so müßte, um den gleichen Regulierbereich zu beherrschen, der Induktionsregler  $\frac{1}{12}$  der Gesamtleistung beider Transformatoren besitzen, bei vier Schaltstufen  $\frac{1}{16}$  der Gesamtleistung usf.

Aber es ist nicht zu verkennen, daß die Verbindung eines Induktionsreglers mit einem Stufentransformator sehr verwickelte Schaltanlagen ergibt, ein Übelstand, der den an und für sich einfachen Regler nur sehr beschränkte Verwendung im Vollbahnbetrieb hat finden lassen.

c) Zusatztransformatoren mit feststehenden Wicklungen.

Die Verwendung eines derartigen Transformators in Verbindung mit einem Stufentransformator ist bereits in Fig. 117 dargestellt worden, auf die an dieser Stelle hingewiesen wird.

Der Vorzug dieser, dort bereits im wesentlichen beschriebenen Einrichtung beruht darin, daß der eigentliche Motorstromkreis keine Schalter besitzt. Die Motorspannung wird lediglich durch Veränderung der Primärspannung des Zusatztransformators geregelt.

Ein weiterer Vorzug ist darin zu erblicken, daß die Phasenverschiebung durch den Zusatztransformator in bedeutend geringerem Maße beeinflusst wird als durch den Induktionsregler.

Als Nachteil ist wieder die Gewichtsvergrößerung durch den Zusatztransformator zu bezeichnen.

Die überwiegend große Mehrzahl der Lokomotiven ist mit Stufentransformatoren ausgerüstet, wobei die Stufenschaltung durch elektromagnetisch gesteuerte Fernschalter, sog. Schützen, die in möglichst großer Nähe des Transformators untergebracht sind, betätigt wird. Hierbei ist zu beachten, daß diese Schützen zur Vermeidung von Kurzschlüssen nur in bestimmt vorgeschriebener Reihenfolge geschaltet werden können, was dadurch erreicht wird, daß sie sich gegenseitig sperren und entriegeln. Ausführungsbeispiele für derartige Schützenschaltungen finden sich in Kapitel V.

Die große Zahl der erforderlichen Schütze mit ihren verwickelten Sperrvorrichtungen veranlaßte in jüngster Zeit die Maschinenfabrik Oerlikon, dieses Steuerungssystem zu verlassen und bei ihrer großen Lötschberglokomotive, die 2500 PS leistet, die Stufenschaltung durch eine Schaltwalze großer Abmessungen zu bewirken. Nach den bisher vorliegenden Berichten hat sie mit dieser Anordnung, die bereits in den ersten Jahren des Vollbahnbetriebs bei Lokomotiven kleinerer Leistung Anwendung gefunden hatte (z. B. auf der Strecke Murnau—Oberammergau) günstige Erfahrungen gemacht. Der Stufentransformator ist dabei mit der Schaltwalze zu einem einheitlichen Ganzen zusammengebaut und die Bewegung der Schaltwalze geschieht durch eine elektromagnetisch gesteuerte Klinkenvorrichtung, der die Schaltwalze



Fig. 189.

mit einem plötzlichen Ruck von einer zur anderen Schaltstufe bewegt. Für die Stromunterbrechung bei diesem Übergang sind besondere, leicht auswechselbare Funkenziehstromschlußstücke vorgesehen<sup>1)</sup>.

Ein abschließendes Urteil über die Brauchbarkeit dieser Steuerungseinrichtung kann erst dann gefällt werden, wenn die erforderlichen Betriebs Erfahrungen vorliegen. —

Die Schützensteuerung, die bei den Lokomotiven der deutschen Eisenbahnverwaltung fast ausschließlich zur Anwendung gelangt ist, verlangt zu ihrer Betätigung eine Schaltvorrichtung, durch welche die verschiedenen Schaltstufen eingestellt werden können. Diese Vorrichtung wird durchweg in der bekannten Form des sog. Fahrschalters oder Kontrollers ausgeführt, dessen wesentliche Teile die Schaltwalze und die federnden Schleifstücke darstellen, die auf der Walze, durch Federdruck angepreßt, aufliegen.

Die innere Einrichtung eines solchen Fahrschalters zeigt Fig. 189. Die aus einem isolierenden Stoff hergestellte Schaltwalze, welche durch eine

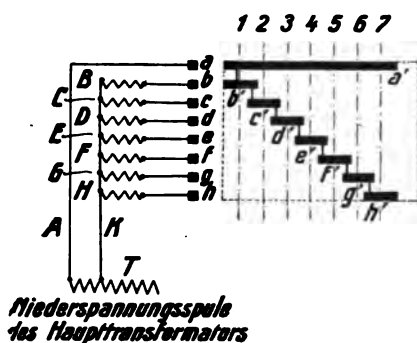


Fig. 190.

Hierin sind  $a, b, c$  usw. die feststehenden Schleiffedern, welche mit den Schalterspulen  $B, C, D$  usw. in Verbindung stehen. Letztere sind mit ihrer zweiten Klemme an die gemeinsame Leitung  $K$  angeschlossen, die mit Leitung  $A$  von einer Spannungsstufe des Haupttransformators  $T$  abzweigt.

Auf der Abbildung rechts neben der Reihe der Schleiffedern ist die Abwicklung der Schaltwalze mit ihren Stromschlußstücken dargestellt. Denkt man sich die Reihe der Schleiffedern  $a-h$  in die durch Linie 2 bezeichnete Lage gebracht, so geht ein Strom vom Transformator über  $a-a'-c'-c-C-K$  zum Transformator zurück.

Da nun der Motorstromkreis von jedem Führerstand aus gesteuert werden können muß, muß man entweder auf jedem Führerstand einen derartigen Controller einbauen, oder aber man stellt in der Mitte der Lokomotive einen einzigen Fahrschalter auf, dessen Walze von beiden Führerständen aus durch mechanische Übertragungsglieder gesteuert werden kann.

Die hier beschriebene Schützensteuerung bietet die Möglichkeit in dem Falle, daß mehrere Lokomotiven einen Zug zu schleppen haben, die Lokomotiven von einem einzigen Führerstand aus zu steuern.

<sup>1)</sup> Vgl. Abschnitt 37.

Zu diesem Zwecke werden gemäß der grundsätzlichen Skizze Fig. 191 die Schleiffedern *b—h* sämtlicher Fahrschalter im Zuge durch Leitungen parallel geschaltet, wobei die Fahrschalter der einzelnen Lokomotiven durch Steckvorrichtungen miteinander gekuppelt werden, so daß die Motoren aller Lokomotiven von jedem Fahrschalter aus gemeinsam gesteuert werden können. Voraussetzung hierfür ist natürlich, daß die gemeinsam zu steuernden Lokomotiven gleiche Schalteinrichtungen besitzen. Man bezeichnet diese Schaltanordnung als Vielfachsteuerung und den zur gemeinsamen Schaltung benutzten Fahrschalter als Meisterwalze.

Von einer Beschreibung der einzelnen Teile der Schalteinrichtung kann an dieser Stelle abgesehen werden, weil in den folgenden Abschnitten die Beschreibung ausgeführter Lokomotiven Gelegenheit bietet, auch auf die Ausführung der einzelnen Teile einzugehen.

Es möge an dieser Stelle nur noch bemerkt werden, daß bei der Bemessung der magnetisierenden Wicklungen der Schaltschützen darauf zu achten ist, daß diese auch bei verminderter Spannung —  $\frac{2}{3}$  der richtigen — noch mit Sicherheit ansprechen.

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, daß in einzelnen Fällen auch Druckluftbetrieb der Einzelschalter zur Anwendung gelangt ist.

### 30. Die Luftdruckbremse und der Sandstreuer.

Von den beiden Bremssystemen, der Luftleer- und Luftdruckbremse, ist das letztere allgemein in Deutschland eingeführt. Dieses läßt sich wieder in zwei Gruppen zerlegen, je nachdem die Druckluft nur auf eine Seite oder auf die beiden Seiten des Bremskolbens wirkt. Im ersteren Falle ist die Bremse

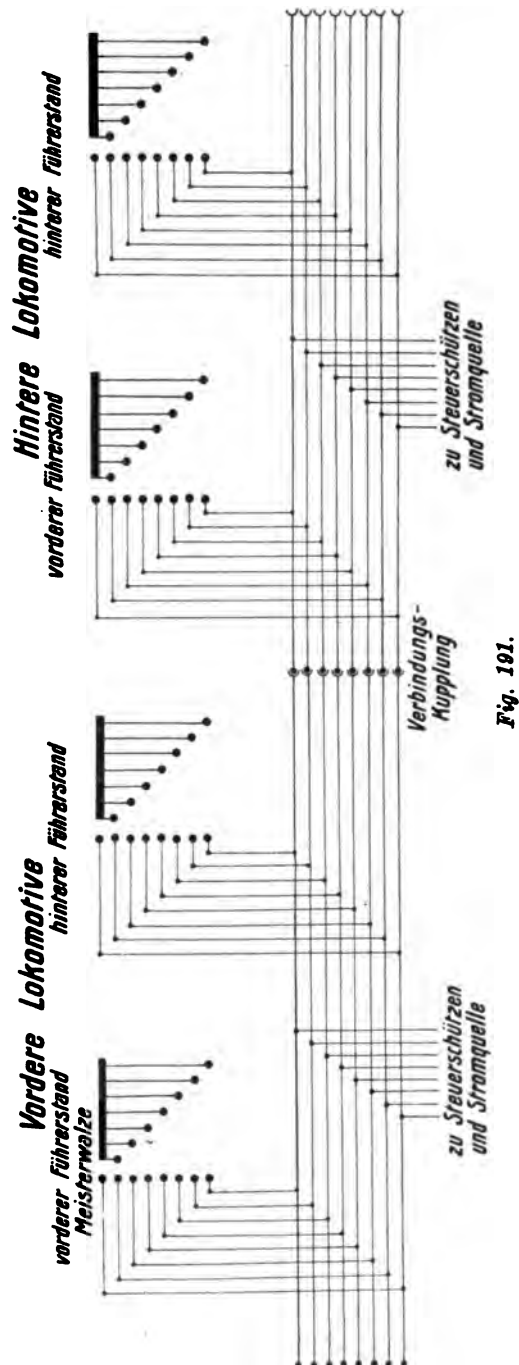


Fig. 191.

eine Einkammerbremse, im letzteren Falle eine Zweikammerbremse. Zur ersten Gattung gehören die Bremsen nach der Bauart Westinghouse und Knorr.

Nachstehend soll die Knorr-Bremse in ihrer Wirkungsweise und Anordnung kurz beschrieben werden.

Gemäß dem Leitungsplan Fig. 192 erzeugt ein elektrisch angetriebener Verdichter Druckluft, die eine Rohrleitung mit Rückschlagventil durchfließt und in einem Hauptluftbehälter aufgespeichert wird. Nachdem in diesem Behälter der Luftdruck auf 8 Atm. gestiegen ist, wird der Verdichter vom Führerstand aus abgestellt, oder ein durch den Luftdruck gesteuerter Schalter besorgt selbsttätig seine Abschaltung. Durch eine weitere Rohrleitung steht der Hauptluftbehälter mit den beiden Führerbremsventilen, die in den beiderseitigen Führerständen untergebracht sind, in Verbindung. Dieses Ventil steht wieder mit der Hauptleitung in Verbindung, welche vermittelt der Schlauchkupplungen, die auf der Abbildung links und rechts sichtbar sind, an die durch den ganzen Zug laufende Hauptleitung angeschlossen werden kann. Aus dieser Leitung tritt die Druckluft in die sog. Hilfsluftbehälter ein, um von hier aus durch ein Steuerventil in den eigentlichen Bremszylinder zu gelangen.

Wie gemäß der Abbildung die Lokomotive, so ist auch jeder bremsbare Wagen mit Preßluftbehälter, Steuerventil und Bremszylinder ausgerüstet.

Die Wirkung dieser Einrichtung ist nun folgende.

Nachdem die Lokomotive mit dem Zug gekuppelt ist, läßt der Führer aus dem Hauptluftbehälter durch das Führerbremsventil Druckluft in die Hauptleitung ausströmen.

Die Steuerventile stehen zunächst so, daß die Druckluft aus der Hauptleitung in die sämtlichen Hilfsluftbehälter geleitet wird. Durch die Ausdehnung der Preßluft sinkt dabei ihr Druck auf 5 Atm., und zwar herrscht dieser Druck sowohl in der ganzen Hauptleitung als auch in den Hilfsluftbehältern.

Sobald nun der Führer das Bremsventil so einstellt, daß Druckluft aus der Hauptleitung entweicht, werden durch die nun eintretende Druckminderung in der Hauptleitung sämtliche Steuerventile so umgeschaltet, daß sie Druckluft aus den Hilfsluftbehältern in den Bremszylinder leiten, dessen Kolben hierdurch vorwärts bewegt wird. Die Stärke der so erzeugten Bremswirkung richtet sich nach der Größe der Druckminderung in der Hauptleitung; der Führer kann daher die Bremsen mit größerer oder geringerer Kraft anziehen, je nachdem er mehr oder weniger Luft aus der Leitung ausströmen läßt. Die gesamte Druckminderung bei Betriebsbremsungen beträgt etwa 1 Atm. Bei einer plötzlichen starken Druckminderung in der Hauptleitung, also z. B. bei Notbremsungen, öffnen die Steuerventile noch besondere Kanäle, durch welche nicht nur aus den Hilfsluftbehältern, sondern auch aus der Hauptleitung Luft in die Bremszylinder strömt.

Nach erfolgter Bremsung werden die Bremsen dadurch gelöst, daß der Führer wieder aus dem Hauptluftbehälter Druckluft in die Hauptleitung strömen läßt. Durch den zunehmenden Druck in dieser Leitung werden sämtliche Steuerventile wieder so umgeschaltet, daß die vorhergehende Verbindung zwischen Hilfsluftbehältern und Bremszylindern aufgehoben wird. Die Hilfs-



luftbehälter werden wieder mit der Hauptleitung in Verbindung gebracht, während die Bremszylinder mit der Außenluft in Verbindung treten. Dadurch entweicht die in ihnen vorhandene Druckluft und eine Feder zieht den Kolben aus der Bremsstellung zurück.

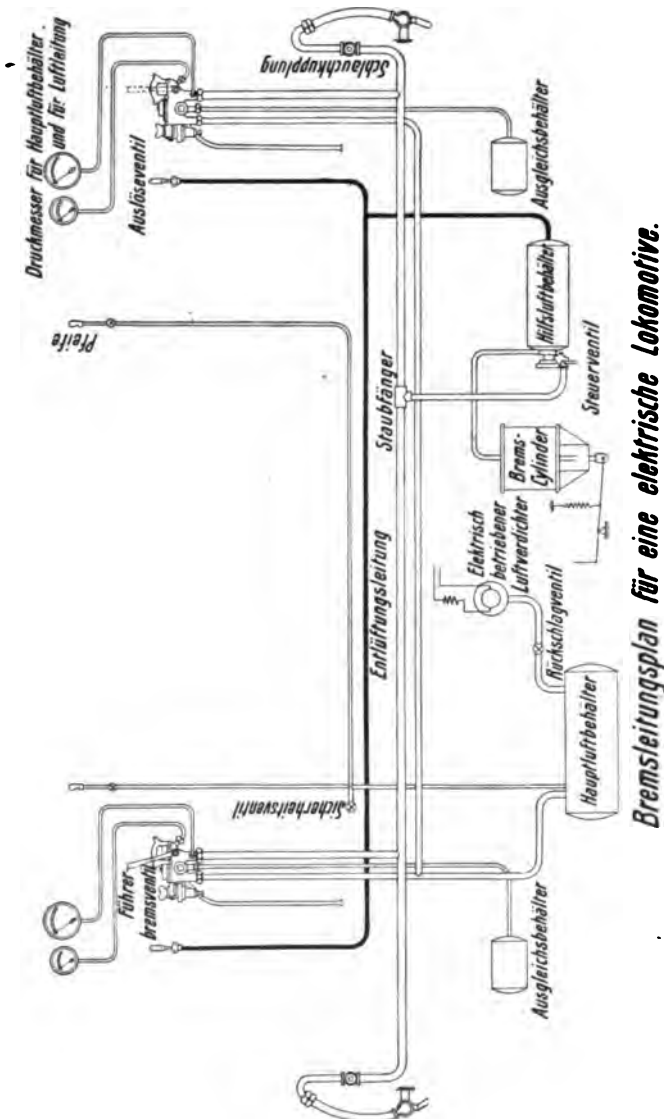


Fig. 192.

Um nun die Lokomotivbremse für sich, unabhängig von den Wagenbremsen lösen zu können, ist nach der Abbildung eine besondere Entlüftungsleitung vorgesehen; außerdem ist das Führerbremsventil noch mit einem Ausgleichsbehälter in Verbindung, dessen Zweck in folgendem besteht.

Bei unmittelbaren Druckänderungen in der Hauptleitung können Luftdruckwellen in dieser entstehen, wodurch unter Umständen die bereits be-

tätigten Bremsen wieder gelöst werden, so daß schädliche Stöße auftreten. Diese Schwierigkeit wird dadurch behoben, daß der Führer bei gewöhnlichen Betriebsbremsungen die Druckänderung zunächst in dem Ausgleichsbehälter, dessen Inhalt stets gleich bleibt, erzeugt. Diese Druckänderung wird dann selbsttätig durch das Führerbremsventil auf die Hauptleitung übertragen.

Schließlich ist noch aus der Abbildung eine vom Hauptluftbehälter abzweigende Leitung ersichtlich, durch welche die Signalpfeifen angeblasen werden können.

Die eigentliche Bremsvorrichtung ist in Fig. 193 dargestellt, und zwar in zwei verschiedenen Bauarten, je nachdem der Hilfsluftbehälter mit dem Bremszylinder zusammengebaut ist oder nicht. Aus dieser Abbildung ist ferner zu ersehen, wie durch die in den einzelnen Wagen angebrachten Notbremsventile die zur Bremsung des ganzen Zuges erforderliche Druckminderung in der Hauptleitung hergestellt wird.

Es möge noch darauf hingewiesen werden, daß diese Druckminderung auch dann selbsttätig eintritt, wenn eine Kupplung im Zuge reißt. Denn in diesem Falle reißt auch die Schlauchverbindung der Hauptleitung, so daß beide getrennte Zugteile infolge der plötzlichen Druckabnahme in der Hauptleitung gebremst werden. —

Eine Lokomotive kann bei Anfahrt eine um so größere Anzugskraft entwickeln, je größer der Widerstand gegen gleitende Reibung zwischen Rad und Schiene ist. Man erhöht diesen, der für gewöhnlich etwa  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{8}$  beträgt, dadurch, daß man vor die Räder in der Anfahrriichtung Sand auf die Schienen streut, auf einen Höchstwert von etwa  $\frac{1}{2}$ .

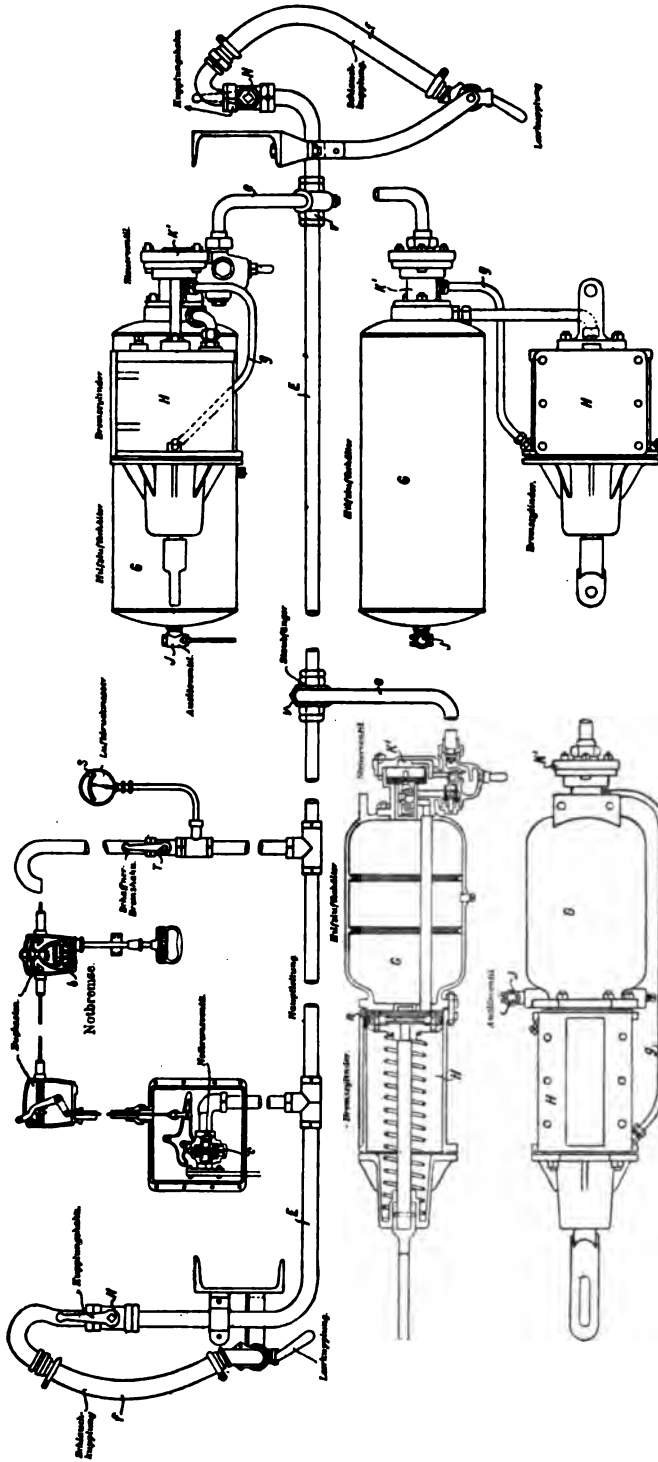
Dieser Zweck wird aber nur dann erreicht, wenn der Streusand durch Dampf oder Druckluft unmittelbar an die Berührungsstelle zwischen Rad und Schiene geschleudert wird.

Auf einer elektrischen Lokomotive steht stets Druckluft in dem Hauptluftbehälter zur Verfügung, so daß sich die Möglichkeit bietet, die Sandstreuvorrichtung durch Druckluft zu betreiben. Besonders zweckmäßig ist die Bauart des Knorr-Preßluftsandstreuers, der kurz beschrieben werden soll.

Sein wichtigster Bestandteil ist eine Streudüse, die durch ein besonderes Ventil von den Führerständen aus betätigt werden kann und durch welche vermittelt der Druckluft nach der bekannten Ejektorwirkung der Streusand aus dem Sandbehälter in das Sandfallrohr getrieben wird. Ein Teil der Druckluft wird unmittelbar vor Eintritt in die Düse abgezweigt und tritt in den Sandbehälter ein, den in ihm enthaltenen Sand aufwühlend, so daß der saugenden Streudüse stets feinverteilter Sand zuströmt.

Erste Bedingung für die zuverlässige Wirkung des Sandstreuers ist, daß der Sand vollkommen trocken ist. Um dies zu erreichen, versieht man in häufigen Fällen den Vorratskasten mit einer elektrischen Heizvorrichtung.

Anordnung der Knorr-Bremse an Wagen.



Getrennte Bauart.

Vereinigte Bauart.

Fig. 193.

### 31. Die Sicherheits- und Meßvorrichtungen.

Der in die Lokomotive eingeführte hochgespannte Wechselstrom macht besondere Vorkehrungen nötig, um das Leben der Bedienungsmannschaft zu schützen. Das ist auf einer elektrischen Lokomotive ganz besonders nötig, weil der eine Pol der Hochspannungsanlage geerdet ist, so daß die Berührung des anderen Poles besonders gefährlich ist, weil der Berührende auf dem Potential der Erde steht.

Diese Sicherheitsvorkehrungen bestehen abgesehen von der vorzüglichen Isolation aller hochspannungsführenden Teile, die bei der Betriebsspannung von 15 000 Volt mit vollkommener Zuverlässigkeit ausführbar ist, in folgendem.

1. Wie bereits in Abschnitt 27 erwähnt wurde, wird der Stromabnehmer durch Luftdruck aufgerichtet, wobei in die Preßluftleitung ein isolierendes Zwischenstück eingeschaltet ist.

2. Für den Fall, daß der Stromabnehmer noch die Leitung berührt, kann eine Besteigung des Lokomotivdaches dadurch vermieden werden, daß die Besteigungsleiter durch Luftdruck oder elektrisch verriegelt ist, so daß ihr Verschluß so lange nicht gelöst werden kann, als noch Luft in den Druckzylindern des Stromabnehmers ist oder solange dieser noch unter Spannung steht. Oder es wird durch die an bestimmten Stellen des Lokomotivdaches einhängbare Leiter ein Warnungssignal ausgelöst, solange noch Druckluft in den Druckzylindern sich befindet. Schließlich kann durch die Leiter ein Ventil geöffnet werden, durch welches die Preßluft aus dem Stromabnehmer entweicht, so daß er niedersinkt.

3. Der Verschluß des die Hochspannungsteile enthaltenden Raums wird elektrisch oder durch Luftdruck so verriegelt, daß dieser erst geöffnet werden kann, wenn der Stromabnehmer niedergelassen ist und daß der Stromabnehmer erst dann wieder aufgerichtet werden kann, wenn der Hochspannungsraum wieder geschlossen ist.

4. Die Lebensgefahr, die dadurch entstehen könnte, daß infolge eines Spannungsdurchschlags Hochspannung aus der primären Transformatorwicklung in die Niederspannungsstromkreise eintritt, wird dadurch wirksam vermieden, daß die Niederspannungswicklung der Transformatoren mit dem Lokomotivgestell einpolig in Verbindung steht, so daß also diese Wicklung ständig geerdet ist.

5. Der zur Unterbrechung des hochgespannten Stroms dienende Hauptausschalter wird durch elektromagnetische Fernsteuerung betätigt.

Eine zweite Gruppe von Sicherheitsvorrichtungen dient dem Zwecke, die elektrische Lokomotiveinrichtung vor Betriebsstörungen zu schützen.

1. Zunächst erhält jede Lokomotive eine Blitzschutzvorrichtung, bestehend aus Drosselspule, Hörnerableiter und Erdungswiderstand in der durch Fig. 194 dargestellten Schaltung.

Die Drosselspule hat den Zweck, die auf die Lokomotive aufprallenden Überspannungswellen, deren Entstehung in den meisten Fällen auf elektro-atmosphärische Vorgänge zurückzuführen ist, zurückzuwerfen. Sie überbrücken dann die Hörnerfunkenstrecke und gelangen über den Widerstand zur Erde. Durch diesen Widerstand wird der der Entladung nachfolgende

Betriebsstrom gedämpft, der an der Hörnerfunkenstrecke einen Lichtbogen erzeugt. Dieser Lichtbogen steigt infolge seiner eigenen Wärmeentwicklung und infolge elektrischer Kraftwirkungen an den Hörnern in die Höhe, wird länger und länger, bis er endlich abreißt, wodurch der Ausgleichsvorgang beendet ist.

In neuester Zeit hat man auch den Versuch gemacht, die Hochspannungswicklung des Transformators gegen Durchschläge infolge von Überspannungswellen dadurch zu schützen, daß man ihr einen Kondensator parallel schaltet.

2. Gegen übermäßiges Ansteigen der Stromstärke im Hochspannungsstromkreise, verursacht durch Kurzschlüsse oder durch zu große Belastung der Lokomotive, schützt eine selbsttätige Auslösung des Hauptschalters im Hochspannungsstromkreise durch Vermittlung eines sog. Höchststrom-Verzögerungsrelais, dessen grundsätzliche Schaltung in Fig. 195 dargestellt ist. Der Hochspannungsstrom  $i_1$  fließt durch die Leitung  $HH$  über den Stromwandler  $T$  und über den Schalter  $S$ . Steigt  $i_1$  über das zulässige Maß, so ist der vom Sekundärstrom  $i_2$  in  $T$  umflossene Relaismagnet  $m_1$  imstande, die Federkraft  $f_1$  zu überwinden und den Anker  $a_1$  anzuziehen.

Die Bewegung von  $a_1$  wird dabei durch die Luftbremse  $b$  oder eine ähnlich wirkende Verzögerungseinrichtung verlangsamt. Nach bestimmter Zeit wird bei  $c$  ein Stromschluß hergestellt, so daß der am Hauptschalter angebrachte Auslösemagnet  $m_2$  vom Strome durchflossen wird. Dieser aus den Klemmen  $g$  entnommene Auslösestrom kann entweder niedergespannter Wechselstrom sein, der ja auf der Lokomotive zur Verfügung steht, oder Gleichstrom, der einer besonderen Akkumulatorenbatterie oder einem Umformer entnommen wird. Sobald nun  $c$  geschlossen ist, wird  $a_2$  angezogen. Dadurch wird die Sperrung  $s$  gelöst und der Schalter  $S$  wird durch die beim Einschalten gespannte Feder  $f_2$  ausgeschaltet.

Die Verzögerungseinrichtung  $b$  hat hierbei folgenden Zweck. Die übermäßige Stromstärke wirkt dadurch schädlich, daß die Wärmeentwicklung im Transformator und in den Schaltapparaten zu groß wird. Dabei wird die Temperatur um so schneller steigen, je stärker jener Überstrom ist und die Gefährdung wird um so größer sein, je länger der Überstrom fließt. Diesen Umständen trägt das Relais  $m_1 a_1$  dadurch Rechnung, daß der Stromschluß bei  $c$  um so schneller hergestellt wird, je größer die Zugkraft von  $m_1$ , je größer also  $i_2$  und  $i_1$  ist.

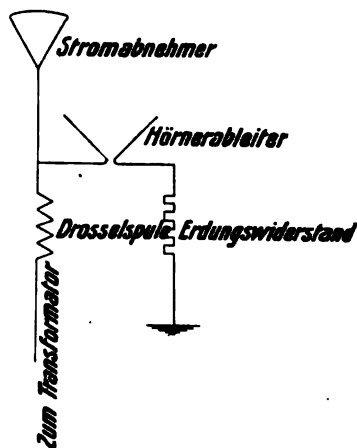


Fig. 194.

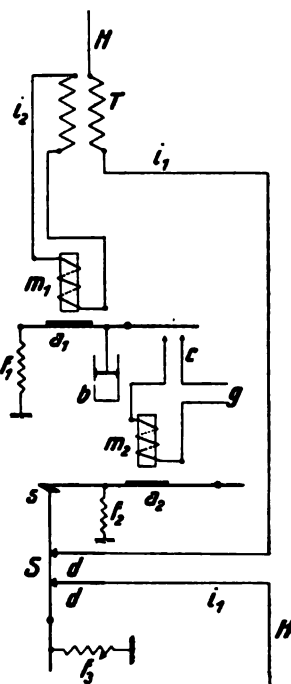


Fig. 195.

Kurzdauernde Überströme, welche keinen Schaden anrichten können, werden den Kontakt  $c$  nicht zur Schließung bringen können, da sie schon abgelaufen sind, ehe der Schalter  $a_1$ , durch  $b$  verlangsamt, in die Endstellung gelangt ist. Nach Ablauf des Stromstoßes zieht ihn die Feder  $f_1$  wieder in die Ruhelage zurück.

Neben dieser Höchststromausschaltung erhält der Hauptölschalter meistens noch eine Nullstromauslösung, die dann in Wirkung tritt, wenn die Oberleitung spannungslos ist.

3. Beim plötzlichen Einschalten großer Transformatoren treten freie Stromschwingungen auf, die, allmählich abklingend, sich über den Betriebsstrom lagern und die unter Umständen so hoch ansteigen können, daß durch sie das Auslöserelais des Schalters zum Ansprechen gebracht wird. Man dämpft diese Schwingungen sehr wirksam dadurch, daß man einen sog. Stufenschalter wählt, dessen grundsätzliche Anordnung Fig. 196 zeigt.

Bevor der Schalthebel  $c$  in die Betriebsstellung  $a$  kommt, wird zunächst über  $b$  der Widerstand  $r$  eingeschaltet. Durch diesen Widerstand werden die freien Stromschwingungen begrenzt. Der Übergang des Schalters  $c$  von  $b$  nach  $a$  vollzieht sich ohne Unterbrechung.



Fig. 196.

4. Bei den verwickelten Schalteinrichtungen der elektrischen Lokomotiven ist in erster Linie zur Vermeidung von Stromüberlastungen und übermäßigen Funkenbildungen an den Schaltern dafür zu sorgen, daß keine fehlerhaften Schaltungen entstehen können. Dies wird dadurch erreicht, daß elektro-magnetische oder mechanische Sperrungen eine falsche Verbindung der Schaltvorrichtungen unmöglich machen. So kann beispielsweise der Fahrtrichtungsschalter erst dann gedreht werden, wenn der Fahrschalter auf Null steht, wenn also der Stromfluß im Motor und in der Niederspannungswicklung des Transformators unterbrochen ist.

Um ferner zu vermeiden, daß der Motor unter Spannung gesetzt werden kann, solange noch die Bremsen angezogen sind, kann der Hochspannungölschalter durch Luftdruck so verriegelt werden, daß er nur bei gelösten Bremsen eingeschaltet werden kann.

5. Die Betriebssicherheit einer elektrischen Lokomotive hängt ferner von dem dauernd guten Zustand der Motor- und Blindwellenlagerung ab, da, wie in Abschnitt 25 erläutert wurde, in den Antriebsgestängen stark schwankende Kräfte auftreten. Um eine unzulässige Temperaturerhöhung dieser Lager anzuzeigen, verwendet man Schmelzstöpsel aus leicht schmelzbarem Metall, welche in die Lager eingebettet sind, und deren Schmelzung dazu benutzt wird, um eine Alarmpfeife zum Ertönen zu bringen, die durch Preßluft betrieben wird. Der Schmelzpropfen sitzt dabei in einer Rohrleitung und sperrt die Verbindung zwischen Druckluftbehälter und Pfeife im festen Zustande.

6. Wenn sich auf der Lokomotive nur der Führer aufhält, so ist mit der Möglichkeit zu rechnen, daß, wenn ihm irgendein Unglück zustößt und er die Herrschaft über die Steuerung verliert, der ganze Zug gefährdet wird. Man kann sich gegen diese Gefahr auf folgende Weise schützen. Der Fahrschalter kann so gebaut sein, daß der Führer bei der Einschaltung die Kraft

einer sich spannenden Feder überwinden muß, welche die Kurbel selbsttätig in die Nullage zurückführt, wenn der Führer sie losläßt. Oder man kann im Handgriff der Kurbel eine Stromschlußvorrichtung für den Steuerstrom einbauen, durch welche letzterer selbsttätig unterbrochen wird, wenn der Führer den Handgriff losläßt, mit der Wirkung, daß der Motorstrom sofort ausgeschaltet wird. —

Jede elektrische Vollbahnlokomotive besitzt eine Anzahl von Meß- und Überwachungsrichtungen, die in erster Linie dem Zwecke dienen, den Führer über den einwandfreien Zustand der einzelnen Betriebsmittel zu unterrichten.

Zunächst ist im Führerstand ein Spannungs- und Strommesser untergebracht; zuweilen finden sich auch beide Instrumente in doppelter Anordnung, um die Ströme und Spannungen sowohl auf der Hochspannungs- wie auf der Niederspannungsseite messen zu können.

Der Anschluß der Meßinstrumente erfolgt unter Zwischenschaltung von Strom- und Spannungswandlern, wie sie aus der Hochspannungstechnik bekannt sind.

In vielen Fällen wird auch zur Messung der aufgenommenen elektrischen Leistung ein Leistungsmesser angeordnet, der zumeist aus dem Stromwandler der Hochspannungsseite und aus dem Spannungswandler der Niederspannungsseite gespeist wird. In allen Fällen wird dabei der Stromwandler zweckmäßig zwischen die Hochspannungswicklung des Transformators und Erde geschaltet, da in dieser Anordnung seine Primärwicklung nur einen geringen Spannungsunterschied gegen Erde besitzt.

Zu diesen Instrumenten treten unter Umständen noch weitere Strommesser für die Überwachung des Heizstromkreises und des Luftverdichters hinzu. Bei Lokomotiven mit mechanischer Steuerung kommen noch Zeigervorrichtungen hinzu, mittels deren der Führer die jeweilig eingestellte Schaltstufe erkennen kann.

Die Höhe des Luftdrucks im Hauptluftbehälter und in der Hauptbremsleitung zeigen zwei Druckmesser an, während die Fahrgeschwindigkeit an einem Geschwindigkeitsmesser beobachtet werden kann, der zuweilen mit einer Aufzeichnungsvorrichtung ausgestattet wird.

### **32. Die Heizung und Beleuchtung der Züge bei elektrischer Lokomotivförderung.**

Da die meisten auf elektrisch betriebenen Strecken verkehrenden Wagen auch auf solche Strecken übergehen, die mit Dampflokomotiven betrieben werden, muß die Dampfheizung beibehalten werden. Hierin liegt insofern eine gewisse Schwierigkeit für den elektrischen Betrieb, als die Lokomotiven einen besonderen, die Einheitlichkeit der elektrischen Einrichtung störenden Heizkessel mitführen müssen, wenn man auf die Einstellung eines besonderen Heizwagens verzichten will.

Für die Heizung des Kessels kommen zwei Möglichkeiten in Betracht, nämlich die Verwendung fester oder flüssiger Brennstoffe und die elektrische Wasserheizung. Letztere wird bei den neueren Lokomotivbauarten in Anwendung gebracht. Der Heizstrom wird dabei einer Spulengruppe des Haupt-

transformators zumeist mit 300 Volt entnommen und Heizkörpern zugeführt, welche unmittelbar im Wasser liegen können. Der Heizstrom wird vom Führerstand aus eingeschaltet.

Der Wasserstand im Heizkessel wird zweckmäßig durch einen selbsttätigen Speisewasserregler auf gleicher Höhe gehalten. Im übrigen läßt sich heute noch nicht sagen, welche Heizart die größere Wirtschaftlichkeit verbürgt; erst wenn die Ergebnisse einer Reihe von Betriebsjahren vorliegen, läßt sich ein endgültiges Urteil fällen.

Im günstigen Sinne spricht für die elektrische Zugheizung der Umstand, daß in den Wintermonaten wegen der niedrigen Außenwärme die Transformatoren sehr wirksam gekühlt werden, so daß sie bis zu einer gewissen Grenze die Mehrbelastung durch die Heizung ohne Vergrößerung ihrer Leistungsfähigkeit übernehmen können.

Die Führerstände der Lokomotive selbst werden durch elektrische Heizkörper von je etwa 1 kW Leistungsfähigkeit geheizt.

Für die Zugheizung und Beleuchtung kann man je nach den örtlichen klimatischen Verhältnissen für Mitteleuropa etwa 4 bis 6% der gesamten Zugbewegungsarbeit rechnen.

Für die Beleuchtung der Züge gilt dabei das gleiche, was über deren Heizung gesagt wurde. Für alle Wagen, welche von einer elektrisch betriebenen Strecke auf solche mit Dampfförderung übergehen müssen, muß die Gasbeleuchtung beibehalten werden.

Für die elektrische Beleuchtung der Züge wird der Lokomotivwechselstrom, der sich wegen der großen Spannungsschwankungen und der niedrigen Wellenzahl nicht zur unmittelbaren Speisung der Lampen eignet, vielfach in Gleichstrom umgeformt, wobei durch selbsttätige Regler unter Umständen in Gemeinschaft mit Akkumulatoren die Spannung auf gleichbleibender Höhe zu halten ist.



---

---

## V. Kapitel.

# Beschreibung ausgeführter Lokomotiven für einphasigen Wechselstrombetrieb.

### 33. Schnellzugslokomotive Bauart 2—B—1 der Siemens-Schuckertwerke.

Diese bereits in Fig. 160 dargestellte Lokomotive, die für den Betrieb auf der Strecke Dessau—Bitterfeld gebaut wurde, besitzt folgende Hauptabmessungen und Arbeitsgrößen:

Radstand der Triebräder . . . . .	3,0 m
Radstand des Drehgestells . . . . .	2,2 m
Triebraddurchmesser . . . . .	1600 mm
Laufraddurchmesser . . . . .	1000 mm
Länge der Lokomotive über die Puffer gemessen . . . . .	12,5 m
Gesamter Radstand . . . . .	9,0 m
Größte Breite der Lokomotive . . . . .	3,05 m
Gesamtgewicht der Lokomotive . . . . .	74 t
Gewicht des mechanischen Teils . . . . .	45,5 t
Gewicht der elektrischen Ausrüstung . . . . .	28,5 t
Reibungsgewicht . . . . .	33 t
Achsdruck der Triebachsen je . . . . .	16,4 t
Achsdruck der Drehgestellachsen je . . . . .	13 t
Achsdruck der Laufachse . . . . .	14,7 t
Zuglast bei 100 km Geschwindigkeit . . . . .	240 t
Größte Geschwindigkeit . . . . .	110 km
Anfahrzugkraft . . . . .	7000 kg

Wie der in Fig. 197 dargestellte Schaltplan der Lokomotive zeigt, besitzt diese eine vereinigte Schützen- und Drehtransformatorsteuerung. Diese wirkt in der Weise, daß vom Führerstand aus der Antriebsmotor des Drehtransformators gesteuert wird, wobei durch eine zwangläufig mit diesem Transformator gekuppelte Schaltwalze die 3 Stufen des Haupttransformators nach und nach selbsttätig eingeschaltet werden. Der Führer hat also nichts anderes zu tun, als den Schalter des erwähnten Antriebsmotors so lange geschlossen zu halten, bis die gewünschte Fahrgeschwindigkeit erreicht ist.

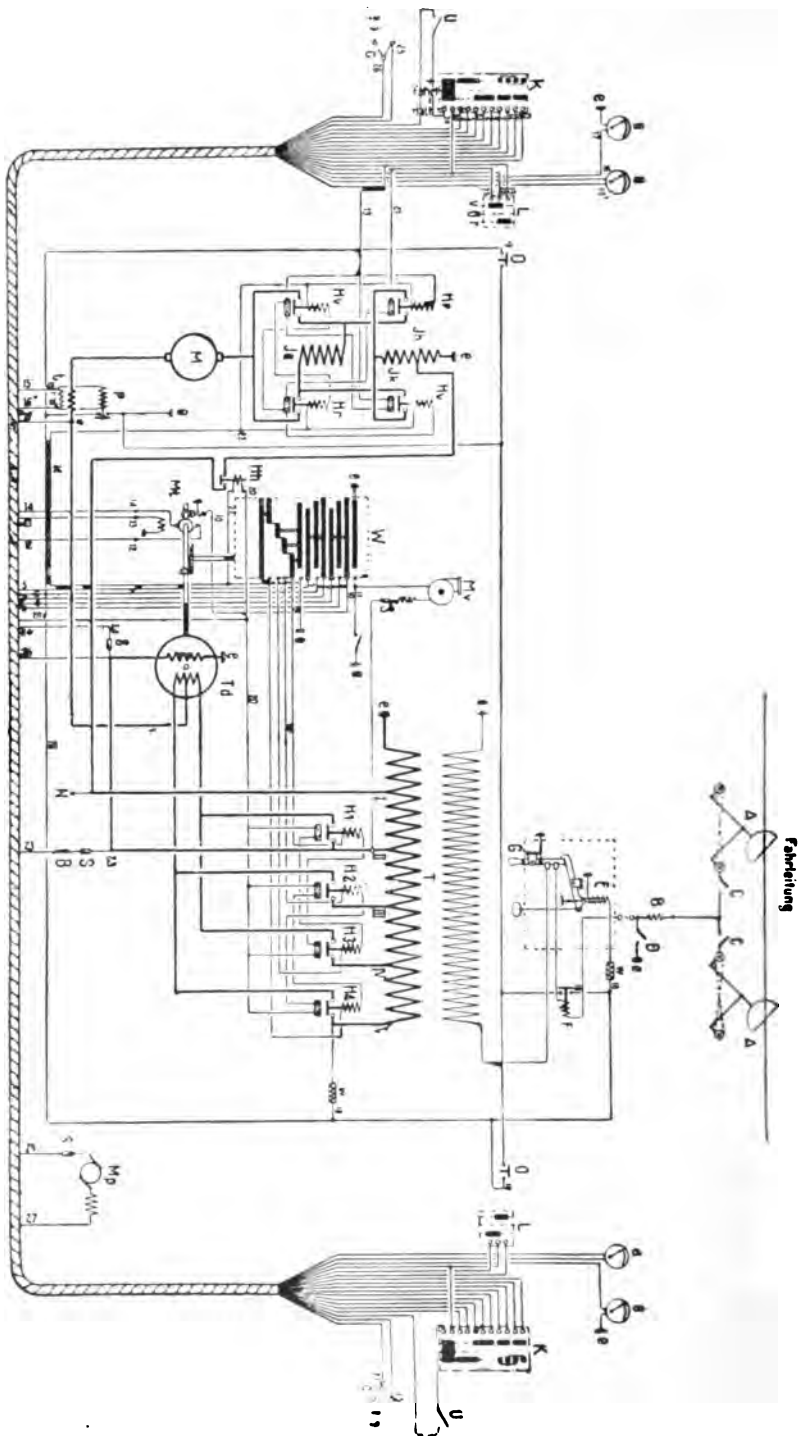
Dieser Motorschalter ist in Fig. 189 dargestellt. Er besitzt zwei Walzen mit sehr einfacher Anordnung der Stromschlußstücke. Die Hauptwalze betätigt den Drehtransformator, und zwar besitzt sie drei Stellungen, je nachdem

- A Stromabnehmer
- B Drosselspule
- O Trennschalter
- D Erdungsschalter
- F Niedrigstrom-Relais
- F Hochspannungs-Hochstrom-Relais
- G Hochspannungs-Ütschalter
- H<sub>1, 4</sub> Hüpfdr für Spannungsregelung

- H<sub>1-9</sub> Hüpfdr zur Änderung der Fahr-  
richtung
- H<sub>8</sub> Hüpfdr zur Hilfsregung
- J<sub>e</sub> Erregerwicklung
- J<sub>h</sub> Hilfsregwicklung
- J<sub>h</sub> Ausgleichswicklung
- K Fahrwalze
- L Fahrtrichtungswalze
- M Lokomotivmotor

- M<sub>p</sub> Luftpumpenmotor
- M<sub>1</sub> Antriebsmotor für den Dreh-  
transformator
- N<sub>z</sub> Ventilator
- N zur Belichtung
- O Druckknopf für den Ütschalter
- P Niederspannungs-Hochstrom-  
Sicherung
- T Haupttransformator

- Td Drehtransformator
- U Ausschalter
- U' Schalter d. Drehtransformators
- a Stromselger
- c Schalter zur Luftpumpe
- e Erde
- g Spannungselger
- f Stromtransformator
- w Widerstand



die Fahrspannung abnehmen oder zunehmen soll oder je nachdem die einmal erreichte Fahrgeschwindigkeit bestehen bleiben soll. In den beiden

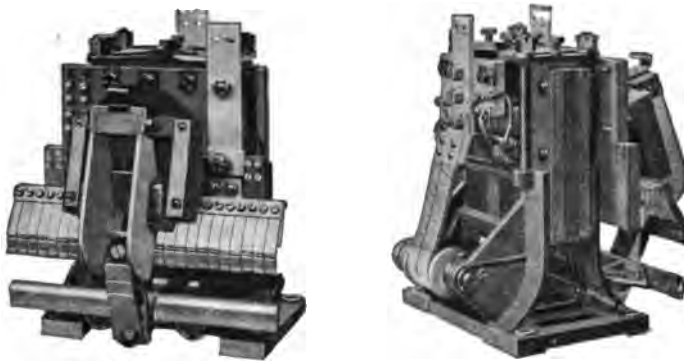
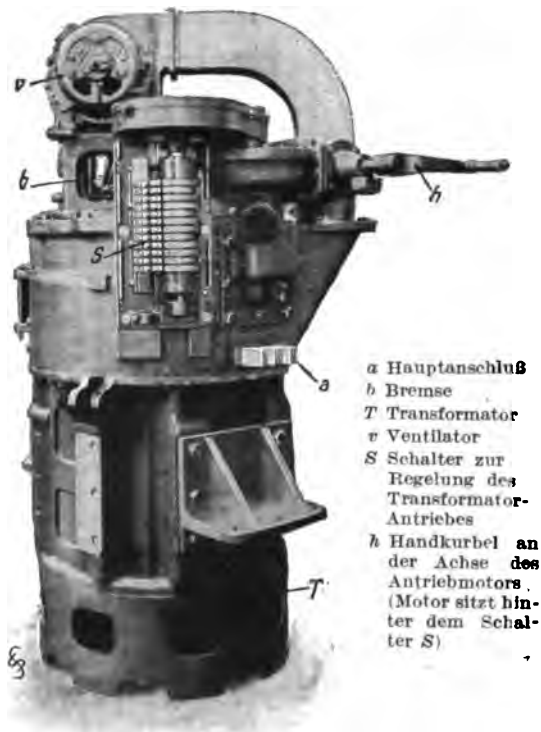


Fig. 198.

ersteren Stellungen wird die Drehrichtung des Drehtransformators umgesteuert, während in der dritten Stellung der Antriebsmotor ausgeschaltet ist. Eine Nebenwalze betätigt den Stromwender, der, wie der Schaltplan zeigt, aus einzelnen Hüpfern besteht. Die Bauart dieser Hüpfschalter, die auch für die Einstellung der Spannungsstufen verwendet werden, ergibt sich aus Fig. 198.

In einen U-förmigen Magnetgestell ist ein Magnetkern geführt, dessen unteres Ende an einem Schalthebel angreift; auf dem Schalthebel ist ein Stromschlußstück befestigt, das sich in der Einschaltstellung gegen eine Reihe von Stromschlußfedern drückt. Neben diesem Hauptstromschluß besitzt der Hüpfschalter einen Hilfsschalter, der sich erst öffnet, nachdem der Hauptschalter bereits ausgeschaltet worden ist, so daß lediglich an seinen leicht auswechselbaren Stromschlußstücken Funkenbildung auftritt. Dieser Hilfsschalter besitzt außerdem magnetische Funkenlöschung.



- a Hauptanschluß
- b Bremse
- T Transformator
- v Ventilator
- S Schalter zur Regelung des Transformator-Antriebes
- h Handkurbel an der Achse des Antriebmotors. (Motor sitzt hinter dem Schalter S)

Fig. 199.

Den Drehtransformator — allerdings in einer etwas anderen Form, wie er bei dieser Lokomotive benutzt wird — zeigt Fig. 199. Der drehbare Teil dieses Transformators trägt die primäre Wicklung und die kurzgeschlossene Ausgleichsspule zur Vernichtung des sekundären Streufeldes. An der Vorderseite des Transformators ist der zum Betrieb der Hüpfen dienende Stufenschalter *S* erkennbar.

Vermittelt der auf der Motorwelle sitzenden Kurbel *h* kann der Transformator auch von Hand gedreht werden. Der hier abgebildete Transformator besitzt einen eigenen Ventilator *V*, der bei dem für die hier beschriebene Lokomotive verwendeten Drehtransformator fehlt. Der Drehtransformator besitzt schließlich noch eine Bremsvorrichtung *b*, durch welche ein Nachlaufen des ausgeschalteten Antriebmotors vermieden wird.

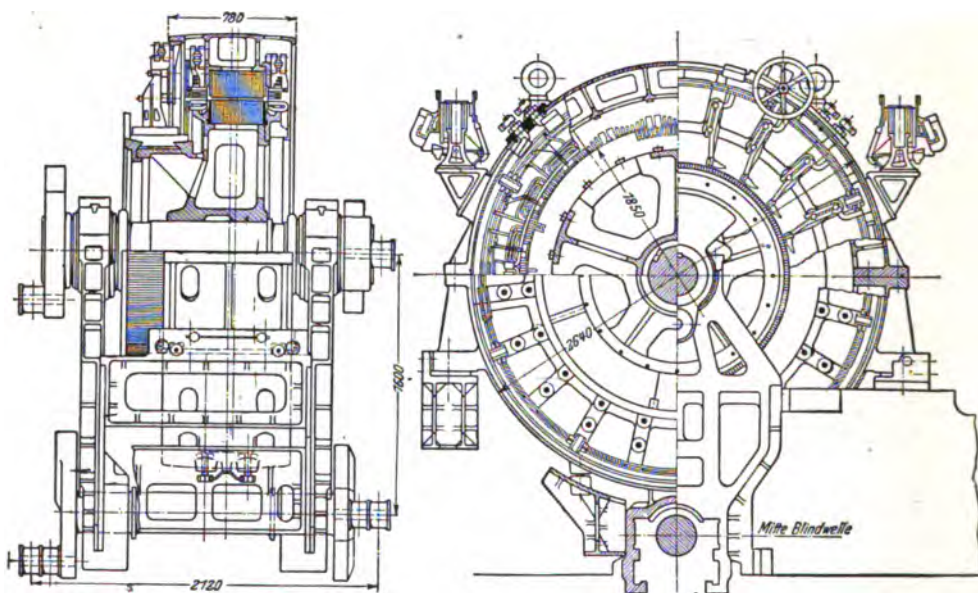


Fig. 200.

Den Leistungstransformator dieser Lokomotive zeigt Fig. 179. Er besitzt Scheibenwicklung und ist in Öl eingebettet. Der Ölkessel ist luftdicht verschlossen und besitzt in seinem Deckel eine sehr dünne Metallhaut, die bei plötzlichen Kurzschlüssen im Transformator infolge des stark ansteigenden Druckes der Öldämpfe platzt und diesen gestattet, nach außen zu entweichen.

Zu der Schaltung des Transformators ist noch zu bemerken, daß die Abzweigung I den Strom für die Nebenschlußerregung der Wendepolwicklung des Lokomotivmotors und für die Beleuchtung liefert. Die Abzweigung II speist den Ventilatormotor für die Kühlung des Drehtransformators. Außerdem speist Abzweigung II die primäre Wicklung des Drehtransformators und liefert die Steuerströme für den Antrieb des Drehtransformators, für die Betätigung der Hüpfen und für den Luftpumpenmotor. Die Abzweigungen

III, IV und V speisen den Lokomotivmotor, während V außerdem noch den Strom für die Festhaltespule des Hauptölschalters liefert.

Die Bauart des Lokomotivmotors, der eine Stundenleistung von 1600 PS besitzt, zeigt Fig. 200. Er besitzt die in Abschnitt 6 erläuterte gemischte Hauptstromnebenschlußerregung der Wendepole und besitzt Ankernuten, die schräg zur Achse gestellt sind. Auf dem Motorständer sitzen vier Hüpfer für die Umkehrung der Stromrichtung im Erregerkreis, die durch die Nebenwalze des Fahrschalters betätigt werden. Das Betriebsverhalten dieses Motors ergibt sich aus Fig. 201.

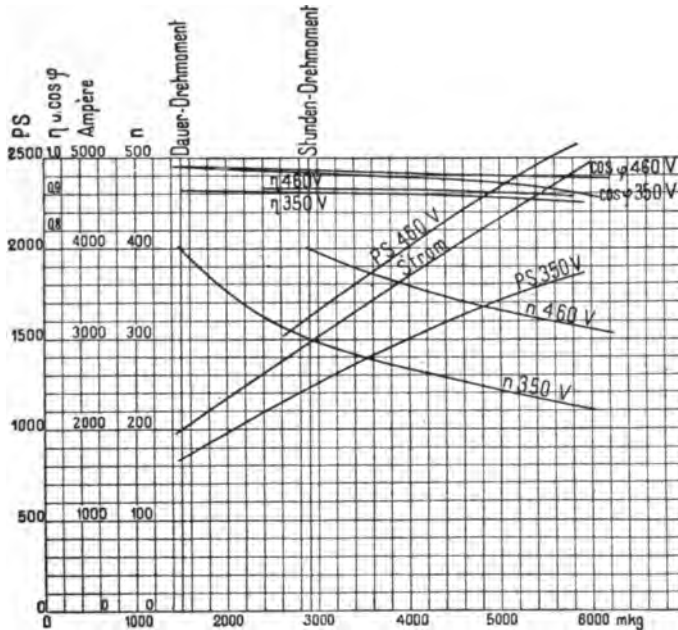


Fig. 201.

Die Stromabnehmer der Lokomotive sind als Scherenstromabnehmer ausgebildet.

Die Beleuchtung der Lokomotive wird durch Kohlenfadenlampen mit Wechselstromspeisung bewirkt. Weil diese dickdrähtigen Lampen ein großes Wärmefassungsvermögen besitzen, werden die langsamen Lichtschwankungen infolge des niederwelligen Wechselstroms in genügendem Maße ausgeglichen.

**34. Die Schaltung der D-Güterzuglokomotive der Siemens-Schuckertwerke.**

Diese in Fig. 202 dargestellte Lokomotive besitzt insofern eine verhältnismäßig einfache Anordnung der elektrischen Einrichtung, als die Schützensteuerung durch die reine Drehtransformatorregelung ersetzt ist.

Die elektrische Schaltung ist aus Fig. 203 ersichtlich.

Die Lokomotive besitzt nur eine einzige Schaltwalze K, die von beiden Führerständen aus durch Handhebel Z bewegt wird.

Der Hebel Z ist auf jedem Führerstand in doppelter Ausführung vorhanden, und zwar ist der eine vor dem rechten, der andere vor dem linken

Fenster der Stirnwand angebracht. Der Führer kann also seinen Standplatz so wählen, daß er die eine oder die andere Seite des Gleises während des Verschiebedienstes gut überblicken kann.

Die Achse der Fahrwalze  $K$  steuert in der Stellung „Ein“ des Haupthebels das Luftventil  $L_v$ , welches einen dreifachen Schalter  $Q$  durch den

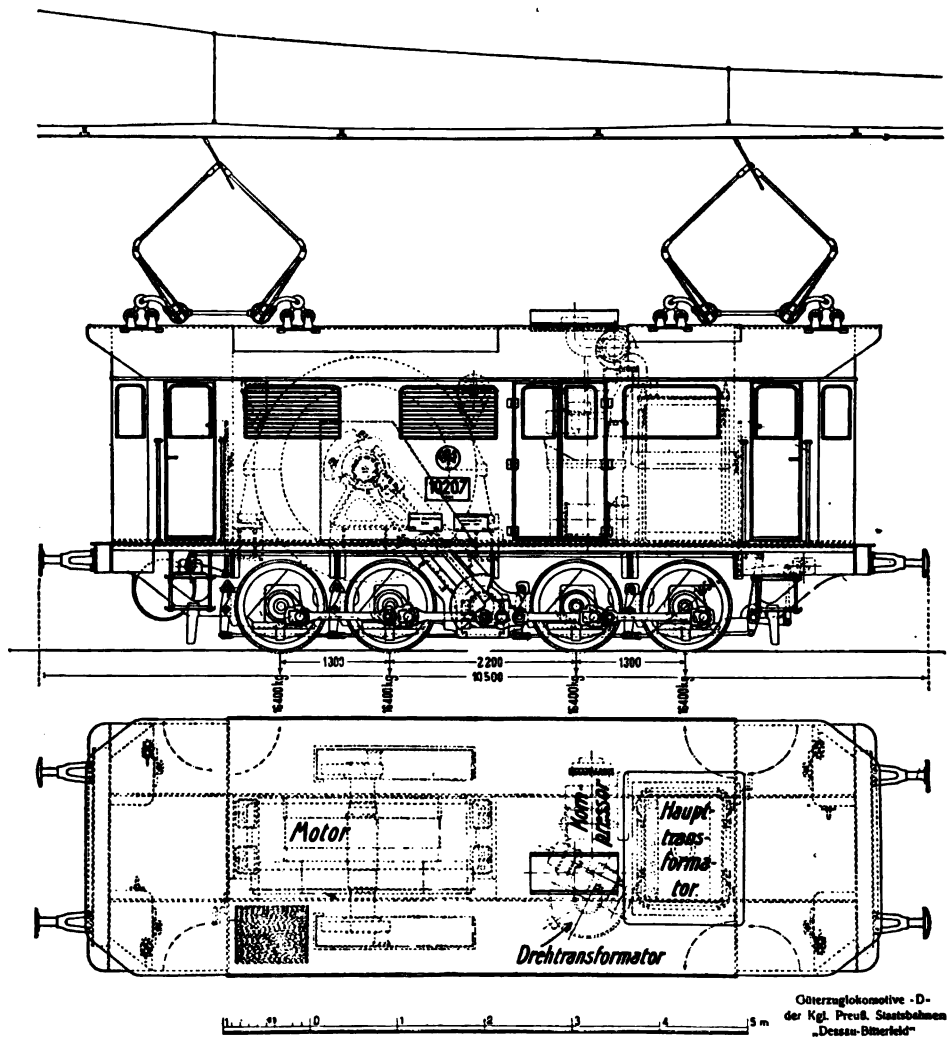
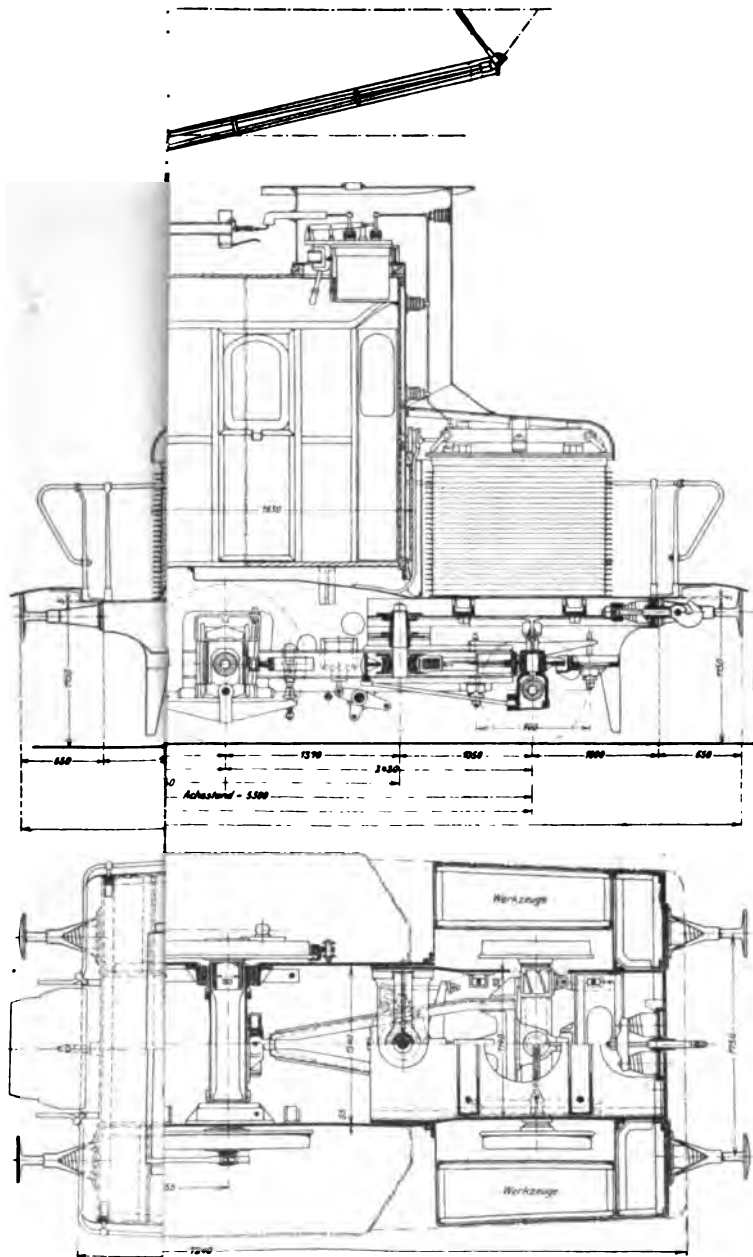


Fig. 202.

Lufzylinder  $L_e$  einschaltet. Nach dessen Einschaltung hält eine Sperrung den Schalter in der Einschaltstellung, auch wenn bei weiterer Drehung der Walze  $K$  dieses Ventil  $L_v$  sich wieder öffnet und die Luft aus  $L_e$  entweichen läßt. Wird später der Haupthebel in die Stellung „Aus“ gedreht, so speist das Ventil  $L_v$  den Luftzylinder  $L_a$ , welcher die Sperrung des Schalters  $Q$  löst, so daß dieser durch Federkraft geöffnet wird.



Zipp, Vollbal

Verlag von Oskar Leiner in Leipzig.



3



Wie der Schaltplan zeigt, speist  $Q$  sowohl die Spannungswicklung  $I_h$  der Wendepole als auch die Erregerwicklung des Drehtransformators  $T_d$  als auch die Ankerwicklung, die Ausgleichswicklung  $I_e$  und die Erregerwicklung  $I_k$  des Lokomotivmotors.

Neben dem Haupthebel  $Z$  besitzt noch jeder Führerstand einen Hebel  $Y$ , durch welchen die Umschaltwalze  $X$  gedreht wird. Durch diese Umschaltwalze wird die Fahr- richtung eingestellt.

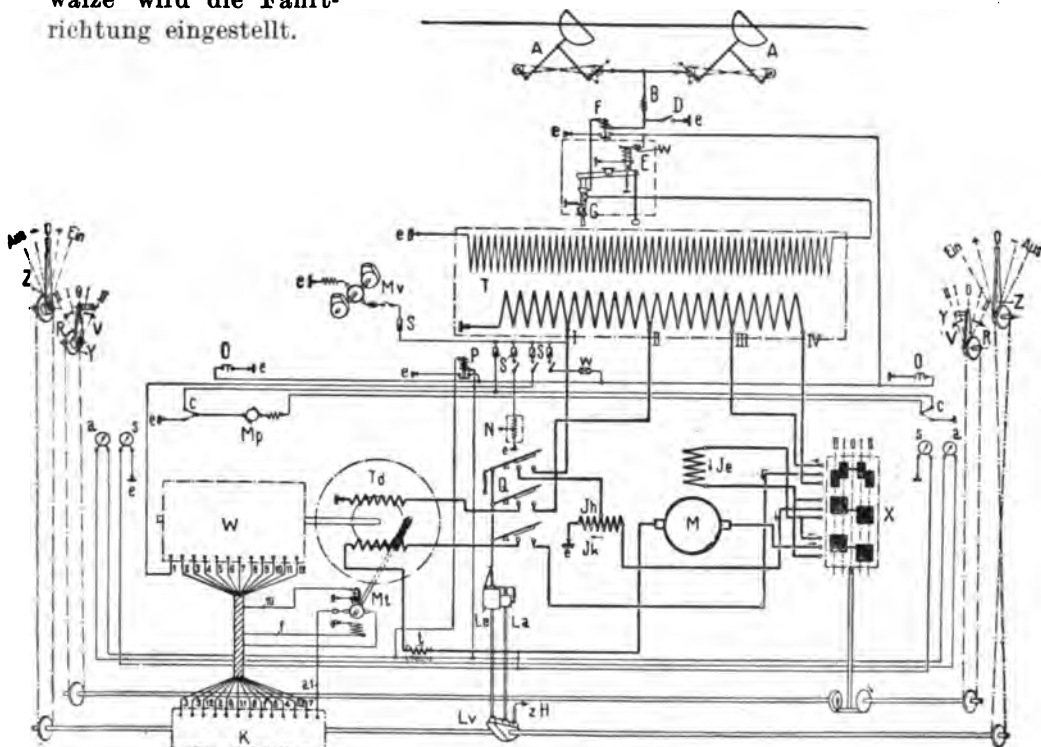


Fig. 203.

- |                                     |  |                                     |
|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| <b>A</b> Stromabnehmer              | <b>Lv</b> Fahrventil                   | <b>W</b> Schalter des Drehtransfor- |
| <b>B</b> Drosselspule               | <b>M</b> Lokomotivmotor                | <b>X</b> Motorumschalter [mators    |
| <b>D</b> Erdungsschalter            | <b>Mt</b> Antriebsmotor für den Dreh-  | <b>Y</b> Umschalthebel              |
| <b>E</b> Niedrigstrom-Relais        | transformator                          | <b>Z</b> Fahrhebel                  |
| <b>F</b> Hochspannungs-Höchststrom- | <b>Mp</b> Luftpumpenmotor              | <b>a</b> Stromzeiger                |
| Relais                              | <b>Mv</b> Ventilatormotor              | <b>c</b> Schalter zur Luftpumpe     |
| <b>G</b> Hochspannungs-Ölschalter   | <b>N</b> zur Beleuchtung               | <b>e</b> Erde                       |
| <b>Je</b> Erregerwicklung           | <b>O</b> Druckknopf für den Ölschalter | <b>s</b> Spannungszeiger            |
| <b>Jh</b> Hilferregerwicklung       | <b>P</b> Niederspannungs-Höchst-       | <b>t</b> Stromtransformator         |
| <b>Jk</b> Ausgleichswicklung        | strom-Relais                           | <b>w</b> Widerstand                 |
| <b>K</b> Fahrwalze                  | <b>Q</b> Hauptschalter [strom-Relais   | <b>R</b> Rückwärts                  |
| <b>Le</b> Einschalt-Luftzylinder    | <b>S</b> Sicherung                     | <b>V</b> Vorwärts                   |
| <b>La</b> Ausschalt-Luftzylinder    | <b>T</b> Haupttransformator            | <b>vH</b> zum Hauptluftbehälter     |
|                                     | <b>Td</b> Drehtransformator            |                                     |

Diese Umschaltwalze bewirkt aber noch den Anschluß an eine niedrigere — Stellung I — oder höhere — Stellung II — Spannungsstufe des Leistungs- transformators.

Die für diese Stufenschaltung sonst gebräuchlichen Schützenschalter sind also durch diese Schaltwalze ersetzt. Dabei wird Stellung I bei langsamer Fahrt, also in erster Linie im Verschiebedienst, benutzt, während Stellung II für die Fahrt mit voller Geschwindigkeit in Betracht kommt.

Innerhalb dieser Spannungsstufen erfolgt die Regelung der Geschwindigkeit durch den Drehtransformator, der wieder motorisch angetrieben wird.

Der Schaltvorgang ist nun folgender:

Vor Antritt der Fahrt bringt der Führer den Hebel *Y* in Stellung „Vorwärts II“, wenn ein Zug fahrplanmäßig befördert werden soll. Bei Beginn der Fahrt wird dann der Hebel *Z* aus der Nullstellung zunächst kurz in die Stellung „Ein“ gebracht, wodurch der Hauptschalter *Q* eingeschaltet wird. Sodann wird Hebel *Z* in die Stellung  $+$  gebracht und nun dreht sich der Drehtransformator, die Motorspannung allmählich vergrößernd, so lange, als der Hebel *Z* in der  $+$  Stellung stehen bleibt. Wird dieser jetzt in die Nullstellung gebracht, so bleibt die erreichte Geschwindigkeit bestehen. Entsprechend sinkt die Motorspannung und damit die Fahrgeschwindigkeit, wenn der Hebel *Z* in die  $-$  Stellung gedreht wird, da jetzt der Drehtransformator im Sinne abnehmender Spannung gedreht wird.

### 35. Lokomotive 1—B + B—1 der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft.

Diese Lokomotive ist in Fig. 204 in Ansicht und Schnitt dargestellt. Während die elektrische Ausrüstung von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft geliefert wurde, wurde der mechanische Teil durch die Lokomotivfabrik von Krauß & Co. in München ausgeführt.

Nach den Vorschriften muß die Lokomotive folgenden Bedingungen genügen:

Spurweite 1435 mm

Fahrdrahtspannung 15 000 Volt

Wellenzahl 15 in der Sekunde

Höchste Fahrgeschwindigkeit 75 km/Stunde

Kleinster Krümmungshalbmesser auf freier Strecke 250 m

Kleinster Krümmungshalbmesser in Bahnhöfen 180 m

Größte Anfahrzugkraft am Triebbradumfang 13 500 kg

Zugkraft am Haken während einer Stunde bei rund 40 km/Stunde  
8000 kg.

Auf einer Steigung von  $27\text{‰}$  soll ein Zug von 250 t Wagengewicht mit 40 km/St., auf einer Steigung von  $15,5\text{‰}$  ein Zug von 400 t Wagengewicht mit gleicher Geschwindigkeit eine Stunde lang befördert werden können. Bei diesen Belastungen muß eine Anfahrbeschleunigung von mindestens  $0,05 \text{ m/sek}^2$  erreicht werden können.

Die Lokomotive ist diesen Anforderungen entsprechend gebaut, und zwar so, daß sie sowohl als Güterzuglokomotive wie auch als Personenzuglokomotive verwendet werden kann.

Bei einem zugelassenen höchsten Achsdruck von 17 t wurden zur Erreichung der geforderten höchsten Anfahrzugkraft vier Triebachsen erforderlich. Um bei dieser verhältnismäßig großen Zahl der Kuppelachsen eine gute Lauffähigkeit und Beweglichkeit des Fahrzeuges in den Gleiskrümmungen zu erreichen, wurde die gesamte Leistung auf zwei kurzgekuppelte Hälften verteilt und außerdem erhielt die Lokomotive führende Laufachsen, die mit den benachbarten Kuppelachsen zu je einem Krauß-Helmholtz-Drehgestell vereinigt sind, das bereits in Fig. 153 abgebildet worden ist.

Die Kurzkupplung besteht aus einem starren Zugeisen und zwei Not-schleifen, sowie aus zwei Puffern mit keilförmig flachen Köpfen, die durch eine nachspannbare Blattfeder auf die zugehörigen Druckflächen gepreßt werden.



*Fig. 205.*

Die Abmessungen der Lokomotive sind aus der Abbildung ersichtlich; der Treibachsdruk beträgt 17 t, der Laufachsdruk 12,5 t; die elektrische Ausrüstung wiegt 49 t und die fertige Lokomotive 93 t. Das Reibungsgewicht beträgt 68 t und die Motorstundenleistung  $2 \times 800$  PS. —

Auch die Einzelheiten des Triebwerkes sind aus den Schnittzeichnungen zu ersehen; es möge noch bemerkt werden, daß die seitliche Verschiebbarkeit

der Kuppelachse des Drehgestells die Anordnung eines senkrechten Drehzapfens in der Kuppelstange und eines Kugelzapfens an der Kuppelachse bedingte. Alle Köpfe der Trieb- und Kuppelstange sind in der Stangen-



*Fig. 206.*

richtung nachstellbar, während das Blindwellenlager sowohl in senkrechter wie auch in wagerechter Richtung nachgestellt werden kann. Der Maschinenraum ist nach oben durch ein Blechdach abgeschlossen, das mit dem Stromabnehmer entfernt werden kann, um die Motoren bequem ausbauen zu können.

Im Maschinenraum befindet sich auf jeder Lokomotivhälfte eine Motorluftpumpe mit einer Leistung von 7 PS (vgl. Fig. 205). Außerdem enthält eine Lokomotivhälfte einen Wechselstrom-Gleichstromumformer nebst Akkumulatorenatterie von  $2 \times 9$  Elementen mit einer Kapazität von 81 Amperestunden, zur Speisung von drei Signallampen an den Stirnwänden, zwei Lampen für Innenbeleuchtung und für eine tragbare Handlampe. Die Kühlluft für den Motor tritt durch die teilweise aus gelochtem Blech gebildeten Seitenwände ein und entweicht durch große auf dem Dach befindliche Lüftungsaufsätze.

Die Einrichtung des Führerraums zeigt Fig. 206.

Auf der rechten Seite, in der Fahrtrichtung gesehen, befindet sich der für gewöhnlich benutzte Führerstand. Ein zweiter Führerstand liegt auf der linken Seite und enthält einen Fahrschalter und ein Bremsventil. Dieser Führerstand wird in der Regel nur für Rangierzwecke benutzt.

In der Mitte des Führerraums ist eine Schalttafel untergebracht, welche die Schalter und Sicherungen für die Heiz- und Beleuchtungsstromkreise, ferner für den Luftpumpenstromkreis und für den Steuerstrom trägt.

Der Hauptführerstand enthält ferner noch die Druckmesser für die Bremse, die Spannungs-, Strom- und Leistungsmesser und schließlich einen Geschwindigkeitsmesser.

An die Rückwand des Führerraums schließt sich der Schützenraum an, der feuersicher und schalldämpfend ausgekleidet ist. Die in ihm untergebrachten Steuerschütze sind durch drei Drehtüren von vorne und von hinten leicht zugänglich. Eine Ansicht dieses Raums gibt Fig. 207.

In jedem Motorraum ist ein achtpoliger Motor von 800 PS Stundenleistung, Bauart Winter-Eichberg, untergebracht, der vollständig offen gebaut ist. Das Motorgehäuse ist unmittelbar auf kräftigen Rahmenquerträgern festgeschraubt. Der Läufer ist, wie bereits in Abschnitt 28 erläutert, besonders gelagert und besitzt eine einfache Kissenschmierung der Lager. Die Kurbeln der Motorwelle sind durch ein Blechgehäuse vollständig verschalt.

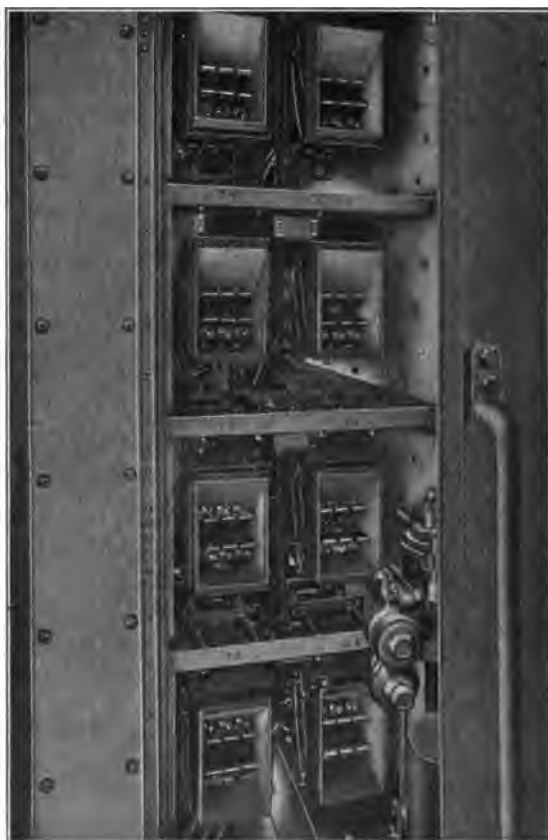


Fig. 207.

Die beiden Transformatoren sind zum Zwecke einer wirksamen Kühlung frei auf den beiden äußeren Enden der Lokomotivhälften aufgestellt und ihre Befestigung auf dem Lokomotivrahmen kann leicht gelöst werden, damit der Transformator zu Ausbesserungszwecken abgehoben werden kann.

Auf dem Deckel des Transformatorgehäuses befinden sich die Kabelausführungen. Die Kabel selbst werden durch einen Kanal unterhalb des Führerraums in den Schützenraum geführt.

Vom Stromabnehmer gelangt der hochgespannte Strom zunächst in den unter dem Lokomotivdach angebrachten Hochspannungsschalter (Fig. 208),



Fig. 208.

der so angeordnet ist, daß er mit Ausnahme seiner Betätigungsgriffe zum Ein- und Ausschalten, vom Führerraum aus völlig unzugänglich ist.

Jeder der beiden Schalter kann außer von Hand auch von beiden Führerständen aus durch Druckknöpfe mittels elektrischer Fernbetätigung ein- und ausgeschaltet werden.

Die Schaltung der Lokomotive ist in ihrer grundsätzlichen Anordnung in Fig. 209 dargestellt, deren Wirkungsweise an Hand der in Abschnitt 29 angestellten Erörterungen zu überblicken ist.

Der Motor besitzt neben der Ständerarbeitswicklung  $F$  noch eine Wendepolwicklung  $w$ , die durch ein Schütz bei hohen Geschwindigkeiten an eine Schaltstufe  $w$  des Erregertransformators, der als Spartransformator ausgebildet ist, gelegt wird.

Durch diesen Spartransformator mit regelbarem Übersetzungsverhältnis werden die Erregerbürsten des Motorläufers gespeist. Die Stufenschaltung geschieht sowohl beim Haupttransformator wie auch beim Erregertransformator durch Vermittlung einer Drosselspule. Die Drehrichtung des Motors wird durch Umkehrung der Stromrichtung im Erregerkreise geändert.

### 36. Schnellzugslokomotive der A. E. G., Bauart 2—B—1.

Diese Lokomotive, die für die Strecke Dessau—Bitterfeld erbaut worden ist, wird durch einen 1000 PS-Motor mit doppelter Speisung betrieben.

Die Lokomotivschaltung ist in Fig. 210 dargestellt.

Vom Fahrdrabt wird der Strom durch Scherenstromabnehmer entnommen und gelangt über die Schutzdrosselspule  $D$  und über den mit Vorkontakten versehenen Hauptölschalter  $HS$  zum Haupttransformator  $Tr$  und über den Stromwandler  $Str W$  zur Erde.

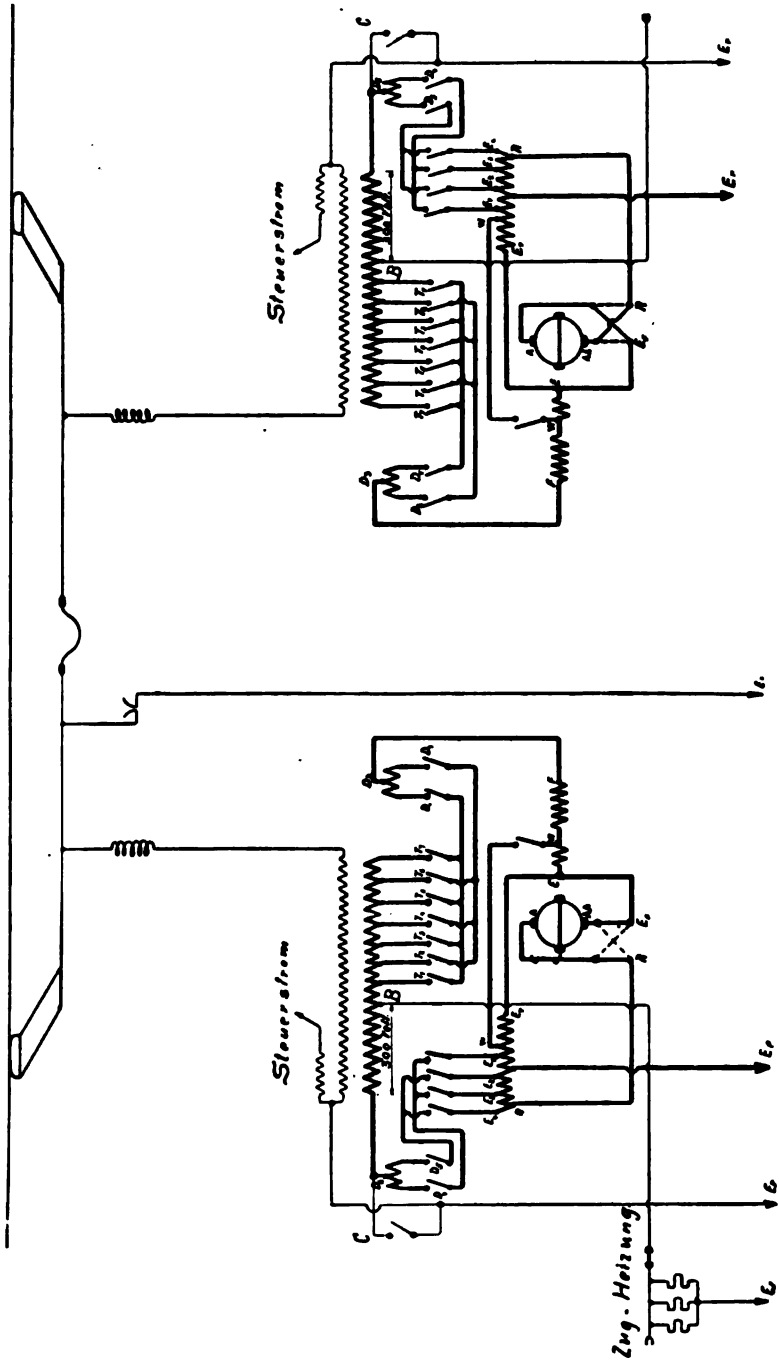
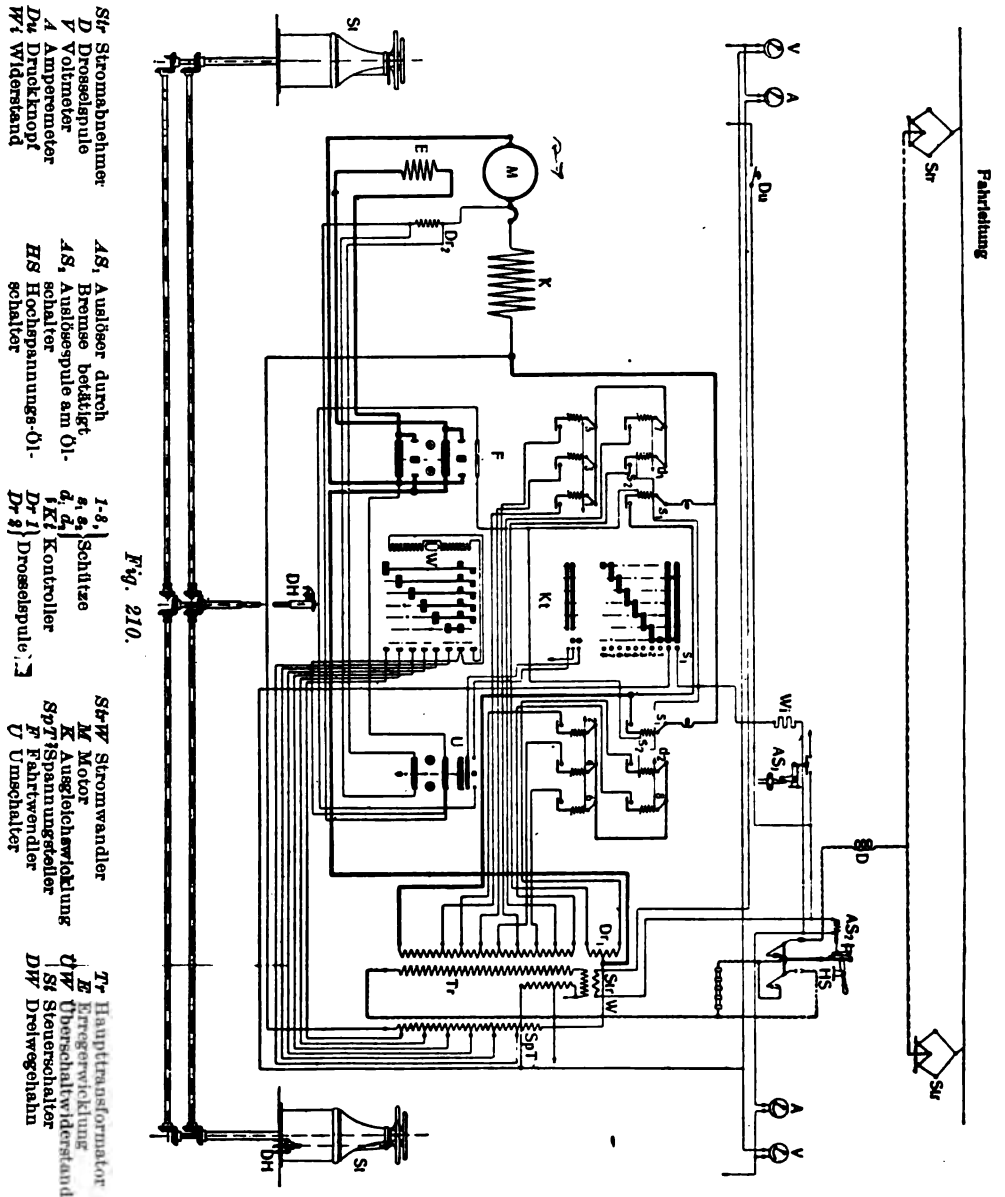


Fig. 208.

Durch die Anzapfungen der Niederspannungswicklung wird der Motor mit der gewünschten Spannungsstufe verbunden, wobei die Schützenschalter 1 bis 8 die Einschaltung und die Schütze  $s_1 s_1$  und  $d_1 d_2$  die Unterbrechung bewirken.

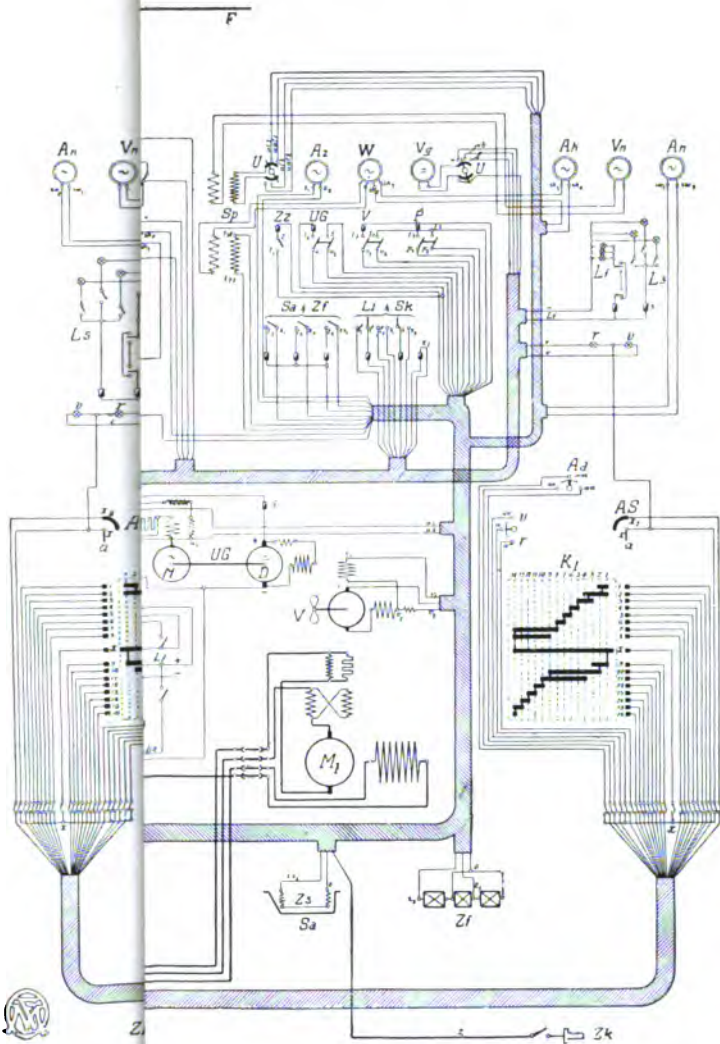


Der Strom gelangt von der jeweils eingestellten Spannungsstufe zum Fahrtwender *F*, der die Stromrichtung in der Erregerwicklung *E* umsteuert, dann zur Ankerwicklung *M* und zur Ausgleichswicklung *K*, dann über die beiden parallelgeschalteten Schütze  $s_1 s_1$  zum anderen Pol des Transformators.









Maschinenfabrik Oerlikon.

- Aa Selbstspannung
- Ah Hochspannung
- An Niederspannung
- AS Steuerung für Fahrtrichtungs-  
Lufte [wechsel]
- ATI ATII Automatische Voltmeter
- Au Umgekehrte Voltmeter für Hochspannung
- AUH Hochspannung Voltmeter für Niederspannung
- B1 B2 Akkumulatorschalter
- Bl Blende

- Zf Führerstandsheizung
- Zk Kupplung für Zugsheizung
- Zs Heizkörper für Sandkasten
- Zz Zugsheizung
- a Abschluß
- b1 b2 Leitungen der Akkumulatoren-  
batterien
- c g Eingeschaltet bei 15 000 Volt
- d gg Eingeschaltet bei 7500 Volt
- e Hochspannungseinführungen
- r Fahrt rückwärts
- v Fahrt vorwärts

Zipp, Vollbahn

Verlag von Oskar Leiner in Leipzig.



Ein Spannungsteiler  $Sp\ T$  gestattet, die Ankerwicklung an besondere Spannung zu legen und auf diese Weise einen zwischen  $M$  und  $K$  schwingenden Transformatorfluß  $\Phi_x$  zu erzeugen, der die der jeweiligen Geschwindigkeit entsprechende Größe besitzt. Der Einfluß dieser Spannungsteilung auf die Größe der Funkenspannung ist bereits in Fig. 111 dargestellt worden.

Die Geschwindigkeit und Zugkraft der Lokomotive wird durch die Schaltwalze  $K$ ; gesteuert, deren obere und untere Walze unabhängig voneinander gedreht werden können.

Die obere Walze dient zur Einstellung der Geschwindigkeit, die untere dagegen zur Einstellung der Spannungsverteilung. Beide Walzen werden durch einen mechanischen Antrieb von beiden Führerständen aus gesteuert, und zwar durch zwei Handräder, die unabhängig voneinander gedreht werden können.

Bei Anlauf wird der Motoranker durch den Umschalter  $U$  kurzgeschlossen, so daß er als Atkinsonscher Repulsionsmotor anläuft.

Zu bemerken ist noch, daß der Hauptölschalter eine Auslösevorrichtung  $AS_1$  besitzt, die ein Einschalten bei festgezogener Bremse verhindert und daß dieser Hauptschalter vom Führerstand aus durch einen Druckknopf  $D_u$  eingeschaltet werden kann. Der Steuerstrom schließlich wird einer Hilfsspule des Haupttransformators entnommen.

### 37. Die Lötchbergbahn-Lokomotiven der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die für den Betrieb der Lötchbergbahn bestimmte schwere Gebirgslokomotive der Bauart C—C ist für eine Dauerleistung von 2000 PS gebaut.

Ihre Hauptmaße sind die folgenden:

Spurweite . . . . .	1,435 m
Ganze Länge über Puffer . . . . .	15,020 „
Größte Kastenbreite . . . . .	2,970 „
Höhe des Daches über Schienenoberkante	4,100 „
Höhe des Kastenfußbodens . . . . .	1,500 „
Drehzapfenabstand . . . . .	5,200 „
Gesamter Radstand . . . . .	10,700 „
Radstand des Drehgestells . . . . .	4,050 „
Triebraddurchmesser . . . . .	1,350 „
Breite der Radreifen . . . . .	0,140 „

Die Gewichte sind folgendermaßen verteilt:

Mechanischer Teil einschließlich Bremse . .	46 t
Elektrischer Teil . . . . .	44 „
Insgesamt	90 t
Reibungsgewicht . . . . .	90 t
Größter Achsdruck . . . . .	15 „
Gewicht eines Drehgestells ohne Motor . .	18,5 „
Gewicht eines Motors einschl. Zahngetriebe.	9,8 „
Gewicht eines Transformators . . . . .	5,5 „

Die Arbeitsgrößen der Lokomotive sind folgende:

Zahnradübersetzung 1: 3,25

Gewöhnliche Fahrgeschwindigkeit 42 km/St

Höchste Fahrgeschwindigkeit 70 km/St

Betriebsmäßige Zugkraft am Haken 10 000 kg

Höchsterreichbare Zugkraft am Haken 13 000 kg

Fahrdrahtspannung 15 000 Volt

Wellenzahl des Wechselstroms 15 in der Sekunde.

Der mechanische Teil der Lokomotive, die durch Fig. 211 in Ansicht und Schnitt veranschaulicht wird, ist von der Schweizerischen Lokomotiv- und Maschinenfabrik Winterthur gebaut.

Die Lokomotive besitzt zwei Drehgestelle mit fest eingebautem Motor, die bereits in Fig. 172 dargestellt worden sind. Auch über die Einzelheiten des Zahntriebs dieser Drehgestelle ist bereits in Abschnitt 25 gesprochen worden.

Der einteilige eiserne Kasten ruht mittels je zwei Pfannen auf den Rahmenblechen der Drehgestelle. Die in den Drehgestellen allseitig beweglichen Drehzapfen sitzen in einem Längsträger, der die eigentliche Verbindung der beiden Drehgestelle bildet. Auf diesem Längsträger sind auch die schweren Teile der elektrischen Ausrüstung gelagert. Den Schaltplan der Lokomotive zeigt Fig. 212; seine Einzelheiten erläutern sich an Hand der Ausführungen in Abschnitt 29.

Aus den Niederspannungswicklungen der Transformatoren fließt der Strom über die Schützen (Hüpfshalter)  $H_I H_{II}$ , die Drosselspulen  $AT_I, AT_{II}$ , die Fahrtrichtungswalze  $UW$  und eine Umschaltvorrichtung  $UV$  zu den Motoren  $M$ . Im regelrechten Betrieb sind alle diese Teile hintereinandergeschaltet. Um aber auch jede Motor-Transformatorgruppe außer Betrieb setzen zu können, kann diese mit Hilfe der Umschaltvorrichtung  $UV$  abgeschaltet und der Stromkreis innerhalb der anderen Motor-Transformatorgruppe geschlossen werden.

Die Transformatoren  $T_I$  und  $T_{II}$  liefern auch den Strom für sämtliche Hilfsmaschinen, so für das Gebläse, die Luftpumpe, die Umformergruppe und die Heizung.

Durch einen Umschalter können diese Vorrichtungen an den einen oder anderen Transformator angeschlossen werden.

Der Stromabnehmer ist nach der Bauart Siemens-Schuckert als Scherenstromabnehmer ausgeführt. Er ist bereits in Fig. 176 abgebildet und dort näher beschrieben worden.

Die Blitzschutzvorrichtung besteht aus einer Hörnerfunkenstrecke, einer Drosselspule und einem in Öl eingebetteten Erdungswiderstand von 3500 Ohm, der aus Konstantan-Asbestbändern hergestellt ist.

Der Hauptölschalter  $A_a$  besitzt einen Schaltwiderstand. Er wird von den Führerständen aus mittels Gleichstroms eingeschaltet und durch einen Auslösemagneten ausgeschaltet.

Ein Zeitrelais und ein Nullstromrelais besorgen die selbsttätige Ausschaltung. Außerdem kann der Schalter vom Führerstand aus von Hand ausgelöst werden.

Jeder der beiden Transformatoren, Fig. 213, ist für eine Dauerleistung von 1000 kVA bei künstlicher Luftkühlung gebaut. Die Hüpfshalter gestatten, den Transformatoren in acht Abstufungen Spannungen von 0 bis 420 Volt zu entnehmen.

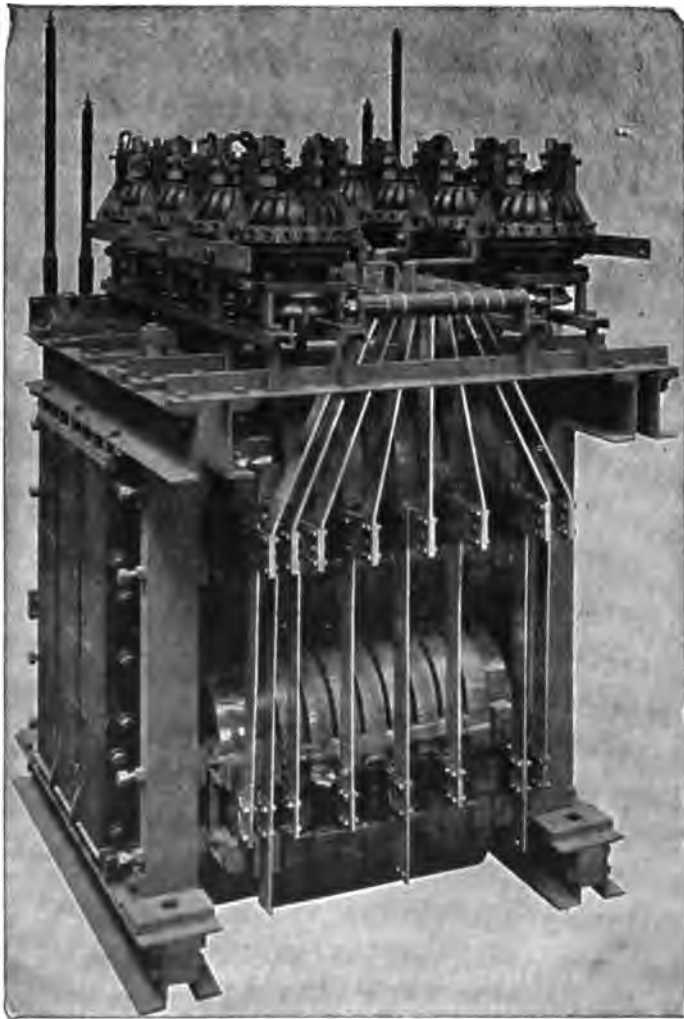


Fig. 213. Maschinenfabrik Oerlikon.

Durch den Umschalter *og* beziehungsweise *dg* können die beiden Hälften der Hochspannungswicklung hintereinander oder nebeneinander geschaltet werden, so daß die Transformatoren mit 15 000 Volt und mit 7500 Volt betrieben werden können.

Die Niederspannungswicklungen der beiden Transformatoren sind über die Hüpfshalter hintereinander mit den beiden Motoren geschaltet; ihre Verbindungsleitung ist an Erde gelegt, so daß die Spannung der Motoren gegen Erde höchstens 420 Volt beträgt.

Die Spulen haben Zylinderform und sind übereinander auf die wagrecht gelagerten Eisenkerne aufgeschoben. Durch die Schlitze der letzteren und zwischen den Spulen wird die Kühlluft durchgetrieben.

Der Wirkungsgrad der Transformatoren liegt bei Belastungen zwischen 200 und 1300 kVA über 95%.

Die Schützenschalter sind auf dem Transformator aufgebaut, um die Verbindungsleitungen nach Möglichkeit zu kürzen. Sie werden durch Gleich-

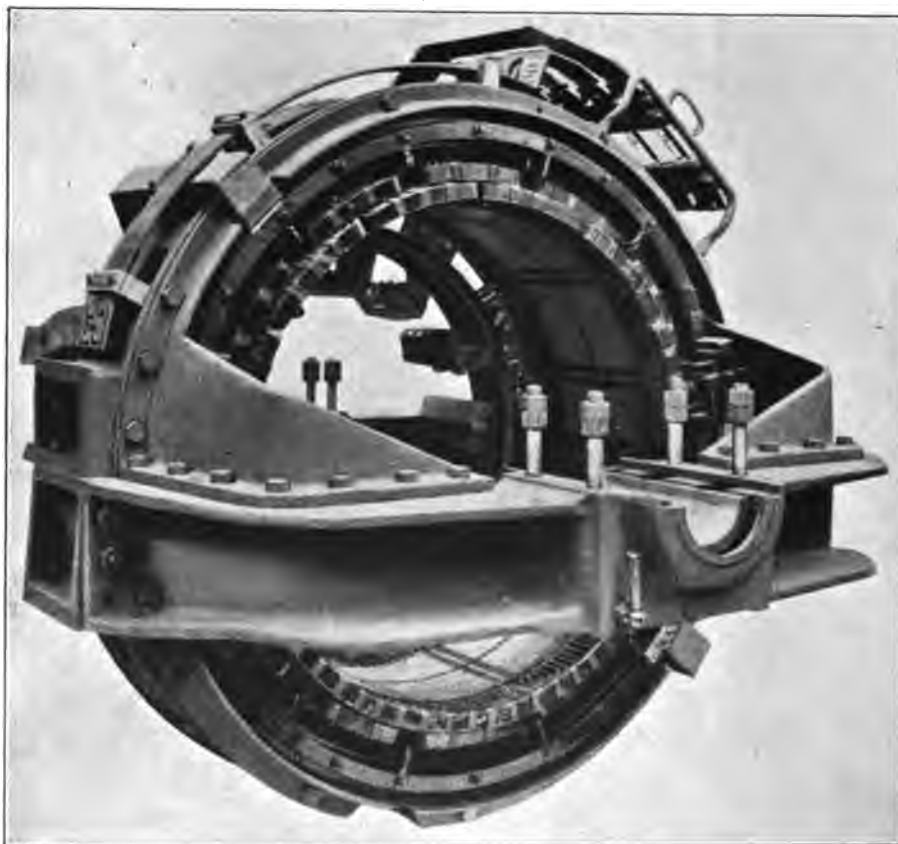


Fig. 214.

Maschinenfabrik Oerlikon.

strom gesteuert und sie sind derartig gegeneinander verriegelt, daß von jeder Gruppe immer nur ein Schalter geschlossen sein kann. Sie besitzen Haupt- und Nebenstromschlußstücke, so daß Funken nur an den letzteren entstehen können. Der Abreißfunke wird magnetisch gelöscht. Der Fahrtwender ist als Walze ausgebildet und wird ebenfalls durch Gleichstrom durch Vermittlung von Zugmagneten gesteuert. Eine Stromschlußvorrichtung meldet die jeweilige Stellung des Fahrtwenders *UW* durch je ein mit *v* und *r* bezeichnetes Glühlampenpaar in den Führerständen.

Die Motoren besitzen 12 Pole und arbeiten mit phasenverschobenen



Wendefeldern (vgl. Abschnitt 6). Der Ständer ist in Fig. 214 dargestellt, während der Läufer bereits in Fig. 157 abgebildet wurde.

Der Motor kann ohne künstliche Kühlung eine Stundenleistung von 1000 PS entwickeln, während er diese Leistung bei künstlicher Kühlung dauernd abgibt.

Die Ständerwicklung besteht aus der Erreger- und Ausgleichwicklung, die sich um einen halben Polabstand übergreifen. Innerhalb der Ausgleichwicklung befindet sich auf je einem Zahn die Wendepolwicklung, deren Strom durch einen parallel geschalteten induktionsfreien Widerstand in der Phase verschoben werden kann. Dieser Widerstand ist unmittelbar unter dem Motor im Drehgestell untergebracht. Die Wicklung, eine Parallelwicklung, ist durch glimmerisolierte Kupferstäbe gebildet, die in den halbgeschlossenen Nuten untergebracht sind.

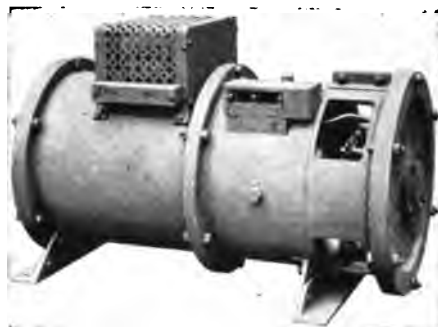


Fig. 215. Maschinenfabrik Oerlikon.

Der Läufer besitzt ebenfalls halbgeschlossene Nuten, die um den Betrag einer Teilung schräg gestellt sind, um Oberschwingungen zu vermeiden.

Bei den Versuchen wurde zwischen Halblast und Vollast ein Wirkungsgrad von 90% und bei Geschwindigkeiten von 30 km und mehr ein Leistungsfaktor von über 0,95 gemessen.

Die Bürstenhalter sind an einem drehbaren Ring befestigt. Der Luftspalt beträgt 3 mm.

Für den Betrieb der Steuerung und der Lokomotivbeleuchtung dient eine Gleichstromanlage, die aus einem Umformer und einer Akkumulatorenbatterie besteht.

Der in Fig. 215 abgebildete Umformer (UG im Schaltplan) besteht aus einem Wechselstrom-Induktionsmotor und einem Gleichstromerzeuger von 1,2 kW. Der Motor wird durch ein phasenverschobenes Hilfsfeld als Drehfeldmotor angeschlossen. Die Batterie besteht aus  $2 \times 18$  Elementen mit einer Kapazität von 81 Amperestunden. Die Umformergruppe setzt sich selbsttätig in Betrieb, sobald die Lokomotive Spannung erhält.



Fig. 216. Maschinenfabrik Oerlikon.

Der Motor dieser Gruppe wird durch einen Umschalter an die fünfte Anzapfung eines der beiden Transformatoren angeschlossen. Die Gleichstrommaschine G ist anfangs von der Batterie und den Lampen abgeschaltet und die Batterie an die Lampen angeschlossen.

Sobald die Gleichstrommaschine die volle Drehzahl und Ladespannung erreicht hat, wird der Umschalter, dessen Ansicht Fig. 216 zeigt, mittels eines Gleichstromrelais aus der im Schaltplan gezeichneten Stellung nach

rechts gedreht und die Schaltung für die Ladung hergestellt. Damit in dieser Stellung die Lampen keine höhere Spannung als 35 Volt bekommen, ist in dieser Stellung dem Lampenstromkreis ein Widerstand vorgeschaltet. Der Umschalter bewirkt ferner den Kurzschluß des Widerstandes, der während des Anlaufs der Feldwicklung des Motors vorgeschaltet ist und die Ausschaltung der Hilfsfeldwicklung.

Für die Beleuchtung der Lokomotive sind sechs Deckenlampen im Maschinenraum, eine abblendbare Deckenlampe in jedem Führerraum, je eine Instrumentenlampe, eine Lampe für den Dienstfahrplan und an jeder Stirnseite drei Signallampen vorgesehen.

Die Führerstände werden durch je drei Heizkörper von 500 Watt geheizt. Die Heizkörper für die Sandkasten verbrauchen etwa 100 Watt. Für die Zugsheizung können den Transformatoren 100 kW bei 300 Volt entnommen werden.

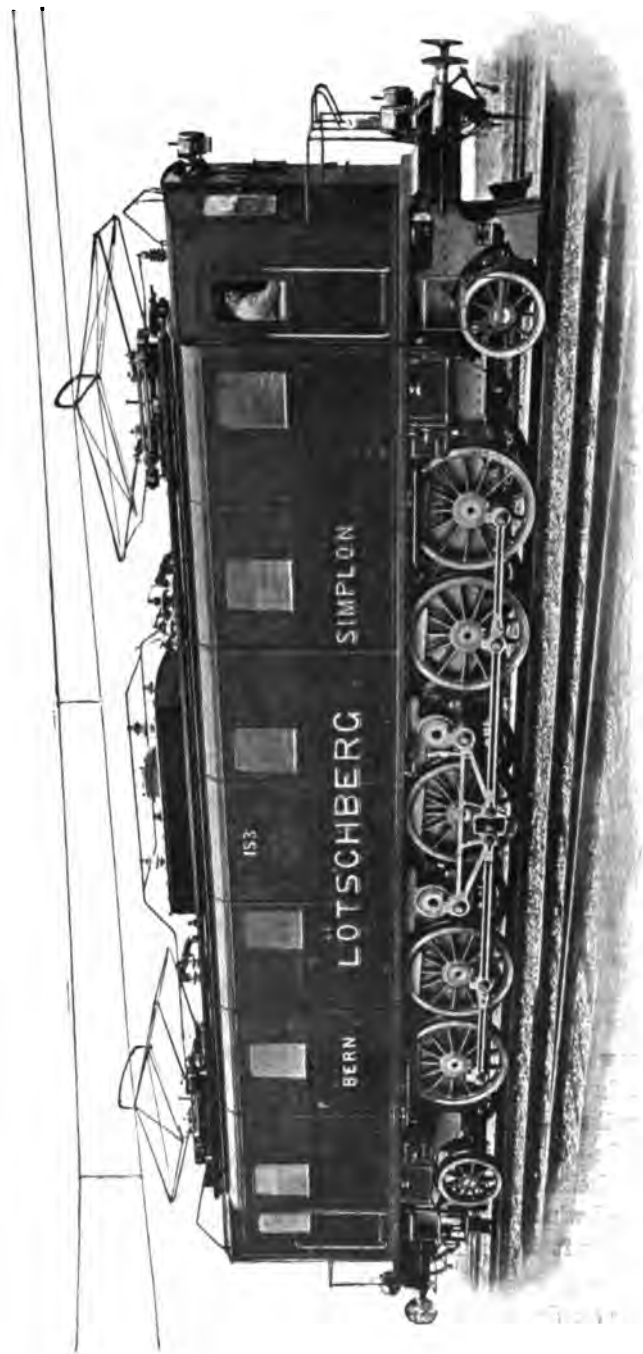
Die zur Kühlung der Transformatoren und Motoren erforderliche Druckluft wird durch das Gebläse *V* erzeugt, welches aus einem Niederdruckventilator, Bauart Sulzer, und einem Reihenschlußmotor von 10 PS besteht. Die Luft wird aus dem Maschinenraum angesaugt und in einen am Boden längs der Wand verlaufenden Kanal getrieben, von wo sie durch zwei breite Anschlußkanäle zu den Transformatoren gelangt. An den Enden des waagrecht verlaufenden Kanals sind noch Öffnungen vorgesehen, um auch im Bedarfsfall die Motoren kühlen zu können.

Die Luftpumpengruppe besteht aus einem Reihenschlußmotor von 9 PS und einem Westinghouse-Verdichter. Ein selbsttätiger Schalter *R* schaltet den Motor an und ab. Sollte dieser Schalter aus irgendeinem Grunde versagen, so kann er kurzgeschlossen werden, worauf die Luftpumpe vom Führerstand aus von Hand gesteuert wird.

Über den Schaltvorgang ist noch folgendes zu bemerken. Zum ersten Anlegen des Stromabnehmers dient eine Handluftpumpe. Nachdem der Stromabnehmer aufgerichtet ist, kann der Hochspannungsschalter *A<sub>a</sub>* am Führertisch in die Stellung *a e* gebracht werden. Das ist aber nur möglich, wenn durch geeignete Drehung des Hahnes der zum Abnehmer führenden Luftleitung der damit verbundene Steuerstromschalter *AS* eingeschaltet wurde. Jetzt stehen die Transformatoren unter Spannung und es wird die Luftpumpe angelassen. Darauf wird die Fahrtrichtung durch den Führerschalter *v—r* eingestellt, worauf sich die Umschaltwalze *UW* umlegt und die Fahrtrichtung durch die entsprechende Glühlampe zurückmeldet. Nun erst kann der Fahrschalter gedreht werden, und zwar entspricht jeder Umdrehung der Führerkurbel eine Schaltstellung, die durch einen Zeiger auf einem Zifferblatt kenntlich gemacht wird. Sobald der Fahrschalter aus der Nullage gedreht ist, kann die Umschaltwalze infolge mechanischer Verriegelung nicht mehr gedreht werden. —

In jüngster Zeit ist von der gleichen Firma eine noch größere Lokomotive gebaut worden, deren Ansicht in Fig. 217 dargestellt ist. Sie besitzt die Achsenanordnung 1—E—1 und besitzt einen Kuppelrahmenantrieb.

Die Maße und Arbeitsgrößen dieser Lokomotive ergeben sich aus folgender Zusammenstellung:



Maschinenfabrik Oerlikon.

Fig. 217.

Größte Länge über die Puffer gemessen . . . . .	16,000 m
Gesamtradstand . . . . .	11,340 „
Starrer Radstand . . . . .	4,500 „
Triebraddurchmesser . . . . .	1,350 „
Laufraddurchmesser . . . . .	0,850 „
Kurbeldurchmesser . . . . .	0,600 „
Zahnradübersetzung . . . . .	1 : 2,23
Gewicht des mechanischen Teils . . . . .	47,3 t
Gewicht des elektrischen Teils . . . . .	49 „



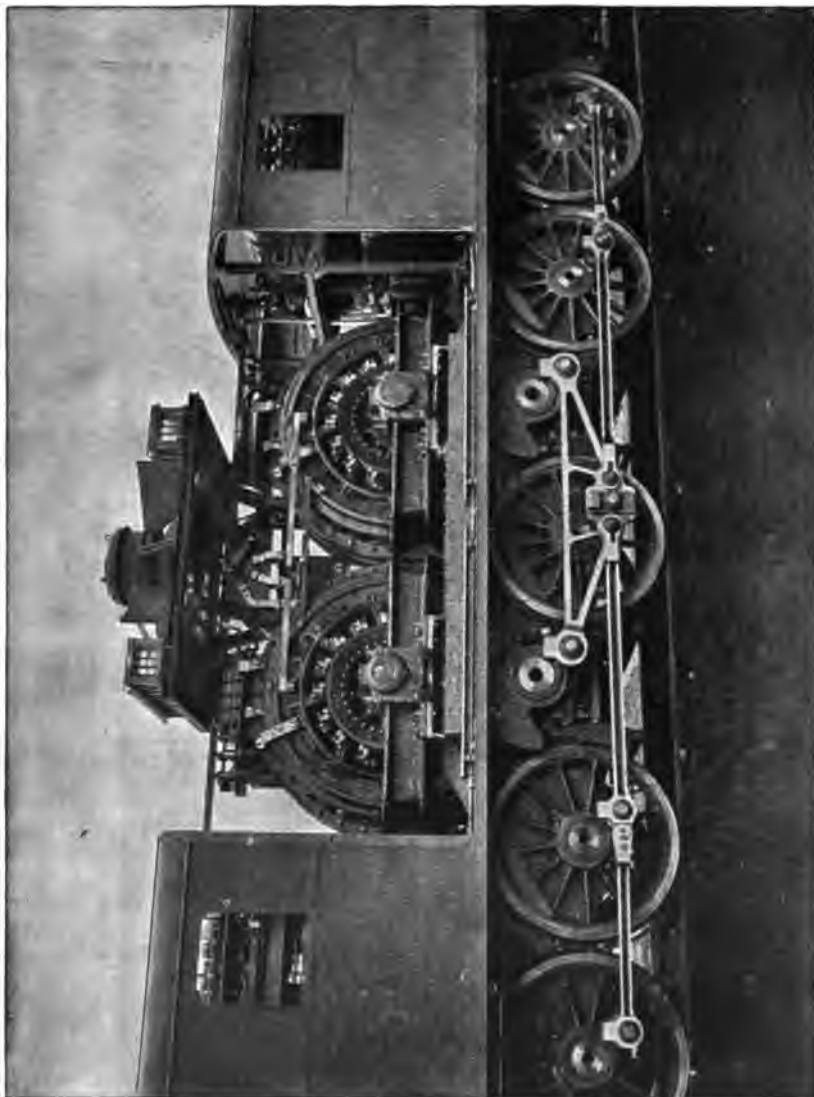
Maschinenfabrik Oerlikon.

Fig. 218.

Reibungsgewicht . . . . .	78,2 t
Größter Achsdruck . . . . .	16,6 „
Leistung während 1,5 Stunden . . . . .	2 500 PS
Zugkraft bei dieser Leistung, am Radumfang gemessen	13 500 kg
Geschwindigkeit bei dieser Leistung . . . . .	50 km in der Stunde
Größte Geschwindigkeit . . . . .	75 km in der Stunde
Größte Zugkraft beim Anfahren . . . . .	18 000 kg

Abgesehen von der größeren Leistung unterscheidet sich diese Lokomotive von der vorher beschriebenen in erster Linie durch die Art der Steuerung; an Stelle der Hüpfhalter ist eine Schaltwalze großer Abmessungen getreten, die mit dem Transformator nach Fig. 218 zusammengesetzt ist.

Die feststehenden federnden Stromschlußstücke dieses Stufenschalters stehen mit den Abzweigungen des Transformators in unmittelbarer Verbindung. Beim Übergang von einer zur anderen Schaltstufe wird in der gebräuchlichen Art eine als Spartransformator wirkende Drosselspule eingeschaltet.



Maschinenfabrik Oerlikon.

Fig. 219a.

Eine mit der eigentlichen Schaltwalze zwangläufig gekuppelte Nebenwalze besorgt die Ein- und Ausschaltung des einen oder des anderen Stromkreises des Spartransformators, so daß an der Hauptwalze überhaupt keine Funkenbildung auftritt. Es sind zwölf Spannungsstufen vorgesehen und die Spannung kann zwischen 90 und 520 Volt geregelt werden. Der Stufenschalter wird durch einen kleinen Gleichstrommotor angetrieben, der dauernd läuft

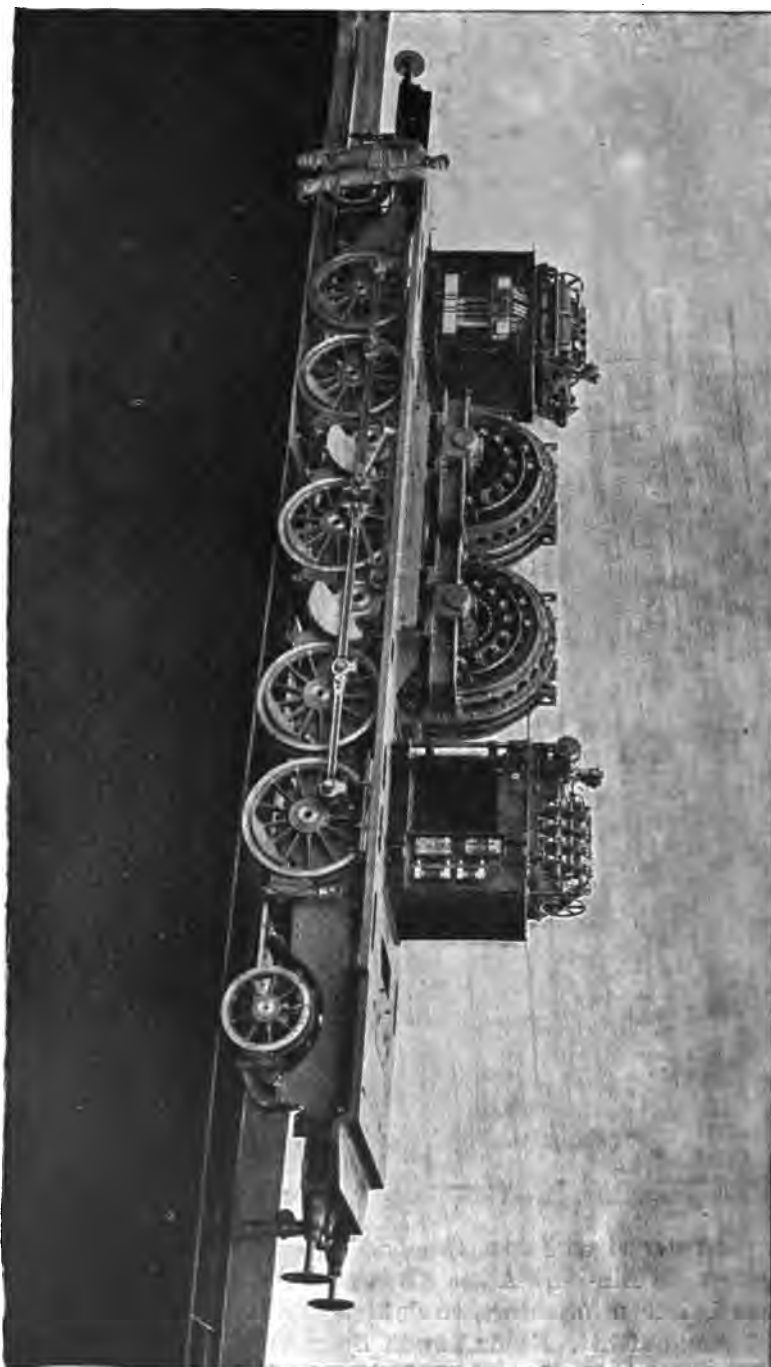
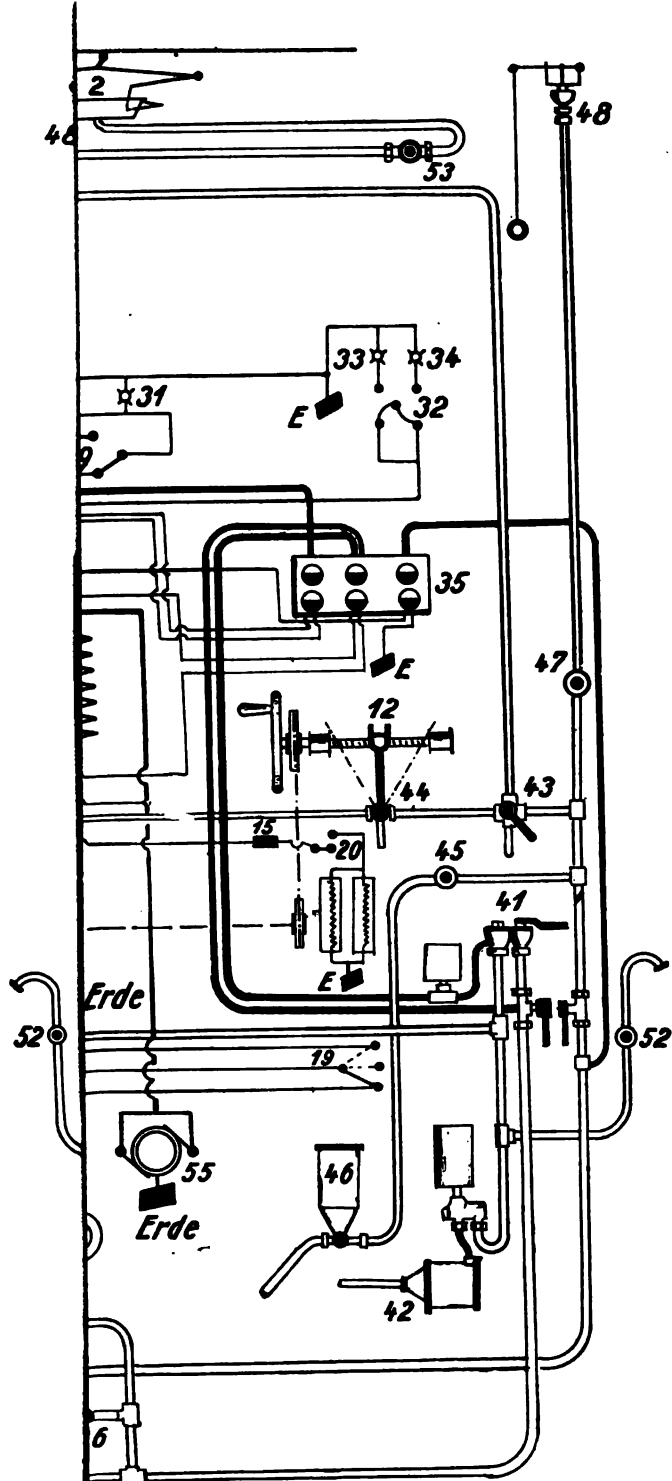


Fig. 219b.

Maschinenfabrik Oerlikon.



- |       |                      |                              |
|-------|----------------------|------------------------------|
| 1. F  | Amperemeter          | 46. Sandkasten               |
| 2. St | ventil mit Druck-    | 47. Pfeifenhahn              |
| 3. Le |                      | 48. Pfeife                   |
| 4. D  | re Bremse            | 49. Dreiweghahn              |
| 5. M  | entil                | 50. Handpumpe                |
| 6. L  | re Apparate          | 51. Plombierter Abschlußhahn |
| 7. St |                      | 52. Abschlußhahn             |
| 8. M  |                      | 53. Plombierter Hahn         |
| 9. N  | schaltventil         | 54. Abschlußhahn zur Heisung |
| 10. T | ur für Hauptschalter | 55. Erdleitungskontakt       |
| 11. M |                      | 56. Motorausblaseleitung     |

Zip P





und einen aus der Abbildung ersichtlichen Klinkenmechanismus in dauernde Schwingungen versetzt. Dieser schwingende Teil besitzt zwei Klinken, die jede für sich vom Führerstand aus elektromagnetisch eingeschaltet werden können. Je nachdem die eine oder andere Klinke mit dem Klinkenrad in Eingriff kommt, dreht sich die Schaltwalze in der einen oder anderen Richtung. Dieser Stufenschalter ist für die höchste Stromstärke von 3600 Ampere gebaut.

Zwischen den beiden mit Stufenschaltern zusammengebauten Transformatoren liegen, wie Fig. 219a und b zeigt, die beiden Motoren, deren Aufbau demjenigen bei der C—C-Lokomotive entspricht. Auch hier ist der Zahntrieb fest mit dem Motor zusammengebaut. Auf den Motoren sitzen die Fahrtwender, die durch Zugmagnete gesteuert werden. Der Aufbau oberhalb der Motoren zeigt einen in das Lokomotivdach eingebauten Ventilator, der die warme Luft aus dem Motorraum absaugt. Neben dem Ventilator sind die Widerstände sichtbar, welche zur Erzeugung der phasenverschobenen Wendefelder der Wendepolwicklung parallel geschaltet werden. Sie liegen also im Luftstrom des Ventilators und werden auf diese Weise wirksam gekühlt.

Die Nebeneinrichtungen der Lokomotive entsprechen im großen und ganzen denjenigen, wie sie bei der Lokomotive C—C beschrieben worden sind.

Zu bemerken ist noch, daß jeder Transformator durch einen besonderen Ventilator gelüftet wird. Die Hilfsmotoren werden vom Haupttransformator mit 118 Volt und die Zugsheizung (ca. 300 Ampere) mit 325 Volt gespeist.

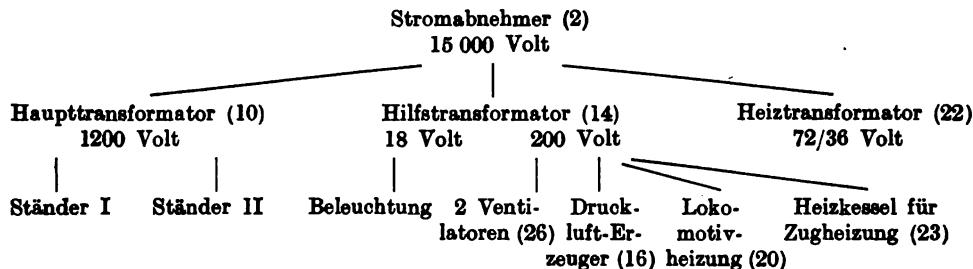
Bei den Versuchsfahrten ergab sich eine Phasenverschiebung  $\cos \varphi = 0,95$  und ein elektrischer Wirkungsgrad der ganzen Lokomotive bis zu 88%.

### 38. Die Wiesentalbahn-Lokomotiven der Firma Brown, Boveri & Cie.

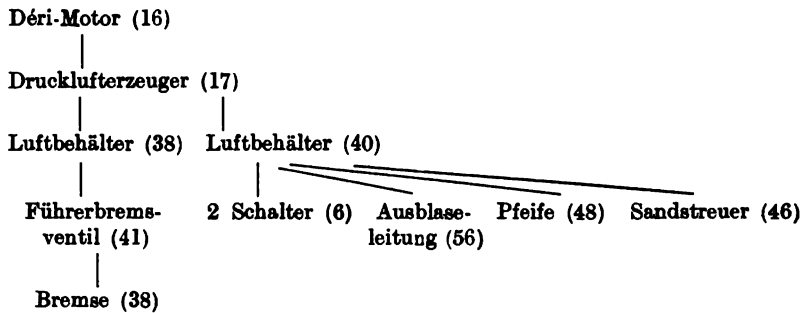
Für die Großherzogliche Generaldirektion der badischen Staatseisenbahnen in Karlsruhe, welche die 50 km lange Wiesentalbahn von Basel bis Zell und von Schopfheim bis Säckingen elektrisch betreibt, befinden sich bei der Brown, Boveri & Cie A.-G. in Mannheim-Käfertal zwei Stück 1—C—1 Vollbahnlokomotiven für den Eil- und Personenzugdienst in Fertigstellung bzw. in Probetrieb. Diese Lokomotiven sind mit zwei Déri-Motoren von je 400 PS ausgerüstet und die Steuerung erfolgt lediglich durch Bürstenverschiebung.

Aus Fig. 220 ergibt sich die Anordnung dieser Steuerung, die durch Druckluft betätigt wird.

Die elektrischen Stromkreise sind zunächst folgendermaßen angeordnet:



Die Druckluftleitungen zeigen folgende Anordnung:



Zu den Einzelheiten der Schaltung ist folgendes zu bemerken. Die Steuerung wird durch zwei sog. Blindkontroller (12), Fig. 221, betätigt. Wird deren Handrad in der einen oder anderen Richtung gedreht, so werden, wie aus dem Schaltplan ersichtlich, die Bürsten der Motoren in der einen oder anderen Richtung verstellt. Ist Druckluft in dem Behälter 40 vorhanden, so wird zunächst das Ventil 43 geöffnet, durch welches die Stromabnehmer (2) Druckluft erhalten, die sich nunmehr aufrichten. Dreht jetzt der Führer das Steuerrad, so öffnet sich zunächst das Ventil 44, durch welches dem Hauptschalter 6 Druckluft zugeführt wird. Die Hauptleitung ist nun bei 5 geschlossen und die Motoren erhalten Strom. Bei weiterer Drehung der Kontrollerspindel bleibt das Ventil 44 offen.

In ähnlicher Weise wird der Heiztransformator durch das Ventil 54 eingeschaltet.

Der Hauptschalter 5 kann auf dreierlei Arten betätigt werden, nämlich einmal in der geschilderten Weise durch die Druckluftsteuerung 6, das andere Mal kann er ausgeschaltet werden durch das Höchststromrelais 8, welches durch den Stromwandler 7 gespeist wird, und schließlich erfolgt ebenfalls die Auslösung, wenn das Relais 9 stromlos wird, wenn also die Spannung verschwindet. Zu diesem letzteren Relais ist noch ein zweites Relais (9) parallel geschaltet, das im magnetisierten Zustande den Raum verriegelt, in welchem die Hochspannungsapparate untergebracht sind. Dieser kann demnach nur dann geöffnet werden, wenn die Lokomotive spannungslos ist.

Die beiden Reihenschlußmotoren für den Antrieb der Ventilatoren sind in Reihe geschaltet, so daß auf jeden Motor die Spannung 110 Volt entfällt. Sowohl die Ventilatoren als auch der Beleuchtungsstromkreis und der Druckluftherzeuger können durch Umschalter 25, 29 und 19 von beiden Führerständen aus eingeschaltet werden.

Auf jedem Führerstand sind 6 Meßinstrumente angebracht, nämlich

2 Luftdruckmesser

1 Dampfdruckmesser für den Heizkessel (23)

1 Spannungsmesser an den 200-Volt-Transformator (14) angeschlossen,

1 Strommesser für den Haupttransformator (10)

1 Strommesser für den Heiztransformator (22).

Die übrigen Einzelheiten der Steuerung dürften sich nach den früheren Erörterungen von selbst erläutern. Zu bemerken wäre noch, daß die Ausblaseleitung 56 einen Schlauchanschluß besitzt, um die Motoren entstäuben zu können.

Eine Handluftpumpe, die auf dem im Schaltplan links liegenden Führerstand untergebracht ist, bietet die Möglichkeit, die Stromabnehmer aufzurichten, wenn im Behälter 40 noch keine Druckluft vorhanden ist.



*Fig. 221.*

Die bauliche Anordnung dieser Lokomotive zeigt Fig. 222. Aus dem Grundrißschnitt ist die Achsenanordnung in ihren Einzelheiten zu erkennen. Die vordere Achse ist eine Adams-Achse, die seitlich verschiebbar ist, und zwar ist die Mittellinie dieser Achse stets die Sehne eines Kreises, der durch die Lagermitten geht. Kräftige Rückstellfedern sorgen dafür, daß die Achse stets wieder in ihre Mittellage zurückschwingt, sobald die Lokomotive die Gleiskrümmung verläßt.

Die drei Kuppelachsen sind fest gelagert und die Schleppachse ist eine Drehachse, die um einen vertikalen Zapfen schwingt.

Die mittlere Kuppelachse ist Treibachse, und zwar erfolgt die Kraftübertragung von den beiden Motoren aus durch den sog. Zweistangenantrieb. Der Stangenkopf auf dieser Treibachse ist als Schlitzkurbel ausgebildet, um dem Federspiel Rechnung zu tragen. Die aus dem Längsschnitt erkennbaren Einzelheiten erläutern sich von selbst an Hand des Schaltplanes und unter Zuhilfenahme der in Fig. 223 dargestellten drei Querschnitte der Lokomotive.

Der Stromabnehmer ist bereits in Fig. 176a abgebildet worden. Zwischen den beiden Motoren, und zwar oberhalb dieser liegt die durch das Nullspannungsrelais verriegelte Hochspannungskammer. Diese Kammer wird ebenso wie die beiden Motoren, durch die beiden Ventilatoren gelüftet. Sie enthält 2 Ölschalter, 1 Stromwandler und den kleinen Transformatoren von 7 kVA. Der eine von diesen Ölschaltern ist für den Heiztransformator, der andere für den kleinen Transformator bestimmt.

Der Hauptausschalter für den großen Leistungstransformator befindet sich unmittelbar neben diesen und ist nur zugänglich durch eine besondere elektrisch und mechanisch verriegelte Tür.

Im Motorraum befindet sich noch ein Dampfkessel für Zugheizung. Das Wasser wird in 2 seitlich unter dem Wagengestell angebrachten Wasserbehältern von je 450 l Inhalt mitgeführt.

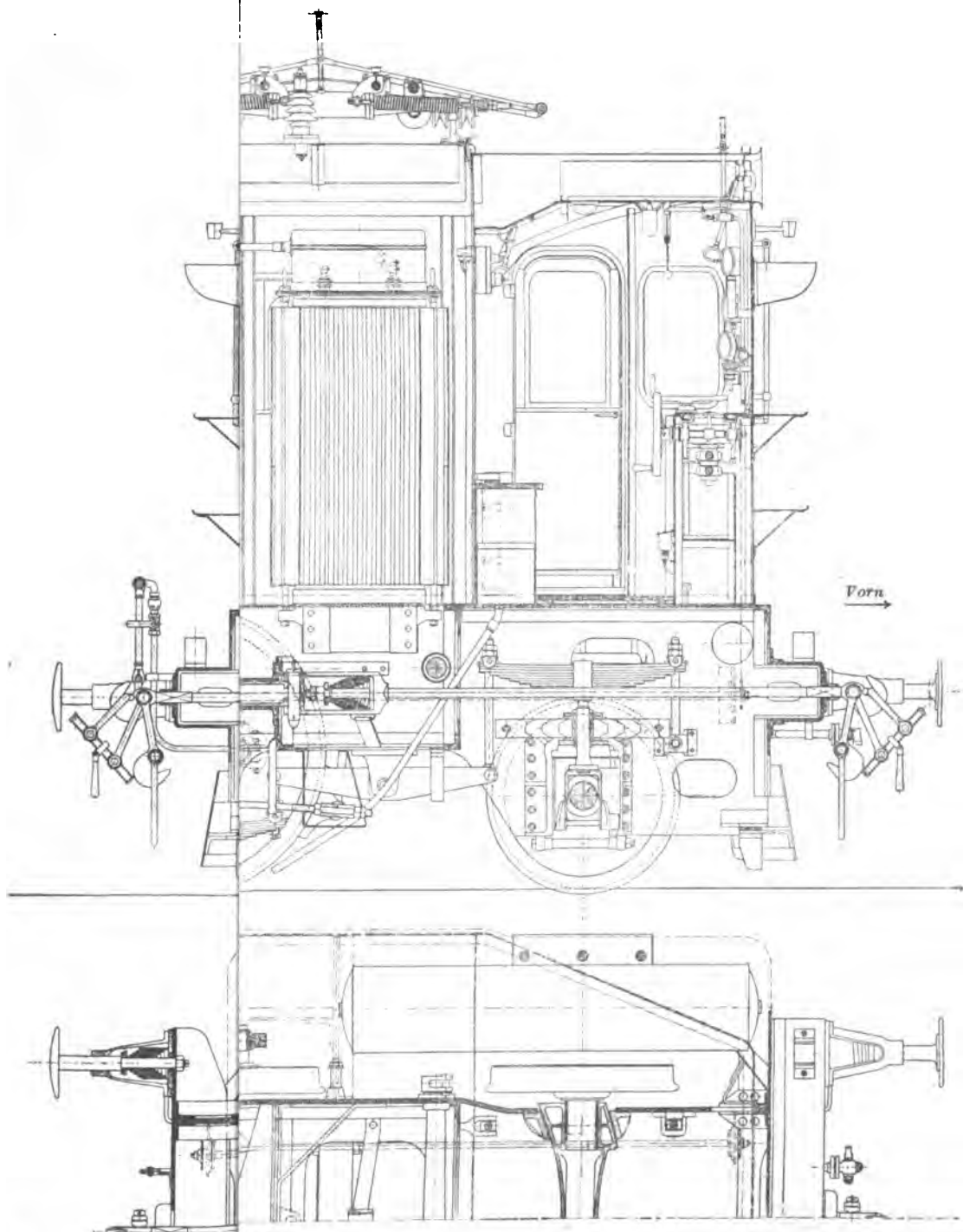
Die verschiebbaren Motorbürsten sind zu je zwei durch eine Kupferschiene fest verbunden und sind unter einen elektrischen Winkel von  $156^\circ$  fest eingestellt. Jedes dieser kurzgeschlossenen Bürstenpaare ist an einem drehbaren Eisenring befestigt, mittels dessen sämtliche Bürsten gleichzeitig verdreht werden. Die zweite Bürste des einen kurzgeschlossenen Bürstenpaares und die erste des nächsten Paares sind also um  $180 - 186 = 24^\circ$  elektrisch verschoben.

Die Motoren besitzen je zwei Kollektoren, was erstens den Vorteil besserer Gewichtsverteilung bringt und die Möglichkeit bietet, die einzelnen Kollektorlamellen kräftiger zu gestalten.

Neben dem hinteren Führerstand steht der Haupttransformator und neben dem vorderen Führerstand der Heiztransformator. Auf den Motoren sind die beiden Ventilatoren untergebracht, während der Druckluftheizer hinter dem Transformator liegt.

Die Betriebsverhältnisse und Hauptabmessungen dieser Lokomotive sind folgende:

Triebraddurchmesser . . . . .	1480 mm
Lauftraddurchmesser . . . . .	990 „
Fester Achsstand . . . . .	3600 „
Ganzer Achsstand . . . . .	8100 „
Länge über Puffer . . . . .	12000 „
Größte Breite . . . . .	3110 „
Höhe des Fahrdrabtes über S. O. . . . .	4850 bis 6000 „
Fahrdrabtspannung . . . . .	15000 Volt
Motorspannung . . . . .	1200 „
Polzahl pro Motor . . . . .	10



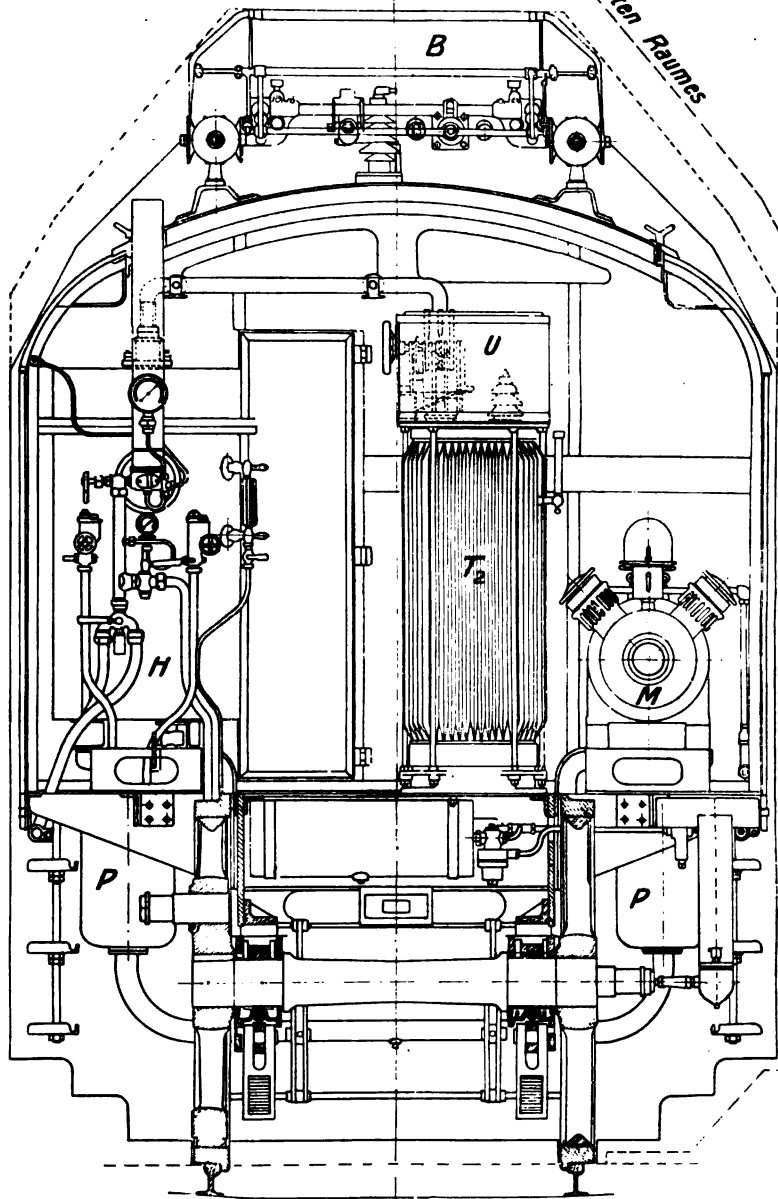
Längs- und Grundrißschem  
 Zipp, Vollbahnlokomotiver

Verlag von Oskar Leiner in Leipzig.

Digitized by Google



Umgrenzung des lichten Raumes



Schnitt durch die hintere Kuppelachse  
nach hinten gesehen.

Leitztransformator

$T_2$  kleiner Transformator (7 kVA)

$U$  Umschalter

Zipp, Voll

Verlag von Oskar Leiner in Leipzig.





Minutliche Drehzahl . . . . .	180
Gesamtgewicht . . . . .	70 t
Reibungsgewicht . . . . .	43,4 t
Normale Zuglast . . . . .	220 t
Stundengeschwindigkeit . . . . .	60 km

(Bei den Probefahrten erreichte die Lokomotive mit einer Belastung von 265—300 t eine Geschwindigkeit bis zu 70 km/st.)

### 39. 2—B—1 Lokomotive der Bergmann-Elektrizitätswerke.

Diese Lokomotive nimmt insofern eine Sonderstellung gegenüber den bisher beschriebenen ein, als eine vereinigte Regelung durch Schützensteuerung und Bürstenverschiebung Anwendung findet.



Fig. 224.

Wie des näheren in Abschnitt 13 erläutert, wird durch Aufteilung der Ständerarbeitswicklung des mit doppelter Speisung arbeitenden Motors in zwei Wicklungen mit senkrecht zueinander stehenden Achsen eine gewisse Beweglichkeit der Bürsten erreicht. Der Reguliervorgang läuft nun grund-

sätzlich so ab, daß zunächst die Bürsten in der Drehrichtung um einen gewissen Winkel aus der Achse der Hauptarbeitswicklung nach der Achse der Erregerwicklung hin verschoben werden (vgl. Fig. 128). Dadurch wird der Drehmomentfluß verstärkt. Wird nun der Motor eingeschaltet, so wird er bei gegebener Klemmenspannung  $e_1$  eine bestimmte Drehzahl  $n_1$  erreichen. Rückt man jetzt die Bürsten wieder entgegengesetzt zur Drehrichtung in die Ausgangsstellung zurück, so wird der Drehmomentfluß geschwächt und die Drehzahl wächst auf den Betrag  $n_2$ . Darauf wird der Motorstrom unter-



Fig. 225.

brochen und die Bürsten werden wieder aus der Achse der Hauptarbeitswicklung verschoben; darauf wird die nächsthöhere Stufe des Transformators an den Motor gelegt, wobei die höhere Spannung  $e_2$  der Drehzahl des Motors  $n_2$  bei dieser verschobenen Bürstenstellung entspricht. Nun wiederholt sich das Spiel.

Soll der Motor in umgekehrter Richtung laufen, so werden die Bürsten stromlos um  $180^\circ$  verschoben.

Durch diese Bürstenverschiebung wird also eine ganz allmähliche Änderung der Geschwindigkeit erzielt, ähnlich wie bei Verwendung eines Dreh-

transformators, dessen Fortfall eine wesentliche Vereinfachung der ganzen Steuerung, wenigstens in elektrischer Beziehung bedeutet.

Allerdings zeigt ein Blick in den Motorraum in Fig. 224, in welchem die verwickelten Getriebe für die Bürstenverschiebung untergebracht sind, daß auch diese mechanische Regelung eine nicht unbedeutende Gewichtszunahme verursacht.

Der Lokomotivmotor besitzt eine Stundenleistung von 1500 PS bei 270 Umdrehungen und eine Dauerleistung von 1150 PS bei 300 Umdrehungen.



*Fig. 226.*

Der Treibraddurchmesser beträgt 1600 mm, die entsprechenden Geschwindigkeiten also 80 und 90 km in der Stunde. Bei der Stundenleistung verbraucht der Motor bei 270 Volt 5000 Ampere. Der Motor besitzt die übliche Bauart; er hat 24 Pole und auf dem Kollektor schleifen 24 Bürstensätze von je vier Kohlen, deren Dicke 15 mm beträgt. Der Bürstenring ist mit einer Laufbahn aus hartem Stahl versehen und rollt auf Kugellagern.

Der Führer bedient die Bürstenverschiebungsvorrichtung durch ein Handrad. Mit dieser Bürstenverschiebungsvorrichtung ist ein Gestänge zur Betätigung der Stufenschalter verbunden, wie Fig. 225 zeigt. Diese Schalter, drei an der Zahl, sind zu einer Gruppe zusammengebaut. Der untere Teil — Fig. 226 — bildet ein Gehäuse, das drei Druckluftzylinder enthält. An

der einen Seite sind die Ventile und die zu deren Betätigung dienende Nockenwelle angebracht. Oberhalb des Druckluftzylinders befinden sich die Schalter, die aus Kupferbürsten und starken Kupferschienen bestehen; darüber befinden sich die Funkenzieher, die in Kammern aus Asbestschiefer untergebracht, mit magnetischer Funkenlöschung versehen sind. Um auch bei leerem Hauptluftbehälter ohne Verzögerung mit dem Schalter arbeiten zu können, ist die Einrichtung so getroffen, daß die Motorluftpumpe zunächst auf den Schalter arbeitet und erst dann, wenn der Druck hier 3 Atm. erreicht hat, die Luft in den Hauptluftbehälter preßt. —

Das Dienstgewicht dieser Lokomotive beträgt 72 t, wobei die elektrische Einrichtung 26,5 t wiegt.

Die der Stundenleistung entsprechende Zugkraft beträgt am Haken 4500 kg, die Dauerzugkraft 3500 kg. Anfahrversuche bei stehender Lokomotive ergaben eine höchste Anfahrzugkraft am Haken von 16 500 kg.

Die Lokomotive hat Personenzüge bis 430 t, sowie Güterzüge von fast 1000 t, letztere mit 55 km in der Stunde, anstandslos befördert.

---

---

## Verzeichnis der Stichwörter.

### A.

Achsdruck 107.  
Adams-Achse 127.  
Alexanderson-Motor 55.  
Anfahrbeschleunigung 90.  
Anlaßtransformator 59.  
Anlauf 55.  
Anlaufweg 57.  
Anlaßstrom, -moment 59.  
Arbeitsbürsten 50.  
Arbeitsrückgewinnung 71.  
Arnoldscher Repulsions-Motor 34.  
Atkinsonscher Repulsions-Motor 18, 30.  
Ausgleichswicklung 13, 17.

### B.

Bahnwiderstand 76.  
Beleuchtung 177.  
Beschleunigungsdruck 131.  
Blindkontroller 204.  
Blindwelle 143.  
Bremsung 91.  
Bremsverzögerung 94.  
Bügelstromabnehmer 157.  
Bürstenbreite 69.  
Bürstenverschiebung 22.  
Bürstenverschleiß 159.

### D.

Dampfheizung 177.  
Dampfverbrauch der Lokomotiven 102.  
Deichselgestell 128.  
Déri-Motor 19, 39.  
Doppel-Speisung 51.  
Drehfeld 32.  
Drehgestelle 127.  
Drehmoment 9, 124.  
Drehmomentfluß 17.  
Drehtransformator 164.  
Drehzahlregelung 55, 61.  
Drosselspule 163, 174.  
Druckluftsteuerung 204.

### E.

Einfachbürsten-Repulsions-Motor 19.  
Einkammerbremse 170.  
Erdungswiderstand 174.  
Erregerbürsten 50. ◀  
Erregertransformator 51.

### F.

Fahrschalter 168.  
Fahrtwender 192.  
Fahrzeit 92.  
Federung 131.  
Fernschalter 167.  
Fliehkraft 133.  
Führerbremsventil 170.  
Funkenspannung 60.

### G.

Gewichtsverteilung 150.  
Gleiskrümmung 78.  
Gleitweg 126.

### H.

Hauptschlußwendefeld 28.  
Heißdampflokomotive 103.  
Heizfläche 104.  
Heizung 177.  
Hochspannungsschalter 176, 190.  
Höchstgeschwindigkeit 93.  
Höchststromrelais 175.  
Hörnerableiter 174.

### I.

Induktionsregler 34, 165.

### K.

Kesselleistung 103.  
Kippmoment 132.  
Kolbendruck 103.  
Kommutatorteilung 69.  
Kommutierungsfeld 43.  
Kreiselbewegung 132.  
Kuppelrahmen 147.  
Kurbelantrieb 139.  
Kurzkupplung 187.

### L.

Lagersicherung 176.  
Lagerung des Motors 159.  
Lamellenteilung des Kommutators 69.  
Latour-Motor 48.  
Laufachsen 127.  
Läufererregung 19.  
Lauffähigkeit 131.  
Leistungstransformator 60.  
Lokomotivgewicht 105.

Lokomotivwiderstand 80.  
 Luftdruckbremse 169.  
 Luftkühlung 157.  
 Lüftung 150.  
 Luftwiderstand 76.

**M.**

Magnetisierungsstrom 15.  
 Meisterwalze 169.  
 Mitnehmer 143.

**N.**

Nebenschlußwendefeld 28.  
 Nowotny-Achse 127.  
 Nullstrom-Auslösung 176.  
 Nuten, geschlossene 162.  
 Nutzbremmung 71.

**O.**

Ölkühlung 157.  
 Osnos-Motor 55.

**P.**

Parallelkurbelgetriebe 145.

**R.**

Raddruck 100.  
 Radstand 78, 127.  
 Reguliertransformator 56.  
 Reibungsgewicht 125.  
 Repulsionsmotor 18.  
 Rostfläche 104.  
 Rutenstromabnehmer 156.

**S.**

Sandstreuer 172.  
 Sättigung, magnetische 57.  
 Schaltwalze 167.  
 Schaltwiderstand 163.  
 Schienendruck 100.  
 Schlingerbewegungen 127.  
 Schützensteuerung 167.  
 Schwachstromleitungen 162.  
 Sehnenwicklung 20.  
 Selbsterregung 73.  
 Spannungsteiler 163.  
 Spartransformator 52.  
 Speisung, doppelte 51.  
 Sperrtransformator 74.

Steuerventil für Bremse 170.  
 Streukoeffizient 56.  
 Streufelder 21, 23.  
 Streufluß 15.  
 Stromabnehmer 152.  
 Stromwendung 22, 42, 56.  
 Stufenschalter 176.  
 Stufentransformator 163.

**T.**

Thompsonscher Repulsions-Motor 18.  
 Transformatoridiagramm 13.  
 Transformatorfluß 17.

**U.**

Überlastbarkeit 150.  
 Übersetzungsverhältnis beim Zahntrieb 136.  
 Überspannungswellen 174.  
 Überstrom 175.  
 Übertragungsverluste 120.  
 Umfangsgeschwindigkeit 135.  
 Umformungsverluste 108.  
 Umsteuerung 55.

**V.**

Verbundlokomotiven 102.  
 Verriegelung 176.  
 Versuchsfahrten 81, 101  
 Verzögerungsrelais 175.  
 Vielfachsteuerung 169.

**W.**

Wankbewegungen 131.  
 Webb-Achse 127.  
 Wellenzahl 70.  
 Wendefelder, phasenverschobene 28.  
 Wendefluß 23.  
 Wendepol 23.  
 Wendespannung 24.  
 Widerstandsbremmung 82.  
 Windgeschwindigkeit 82.  
 Winter-Eichberg-Motor 48.  
 Wirkungsgrad der Lokomotiven 108.

**Z.**

Zahntrieb 135.  
 Zugkraft 124.  
 Zugwiderstand 78.  
 Zusatzbremse 86.  
 Zusatztransformator 163.  
 Zylinderfüllung 103.

# Handbuch der elektrischen Hochspannungstechnik

Mit besonderer Berücksichtigung der Energieübertragung

Lehrbuch  
für Ingenieure und Studierende

von

**Professor Hermann Zipp**

Dozent am städtischen Friedrichs-Polytechnikum zu Cöthen i. Anh.

Lex.-Oktav. 436 Seiten mit 464 Abbildungen und 4 Tafeln

ℳ 13.50, geb. ℳ 15.—

Das ganze Werk bietet dem Ingenieur eine sehr gute Informationsquelle und gibt einen guten Einblick in den heutigen Stand der Hochspannungstechnik. *Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen.*

Das Buch zerfällt in sechs Kapitel von je 60 bis 100 Druckseiten. Der reiche Inhalt ist nicht zu verkennen. Dem Ingenieur wird das Werk eine sehr willkommene Informationsquelle sein.

Der stattliche, gut ausgestattete Band gibt eine wertvolle klare Zusammenstellung des in einzelnen Abhandlungen, Dissertationen, Zeitschriften, Preilisten weit zerstreuten, oft noch nicht veröffentlichten Materials, übersichtlich gesichtet und geprüft. Viele Einzelheiten werden durch eigene Untersuchung geklärt. So gibt das Werk ein abgeschlossenes, kritisches Bild unserer heutigen Kenntnisse und wird deshalb dem Elektrotechniker und dem Studierenden der Elektrotechnik gleich unentbehrlich sein.

*Elektrotechnische Zeitschrift.*  
*Das Polytechnikum.*

---

## Tabellen der Elektrotechnik

Zum praktischen Gebrauch für Techniker,  
Werkmeister, Monteure, Werkstattarbeiter,  
Maschinisten

Von

**Professor Hermann Zipp**

Dozent am städtischen Friedrichs-Polytechnikum zu Cöthen i. Anh.

3. vermehrte Auflage

Quer-Oktav. 73 Seiten

ℳ 2.10, geb. ℳ 3.—

Für alle diejenigen, die sich weder die „Hütte“ noch den „Kalender für Elektrotechniker“ anschaffen wollen, ist die Tabellenzusammenstellung von H. Zipp sehr brauchbar. Neben einer Erläuterung für die gebräuchlichsten Abkürzungen findet man die Maßeinheiten, die üblichen Zahlentabellen über Logarithmen, Reziproken, Kreisumfänge und Inhalte, sowie Tabellen über Dichte, Gewichte, Wärme, Widerstände und Durchschlagsfestigkeit, ferner Belastungswerte für Leitungen, Amortisationstabellen u. dgl. Der Techniker kann die Daten für die Berechnung von Konstruktionen und der Kaufmann und der Werkstatttechniker für die Kalkulation benutzen.

*Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen.*

## **Bau und Betrieb elektrischer Bahnen.**

Von Ingenieur Max Schiemann. Handbuch zu deren Projektierung, Bau und Betriebsführung. 1. Band: Straßenbahnen. Mit 521 Abbildungen, einer lithographischen Tafel und 3 Tafeln Diagramme. 3. vermehrte Aufl. Gr. 8°. 669 Seiten. *M* 12.50, geb. *M* 14.—

2. Band: Haupt-, Neben-, Industrie-, Fernschnell- und gleislose Bahnen. Gr. 8°. 462 Seiten mit 274 Abbildungen und 31 Tafeln. 3. Auflage. *M* 12.50, geb. *M* 14.—

*Das vorliegende, außergewöhnlich splendid und mit zahlreichen Illustrationen ausgestattete Werk behandelt den Bau und Betrieb elektrischer Bahnen, diesen interessanten und so überaus zeitgemäßen Zweig der Ingenieurtechnik mit großer Ausführlichkeit und eingehendster Fachkenntnis. Das Schiemannsche Buch wird dem Fachmann und dem Laien daher viel Anregendes bieten und in hervorragender Weise dazu dienen, Belehrung in weitere Kreise zu tragen und Strebenden neue Bahnen zu weisen.* (Wochenschrift für Eisenbahnbetriebs- u. Verkehrsbeamte.)

## **Die elektrischen Autobahnen.**

Gleislose Motorwagen mit elektrischer Stromzuführung. Ein neues Verkehrsmittel, ein neuer Industriezweig, eine neue Kapitalanlage. Von Ingenieur Max Schiemann. Gr. 8°. 35 S. mit 25 Abbild. *M* —.75  
*Die vorliegende sehr empfehlenswerte Schrift des auf dem Gebiete des Straßenbahnwesens rühmlichst bekannten Verfassers gibt ein klares Bild über die elektrischen Autobahnen, unter Beobachtung desjenigen, was bisher in der Angelegenheit projiziert, probiert und ausgeführt worden ist.*

## **Elektrische Fernschnellbahnen der Zukunft.**

Populäre volkswirtschaftliche Eisenbahnskizze von Ingenieur Max Schiemann. 2. verbesserte Auflage. 8°. 68 Seiten. Mit 5 Abbildungen und einer lithographischen Tafel. Geb. *M* 1.50

*Dieses Werkchen behandelt ein Thema, dem von allen Seiten eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird, denn die Einführung elektrischer Fernbahnen in unsere Verkehrswege erregt das allergrößte Interesse. Die in vorstehendem Werkchen niedergelegten Ansichten und Ideen über Durchführung und Entwicklung dieses Verkehrsmittels werden gewiß mit ganzer Befriedigung von allen zur Kenntnis genommen, denen der weitere Ausbau unserer Verkehrswege ein Interesse abgewinnt.*

## **Die mechanischen und elektrischen Konstruktionen für elektrische Eisenbahnen.**

Hilfsbuch für Maschinen-, Elektro- u. Eisenbahn-Ingenieure, Konstrukteure u. Wagenbauer, zugleich ein Vorlagenwerk für Konstruktionsbureaus, Bahnmotore und Generatoren. Herausgegeben von Obergeringieur Josef Kramer, Dozent für Elektrotechnik. Mit 33 Tafeln, wovon 10 in Farbendruck, und 84 Textfiguren. Querfolio. Geb. *M* 20.—

*Das Werk soll dem Entwerfen elektrischer Bahnbetriebsmaschinen als Hilfsbuch dienen, zugleich denen, die Entwürfe elektrischer Bahnen zu bearbeiten oder zu überwachen haben, genaue Anweisung geben, wie solche hergestellt werden. Dem Entwerfer leisten sie namentlich dadurch wertvolle Dienste, daß die Gegenstände der Darstellung bis in die kleinsten Einzelheiten unter Beigabe aller Abmessungen verfolgt sind, ohne daß aber die Klarheit im ganzen leidet. Wir sehen in dem Werke eine sehr wertvolle Bereicherung der elektrotechnischen Bahnliteratur.*

(Zeitschrift des Vereins deutscher Eisenbahn-Verwaltungen.)

## **Die Entstehung und Entwicklung unserer elektrischen Straßenbahnen.**

In gemeinfaßlicher Darstellung. Von Ingenieur Julius Weil. Gr. 8°. 92 Seiten mit 67 Abbildungen. *M* 3.—

*Das vorliegende, hochinteressant geschriebene Werk geht in gemeinfaßlicher Darstellung auf das Thema ein, in der Absicht, eine Lücke in der Literatur insofern auszufüllen, als es den Laien und unter diesen besonders denjenigen, die öfters ein entscheidendes Wort bei der Bewilligung von Projekten und Verträgen mitzusprechen haben, zur Orientierung über die wichtigsten Eigentümlichkeiten elektrischer Straßenbahnanlagen dienen soll. Den Schluß des empfehlenswerten Buches bildet eine Beschreibung von elektrischen Straßenbahnen, welche deutsche Firmen im In- und Auslande ausführten.* (Technisches Zentralblatt.)



## Elektrizitätszähler für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom, deren Theorie, Beschreibung und Eichung.

Von Diplom-Elektro-Ingenieur H. W. L. B r ü c k m a n n , Konservator des physikalischen und elektrotechnischen Laboratoriums der Technischen Hochschule in Delft. Gr. 8°. 230 Seiten. Mit 206 Abb. und 3 Tafeln.

ℳ 8.50, geb. ℳ 9.50

*Das Buch, welches die Elektrizitätszähler aller Art, in ihrer Entwicklung, Konstruktion usw. eingehend behandelt, ist in erster Linie für Elektrizitätswerke und deren Zählertechniker bestimmt. Aber auch jeder Nichtfachmann, der sich mit den Zählern vertraut machen will, wird in dem Werk alles finden, um sich genau informieren zu können.*

## Meßapparate und Meßmethoden

für den praktischen Installateur und Monteur elektrischer Stark- und Schwachstromanlagen. Von Ingenieur W. K n o b l o c h . 2. Auflage. 8°. 263 Seiten mit 251 Abbildungen.

ℳ 2.80, geb. ℳ 3.40

*Wenn es angeht, von einem Buch das Wort zeitgemäß zu gebrauchen, dann gilt dies sicherlich von dem Buche Knoblochs. Es ist für den praktischen Installateur und Monteur elektrischer Anlagen bestimmt und der Verfasser nimmt in der Behandlung seines Themas nach Form und Inhalt Rücksicht auf seinen Leserkreis. Er hat es meisterhaft verstanden, den Stoff jedem Leser nahe zu bringen. An der Hand übersichtlicher schematischer Zeichnungen werden alle wichtigen Meßapparate und Meßmethoden eingehend erläutert. Das Buch kann jedem, der sich mit elektrischen Messungen zu beschäftigen hat, nur empfohlen werden.*

(Technische Monatshefte.)

## Elektrische Automaten und Fernschalter.

Ein Handbuch für Installateure, Elektrotechniker und Ingenieure von Ingenieur E. B o h n e n s t e n g e l . 8°. 151 Seiten mit 163 Abbildungen.

ℳ 2.50, geb. ℳ 2.80

*In leichtverständlicher und anschaulicher Weise beschreibt das Buch die jetzt in Deutschland und einem Teile des Auslandes gebauten Schaltuhren für elektrische Treppenbeleuchtung, Zeitschalter und Zeitferschalter, Schaltapparate für Reklamebeleuchtung, Fernschaltautomaten, Strombegrenzer und Sperrschalter sowie Reklame-Beleuchtungskörper. Da es bisher an einem derartigen, für den Praktiker bestimmten Werke fehlte, wird dasselbe allen Interessenten willkommen sein.*

(Der Mechaniker.)

## Der Erdschluß elektrischer Anlagen,

seine Entstehung, Wirkung, Folgen, Aufsuchung, Beseitigung und seine Beziehungen zum Kurzschluß. Von Ingenieur K. S c h i n d l e r . 8°. 75 Seiten mit 20 Abbildungen.

ℳ 1.50

*Das vorliegende bestens empfohlene Werk ist vorzugsweise für Elektrotechniker, Installateure und Monteurs, sowie für Besitzer und Wärter elektrischer Starkstromanlagen bestimmt. Es füllt in der elektrotechnischen Literatur insofern eine Lücke aus, indem es in leichtverständlicher, aber in jeder Beziehung ausführlicher Weise alle möglichen Ursachen von Erdschluß klarlegt.*

## Elektrizität in Brauereien.

Von Ingenieur W. D r ä s e l . Gr. 8°. 142 Seiten mit 109 Abbildungen.

ℳ 4.50, geb. ℳ 6.—

*Das Buch ist genau wie für den Brauereifachmann auch für den Elektrotechniker wichtig, da dieses einzigartige Werk eine leichtverständliche Anleitung für die praktische Anwendung der Elektrizität in den Brauereibetrieben gibt. Bei der Auswahl und Gestaltung des Stoffes sind, dem Zwecke des Buches entsprechend, vorwiegend praktische Gesichtspunkte in Auge gefaßt worden. Theoretische Erörterungen sind infolgedessen auf das äußerste Maß beschränkt. Die in den Text eingestreuten Figuren und Schematas sollen zur Hebung des Verständnisses beitragen. Schließlich sei auch auf die Tabellen am Schlusse des Buches und im Text hingewiesen, deren Gebrauch bei der Projektierung von Nutzen sein wird.*

### **Elektrische Starkstromtechnik.**

Eine leichtfaßliche Darstellung. Von Obering. Dr. E. Rosenbergl.  
4. vermehrte Auflage. Gr. 8°. 306 Seiten mit 311 Abbildungen.

M 8.—, geb. M 9.—

*Wir halten es für einen Vorzug, wenn ein Verfasser es versteht, seinen Stoff ohne Zuhilfenahme von hochwissenschaftlichen Ausdrücken und Darstellungsweisen dem Leser klar zu machen. und diese Fähigkeit hat der Verfasser des vorliegenden Buches. Gute Werke dieser Art, welche auch dem Laien verständlich sind, gibt es sehr wenige und doch besteht ein großes Bedürfnis in dieser Richtung. Der Verfasser hat es verstanden, sein Buch so klar zu schreiben, daß es auch für solche Leser Interesse haben wird. Der Arbeiter und Monteur, sowie der Laie werden das Werk mit Nutzen lesen; wir können es ihnen aufs wärmste empfehlen. (Elektrotechnische Zeitschrift.)*

### **Grundzüge der Wechselstromtechnik.**

Eine gemeinfaßliche Darstellung der Grundlagen der Elektrotechnik der Wechsel- und Mehrphasenströme für Ingenieure, Architekten, Industrielle, Militärs, Techniker und Studierende an technischen Mittelschulen. Von Prof. Dr. Richard Rühlmann. Zugleich Ergänzungsband zu desselben Verfassers „Grundzüge der Gleichstromtechnik“. 2. Auflage. Gr. 8°. 619 Seiten mit 505 Abbildungen.

M 15.75, geb. M 17.—

*Das Werk führt in allgemeinverständlicher Weise in das Gebiet der elektrischen Wechselströme ein. Wegen seiner klaren und allenthalben durch Abbildungen erläuterten Darstellung ist das Buch sehr gut geeignet, Technikern aller Art, Studierenden sowie Laien den Eintritt und das Heimischwerden in dem Gebiet des Wechselstromes zu erleichtern.*

*(Zeitschrift für Architektur u. Ingenieurwesen.)*

### **Grundzüge der Gleichstromtechnik.**

Eine gemeinfaßliche Darstellung der Grundlagen der Starkstrom-Elektrotechnik des Gleichstromes für Ingenieure, Architekten, Industrielle, Militärs, Techniker und Studierende an technischen Mittelschulen. Von Prof. Dr. Richard Rühlmann. 2. Auflage. Gr. 8°. 626 Seiten mit 400 Abb.

M 14.—, geb. M 15.50

*Das vorliegende Werk, das mehrfach auf Ausstellungen preisgekrönt wurde, ist vorzugsweise für diejenigen bestimmt, welche eine Einsicht in das Gebiet der Starkstromtechnik gewinnen wollen, denen aber nicht Zeit für das anstrengende Studium umfanglicher, eingehende Kenntnis der höheren Mathematik voraussetzende Werke zur Verfügung steht. Das Buch, das wegen der leichtverständlichen und doch wissenschaftlich richtigen Behandlung des Stoffes Beachtung verdient, dürfte sich rasch in den weitesten Kreisen einbürgern.*

*(Deutsche Technikerzeitung.)*

### **Erklärendes Wörterbuch der Elektrotechnik.**

Von Ingenieur S. Herzog. Kl. 8°. 48 Seiten.

M —.75

*Ein populär-technisches Wörterbuch im wahrsten Sinne des Wortes. Keinerlei fachtechnische Bildung wurde bei der Erklärung der einzelnen Worte dieses äußerst praktisch angelegten Buches vorausgesetzt. Es ist, deshalb in erster Linie für Monteure, Maschinisten, Laien usw. bestimmt.*

### **Elektrotechnisches Wörterbuch.**

Englisch-Deutsch; Französisch-Deutsch; Deutsch-Englisch-Französisch. Von †Telegr.-Direktor a. D. J. Sack. Mit Zusätzen versehen von Ingenieur Arthur Wilke. Gr. 8°. 123 Seiten.

M 4.50, geb. M 5.—

*Für den praktischen Gebrauch, beim Lesen einer Fachschrift in den drei Sprachen reicht das vorliegende Wörterbuch vollkommen aus. Es kann jedem Elektrotechniker aufs wärmste empfohlen werden.*

*(Der praktische Maschinenkonstrukteur.)*

### Die elektrischen Öfen in der Eisenindustrie.

Von Diplom-Ingenieur W. Rodenhausser und Betriebsdirektor J. Schoenawa. Gr. 8<sup>o</sup>. 326 Seiten mit 127 Abbildungen und 4 farbigen Tafeln. M 13.50, geb. M 15.—

... Die Verfasser haben sich dabei bemüht, die Vor- und Nachteile der einzelnen Ofenkonstruktionen durch Vergleich ihrer Leistungen mit denen eines Idealofens unparteiisch zu schildern, und sie sind in diesem Bemühen so erfolgreich gewesen, wie man bei der lebhaften Entwicklung des Gebietes, an dem die Verfasser selbst in hervorragender Weise mitarbeiten, nur irgend erwarten darf. Alles in allem bringt uns das Buch jedenfalls eine sehr erwünschte Einführung in seinen Gegenstand und kann jedem Interessenten warm empfohlen werden.

(Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure.)

Die in Kreisen der Eisenhüttenleute bekannten Verfasser besitzen eine mehrjährige praktische Erfahrung im Betriebe von Elektrostahlöfen, man darf also von vornherein erwarten, daß die von ihnen gemachten Mitteilungen, soweit sie den Ofenbau, Betrieb und die Verwendbarkeit des elektrischen Ofens in der Stahlindustrie betreffen, einen hohen Grad von Zuverlässigkeit besitzen werden. Das Buch umfaßt alles, was bisher praktisch für die Eisenindustrie in Frage kommt. Die Abfassung ist klar; der Versuch einer kritischen Bewertung der einzelnen Ofen und Verfahren wirkt auf jeden Fall anregend auf den Leser. Daß der Induktionsofen eine besonders eingehende Behandlung erfahren hat, ist im vorliegenden Falle erklärlich. Das Buch kann allen denen, die sich über die Frage der elektrischen Eisen- und Stahlerzeugung unterrichten wollen, namentlich Freunden des Induktionssystems, nur empfohlen werden. (Stahl und Eisen.)

### Einführung in die Eisenhüttenkunde.

Von Diplom-Ingenieur Fr. Erbreich, Oberlehrer an der Kgl. Maschinenbau- und Hüttenschule in Duisburg. Gr. 8<sup>o</sup>. 184 Seiten. Mit 127 Abbildungen und Tafeln. M 5.—, geb. M 6.50

Die vorliegende Einführung in die Eisenhüttenkunde mit ihrer überaus klaren und leichtverständlichen Art der Behandlung des Stoffes stellt ein Buch dar, dessen Anschaffung jedem nicht dringend genug empfohlen werden kann, der sich über die Eisenhüttenkunde näher informieren will. Selbst Praktiker werden das flott und präzise geschriebene Werk gern zur Hand nehmen, um eventuell Vergessenes aufzufrischen und sich im neuesten zu orientieren. (Der Erzbergbau.)

### Anorganische Chemie für Ingenieure.

Von Dr. F. Dupré, Dozent der Chemie und Vorstand des Laboratoriums für anorganische Chemie und Elektrochemie am Städtischen Friedrichs-Polytechnikum Cöthen. Mit 48 Abbildungen. M 6.—, geb. M 7.50

Das Werk ist, wie schon der Titel sagt, ein auf durchaus praktische Ziele gerichtetes Buch. Der Verfasser hat damit einen Abriss der anorganischen Chemie gegeben, der in seiner Klarheit und Übersichtlichkeit für jeden Ingenieur und nicht nur dem technischen Chemiker eine ausgezeichnete Einführung bzw. Rekapitulation der Grundzüge der anorganischen Chemie bedeutet. Ohne Umschweife und doch, ohne daß irgendwie die Wissenschaftlichkeit der Materie darunter leidet, läßt sich der Verfasser nur von dem einen Ziele leiten, den Stoff mit möglicher Einfachheit und Deutlichkeit zu gestalten. Enge Verknüpfung mit der Praxis gibt dem Werke einen eigenen Reiz und gestaltet die Lektüre anregend und wertvoll. Das Buch kann nur warm empfohlen werden. (Die Chemische Industrie.)

### Lehrbuch der Elektrochemie.

Von Prof. Dr. Max Leblanc. 5. vermehrte Auflage. Gr. 8<sup>o</sup>. 331 Seiten mit 30 Figuren. M 6.—, geb. M 7.—

Mit großer Freude meldet der Berichterstatter die Ausgabe der neuen Auflage des vortrefflichen Lehrbuches, das vermöge seiner glücklich getroffenen Darstellungsweise und seines zuverlässigen Inhaltes sich schnell einen großen Kreis von Freunden gewonnen hat. Nimmt es doch trotz der ziemlich mannigfaltigen Versuche, den Lehrinhalt der heutigen Elektrochemie in einem Werke mäßigen Umfangs zusammenzufassen, unter diesen dauernd die erste Stelle ein und wird sie noch eine lange Zeit behaupten. (Zeitschrift für physikalische Chemie.)

## Die Wärmekraftmaschinen.

Ein Lehrbuch über Kolbendampfmaschinen, Dampfturbinen u. Verbrennungskraftmaschinen für technische Schulen und den Selbstunterricht. Von Dr.-Ing. Charles Steuer, Kgl. Oberlehrer an der höheren Maschinenbauschule in Posen. 264 Seiten. Mit 288 Abbild. und 7 Tafeln. *M* 8.50, geb. *M* 9.50  
*Die vorliegende Veröffentlichung ist hauptsächlich dazu bestimmt, dem angehenden Ingenieur und Techniker als Leitfaden zur Einführung in das große Gebiet der Wärmekraftmaschinen zu dienen. Zum Verständnis des Buches genügt die Kenntnis der elementaren Mathematik, Festigkeitslehre und Mechanik und zwar ist zur Erleichterung der Einarbeitung eine kurze Zusammenstellung der wichtigsten und notwendigen Formeln aus der Mechanik und Wärmelehre vorweggenommen. Das Lehrbuch zerfällt in drei Hauptabschnitte: Kolbendampfmaschinen, Dampfturbinen und Verbrennungskraftmaschinen.*

## Tabellen und Konstruktionsregeln für den Verbrennungsmotoren-techniker.

Hilfsbuch für Berechnung und Untersuchung von Gasmaschinen. Von Diplom-Ingenieur Ph. Michel, Dozent am Städtischen Friedrichs-Polytechnikum Cöthen in Anhalt. 2. Aufl. 8°. 187 Seiten mit 59 Abbildungen im Text und einem Anhang, enth. Lieferungsbedingungen und Sicherheitsvorschriften. *M* 2.75, geb. *M* 3.25

*Das vorliegende Taschenbuch gibt die bei Berechnung, Projektierung und Untersuchung von Verbrennungskraftmaschinen notwendigen Hilfswerte in sehr übersichtlicher und leicht auffindbarer Form. Sämtliche auf den erwähnten Gebieten vorkommenden Begriffe, Elemente, Berechnungswerte, Formeln, und Hilfsmittel sind zweckmäßigerweise ihrer alphabetischen Reihenfolge nach behandelt. Die Ausführungen sind sehr klar und trotz ihrer Knappheit für den angestrebten Zweck vollkommen erschöpfend. Ein besonderes Interesse sichern dem Taschenbuch — gerade auch seitens der Studierenden — die im Anhang gegebenen Lieferungsbedingungen und Sicherheitsvorschriften.*

*Allgemeine Ingenieur-Zeitung.*

## Die Wirkungsweise und Konstruktion der ortsfesten Verbrennungskraftmaschinen mit einem Anhang über die Gasturbine.

Von Diplom-Ingenieur Hans Berner, Dozent am Technikum Altenburg, S.-A. 8°. 178 Seiten mit 92 Abbildungen. *M* 3.25, geb. *M* 3.75

*In dem vorliegenden Buch ist die Konstruktion und Wirkungsweise der Verbrennungskraftmaschinen so behandelt, daß zum Verständnis nur die einfachsten Kenntnisse der Mechanik und Festigkeitslehre vorausgesetzt werden. Dem Buche ist ein Anhang über Gasturbinen beigegeben, aus welchem ohne Zuhilfenahme der Wärmetheorie die Wirkungsweise erklärt ist. Da es an guten, kurz gehaltenen Büchern über Verbrennungskraftmaschinen tatsächlich mangelt, ist das erschienene Werk gewiß allen willkommen und sei insbesondere denjenigen, die an die Anschaffung von Verbrennungskraftmaschinen schreiten, zum vorherigen Studium bestens empfohlen.*

*(Gewerbliche Rundschau.)*

## Schiffsmaschinen, deren Berechnung und Konstruktion.

Von Ingenieur Alb. Bodenmüller, Bürochef der Stettiner Maschinenbau-Act.-Ges. „Vulcan“. 2. Aufl. 8°. 208 S. m. 125 Abb. *M* 4.80, geb. *M* 5.25

*Das Werk ist in der Absicht entstanden, alle praktischen Erfahrungen dem angehenden Konstrukteur in einem billigen und weniger umfangreichen Handbuch zugänglich zu machen. Gegenüber ähnlichen Büchern ist neu hinzugekommen ein Kapitel über „Gegenpropeller“. Die in den Text eingefügten Konstruktionszeichnungen sind neueren Datums und Ausführungen der bekannten „Stettiner Maschinenbau-Actien-Ges. Vulcan“.*

## Schiffshilfsmaschinen, deren Berechnung und Konstruktion.

Von Ing. Albert Bodenmüller, Bürochef der Stettiner Maschinenbau-A.-G. „Vulcan“. Gr. 8°. 246 S. m. 206 Abb. u. Tafeln. *M* 9.—, geb. *M* 10.—

*Während seiner langjährigen Tätigkeit speziell auf dem Gebiete des „Hilfsmaschinenbaues“ war der Verfasser in der Lage, reiche Erfahrungen zu sammeln, die er in kurzer, übersichtlicher Form zusammengefaßt hat. Unterstützt wurde die Arbeit durch Überlassung von Zeichnungen neuer Hilfsmaschinen und Tabellen von den Vulkan-Werken Hamburg-Stettin, Elektro-Dampfturbinengesellschaft Karlsruhe, Maschinenfabrik „Rheinland“ A.-G., Düsseldorf, Blackman Export Co. Ltd., London usw.*



